

## ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КАРТ ОПОРНЫЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ СЕТИ

**Опорные геодезические сети.** Они являются хранителями заданной системы координат.

Совокупность геометрически взаимосвязанных и закреплённых на местности точек (*геодезических пунктов*), положение которых определено в общей для них системе координат, образует *геодезическую сеть*.

Геодезические сети - это наиболее надёжный, совершенный и практически единственный способ закрепления координатных систем. Измерения на геодезических пунктах могут быть выполнены с наибольшей тщательностью, многократно, повторены в разные эпохи и подвергнуты строгой математической обработке.

Геодезические сети используются для решения ряда научных и практических задач:

- изучения фигуры Земли, её внешнего гравитационного поля, движений полюсов, неравномерности вращения и других геодинамических процессов;
- координатного обеспечения прикладных работ, космического пространства и космических летательных аппаратов;
- картографирования суши, континентального шельфа, морей и океанов;
- обеспечения координатной средой геоинформационных систем.

**Методы построения геодезических сетей.** Кратко отметим основные методы.

• **Астрономические методы.** Это одни из первых методов, использовавшийся для создания сети пунктов с известными координатами. Древнегреческий астроном, географ, математик, механик *Гиппарх* (190/180-120/126 гг. до н.э.) впервые ввел термины «широта» и «долгота». Положение некоторых пунктов определил из астрономических наблюдений. Понимал, что для построения географической карты должны служить только точные астрономические измерения широт и долгот. Много занимался астрономическими наблюдениями Бируни (973-1048). Улугбек (1394-1449) широко использовал определения географических координат различных мест Средней Азии.

• **Традиционные наземные методы.** Они основаны на соответствующей точности наземных измерений горизонтальных и вертикальных углов, длин линий, нивелирных превышений, силы тяжести и комбинации их с астрономическими наблюдениями. Голландский математик, физик и астроном Снеллиус (*Willebrord Snel van Royen*; 1580-1626) предложил метод триангуляции и провёл в Голландии измерения дуги меридиана длиной немногим более 1°. Метод триангуляции, построение на местности треугольников или других замкнутых фигур измерением в них всех углов, развивался с развитием геодезического приборостроения – высокоточных теодолитов<sup>1</sup>, а затем и приборов для измерения длин линий<sup>2</sup>. Большим шагом вперёд было открытие *инвара* (лат. *Invariabilis* - неизменный) - сплава, состоящего из никеля (32%), железа (64%), кобальта 4%. Обладает исключительно малым температурным коэффициентом линейного расширения –  $2-7 \cdot 10^{-7}$ . Инвар изобрёл в 1899 г. швейцарский ученый Ш. Гийом (*Charles Édouard Guillaume*, 1861-1938). Сплав использовали для изготовления мерных проволок и измерений ими длин линий с точностью 1 мм на километр ( $1 \cdot 10^{-6}$ ). Ещё большему развитию триангуляции способствовали разработки в середине XX в. высокоточных светодальномеров. Они позволили наряду с триангуляцией применять полигонометрию,

<sup>1</sup> Общие сведения о высокоточных теодолитах. URL: <http://geodetics.ru/svedeniya-teodolitah.html> (Дата посещения 6.08.2014.).

<sup>2</sup> Краткие сведения из истории развития геодезического приборостроения. (Дата посещения 6.08.2014.). URL: [http://studopedia.ru/2\\_32893\\_kratkie-svedeniya-iz-istorii-razvitiya-geodezicheskogo-priborostroeniya.html](http://studopedia.ru/2_32893_kratkie-svedeniya-iz-istorii-razvitiya-geodezicheskogo-priborostroeniya.html)

построения в виде хода с измеренными углами поворота и длинами линий, и строить линейно-угловые сети, сочетавшие высокоточные линейные и угловые измерения.

На рис. 8.1. приведены основные геометрические фигуры, использовавшиеся в триангуляции и в линейно-угловых построениях. Благодаря этим фигурам триангуляция становилась довольно жестким и точным построением. В плоском треугольнике с тремя измеренными углами всегда возникает *условие фигур* – сумма углов должна равняться  $180^\circ$ . Все измерения сопровождаются неизбежными погрешностями. Поэтому это условие нарушается. Появляется *невязка*. По невязкам можно оценивать точность измерений и исправлять измерения. Поправки вычисляют в ходе обработки измерений по методу наименьших квадратов. После исправления измерений невязки обнуляются.

Ещё более жёсткой фигурой является центральная система. Они возникают в сплошных сетях триангуляции. В центральной системе кроме условий фигур возникает *условие горизонта* – сумма измеренных углов у вершины центральной системы должна составлять  $360^\circ$ .

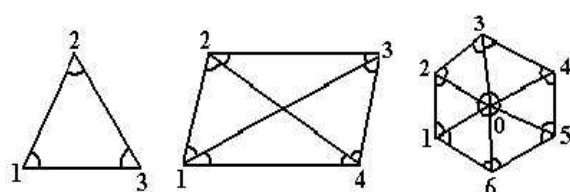


Рис. 8.1. Основные геометрические фигуры триангуляции: треугольник, геодезический четырёхугольник, центральная система

Появляется ещё одно условие – *полюсное*. Его суть в следующем: одну из сторон, например 01, можно приравнять единице и по измеренным углам и теореме синусов вычислить следующую сторону – 02. Подобным образом будут вычислены стороны 03, 04, 05, 06 и вновь 01. Полюсное условие можно представить в виде тождества:

$$\frac{01}{02} \frac{02}{03} \frac{03}{04} \frac{04}{05} \frac{05}{06} \frac{06}{01} - 1 = 0.$$

Вычисленная после обхода вокруг полюса центральной системы сторона 01 из-за ошибок в измерениях будет отличаться от единицы. Возникнет невязка. В целом в центральной системе рис. 8.1 будет 8 невязок. Жёсткий контроль! Придется исправлять измерения так, чтобы устранить все невязки. В геодезическом четырёхугольнике возникают три условия фигур и одно полюсное условие; всего четыре невязки.

Если цепочка треугольников вставлена между сторонами известной длины, с известными азимутами и пунктами с заданными координатами, то возникают *условия сторон* (базисное), *азимутов* (дирекционных углов) и *координат*.

- **Радиогеодезическая трилатерация.** Трилатерация – метод построения на местности треугольников, четырёхугольников или других геометрических замкнутых фигур, в которых измеряются длины всех сторон. В середине XX в. разработан метод измерений длинных, в сотни километров, линий при помощи радиогеодезических систем. Получила распространение импульсная система ШОРАН (Short Range Aerial Navigation) и её усовершенствованный вариант Хайран (High Precision Shoran)<sup>3</sup>. Длинные линии, до 500-800 км, измерялись методом пересечений

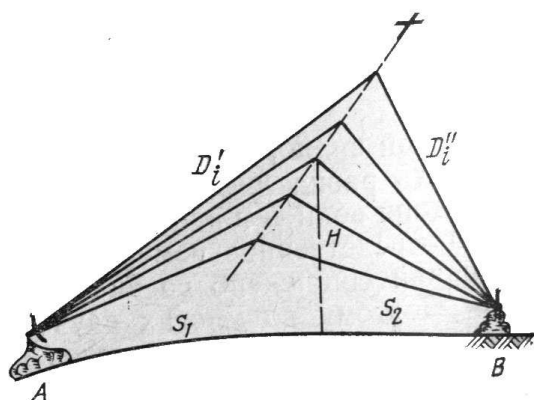


Рис. 8.2. Измерение длин линий методом пересечений их створа [19]

треугольников, четырёхугольников или других геометрических замкнутых фигур, в которых измеряются длины всех сторон. В середине XX в. разработан метод измерений длинных, в сотни километров, линий при помощи радиогеодезических систем. Получила распространение импульсная система ШОРАН (Short Range Aerial Navigation) и её усовершенствованный вариант Хайран (High Precision Shoran)<sup>3</sup>. Длинные линии, до 500-800 км, измерялись методом пересечений

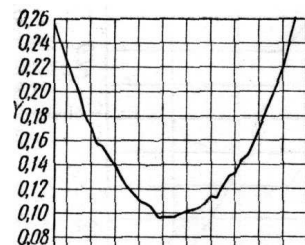


Рис. 8.3. Парабола [8]

<sup>3</sup> THE SOUTHWEST PACIFIC SURVEY. URL: <http://www.xnatmap.org/adnm/ops/proj/hiran.htm>  
(Дата посещения 6.08.2014.)

створа (рис. 8.2). Самолет пересекал створ линии, при этом непрерывно измерялись наклонные дальности  $D'$  и  $D''$  от самолёта до радиостанций на концах линии. Измеренные суммы линий, отложенные на графике, представляли ломанную, напоминавшую параболу (рис. 8.3):

$$y = ax^2 + bx + c, \quad y = D' + D''.$$

Минимум параболы соответствовал сумме дальностей в створе.

$$\frac{dy}{dx} = 2ax + b = 0, \quad x_{\min} = -\frac{b}{2a}.$$

Подставив  $x_{\min}$  в уравнение параболы, получим сумму наклонных дальностей в створе линии:

$$y_{\min} = -\frac{b^2}{4a} + c.$$

Заметим, что физически эта сумма, вполне вероятно, и не измерялась. Используя измеренные суммы дальностей, методом наименьших квадратов вычисляли коэффициенты параболы  $a$ ,  $b$ ,  $c$ . Введением поправок наклонные расстояния в створе линии приводились к значениям  $S_1$  и  $S_2$  геодезической линии на уровне моря (рис. 8.2) [8].

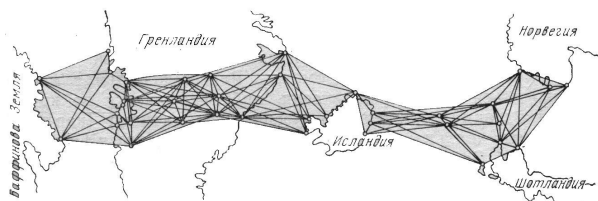


Рис. 8.4. Схема трилатерации, связывающей триангуляции Северной Америки и Европы [19]

В 1946 г. проложена трилатерация, соединившая Флориду с Багамскими островами и Кубой. Измерено 50 линий. В 1950 г. во Флориде измерено 25 линий длиной до 512 км. С 1949 по 1957 гг. проведены работы по развитию трилатерации в Канаде. На площади 6,4 млн. км<sup>2</sup> установлены 143 станции с 502 сторонами между ними. Сеть служила основой для топографических карт масштабов 1:25 000 и 1:50 000.

В 1951-59 гг. при помощи этих систем выполнены работы по развитию трилатерации во многих частях мира. Например, установлена связь между триангуляциями Норвегии и Шотландии, между островом Крит и Северной Африкой. Установлена геодезическая связь между Европой и Северной Америкой через Норвегию, Шотландию, Фарерские острова, Исландию и Гренландию, наибольшая измеренная сторона равнялась 884 км (рис. 8.4). Проложены сети трилатерации в Центральной и Южной Америке, на востоке Азии, в Австралии и других местах. В СССР трилатерация строилась посредством радиогеодезической системы РЫМ.

Следует заметить, что трилатерация по жёсткости уступает триангуляции. Так, в треугольнике с измеренными сторонами нет избыточных измерений. Следовательно, нет условий и нет невязок. В геодезическом четырёхугольнике, как и в центральной системе, с измеренными сторонами возникает лишь одно условие. Поэтому метод трилатерации в последствии, даже с появлением высокоточных дальномеров, широкого развития не получил.

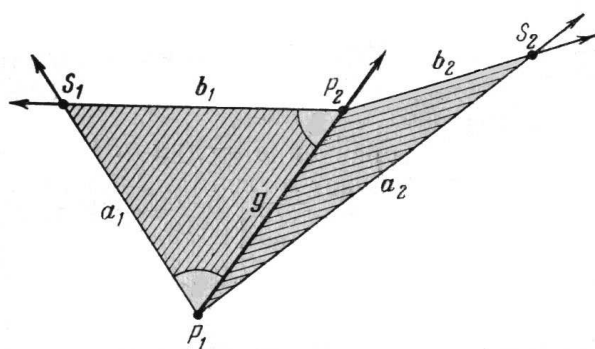


Рис. 8.5. Спутниковая триангуляция [2]

• **Спутниковая триангуляция.** Метод основан на наблюдениях пассивных спутников типа *Пагеос*, *Лагеос*, *Эталон* путём фотографирования их на фоне звездного неба<sup>4</sup>. В

<sup>4</sup> The PAGEOS project at Palmer Station. (Дата посещения 6.08.2014.)/ URL: <http://www.palmerstation.com/history/6575/pageos.html>

его основу лёг метод звёздной триангуляции, разработанный финским астрономом, оптиком и геодезистом Ёрьё Вьяйсяля (1891-1971). Звёздная триангуляция была основана на наблюдениях на фоне звёзд световых вспышек ракет, поднимаемых воздушными шарами на высоты в 20 км. В спутниковой триангуляции на фоне звёзд фотографировали спутники [5].

На снимке измерялись плоские прямоугольные координаты изображений звёзд и спутника. Для звёзд выбирались из звёздного каталога их экваториальные координаты  $\alpha$  и  $\delta$ . Эти координаты, учитывая движение полюсов Земли, прецессию и нутацию, приводились к моменту наблюдений и исправлялись поправками за рефракцию и годичную абберацию. Далее устанавливалось соответствие между экваториальными координатами звёзд и измеренными плоскими координатами их изображений на снимке. После этого по плоским прямоугольным координатам изображений спутника вычислялись его экваториальные координаты - прямое восхождение  $\alpha$  и склонение  $\delta$ . Вместо угла  $\alpha$ , отсчитываемого от направления на точку весеннего равноденствия, использовался угол  $\gamma$ , считающийся от плоскости меридиана Гринвича. Если  $S$  и  $t$  соответственно гринвичские звёздное время и часовой угол, то угол  $\gamma$  равен:

$$\gamma = \alpha - S = \alpha - (\alpha + t) = -t.$$

Направление с пункта наблюдений на спутник определяет единичный вектор  $a$  ( $b$ ) и направляющие косинусы  $l$ ,  $m$ ,  $n$ :

$$a = \begin{pmatrix} l \\ m \\ n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \delta \cos \gamma \\ \cos \delta \sin \gamma \\ \sin \delta \end{pmatrix}.$$

Для каждого снимка, с ошибкой 1-1,5", вычислялось направление, соответствующее заранее принятому моменту. Спутники фотографировали синхронно с нескольких наземных станций, например,  $P_1$ , и  $P_2$  (рис. 8.5), и находили единичные векторы  $a_1$  и  $b_1$  направляющий  $P_1S_1$  и  $P_2S_1$  на спутник  $S_1$ :

$$a_1 = \frac{\overrightarrow{P_1S_1}}{|\overrightarrow{P_1S_1}|}, \quad b_1 = \frac{\overrightarrow{P_2S_1}}{|\overrightarrow{P_2S_1}|}.$$

Подобным образом определялись единичные векторы  $a_2$  и  $b_2$  направлений на спутник  $S_2$ . Эти векторы задают плоскости  $P_1S_1P_2$  и  $P_1S_2P_2$  и перпендикулярные к ним единичные векторы, определяемые векторными произведениями:

$$n_1 = \frac{a_1 \times b_1}{|a_1 \times b_1|}, \quad n_2 = \frac{a_2 \times b_2}{|a_2 \times b_2|}.$$

Искомый единичный вектор направления  $P_1P_2$  определялся векторным произведением

$$g = \frac{n_1 \times n_2}{|n_1 \times n_2|}.$$

Вектор  $g$  образован в результате пересечения двух плоскостей  $P_1S_1P_2$  и  $P_1S_2P_2$ . Разумеется, наблюдали не два спутника. Из множества наблюдений находили по методу наименьших квадратов наиболее точный результат пересечения всех плоскостей.

Продолжая построения, получали сеть *спутниковой триангуляции* - сеть треугольников с известными направлениями их сторон и вершинами, закреплёнными на земле (рис. 8.6).

Если в сети заданы координатами два пункта или измерено несколько сторон (космических базисов), то можно вычислить пространственные координаты всех пунктов.

Сеть уравнивали по методу наименьших квадратов, исправляя измеренные величины так, чтобы соблюдались геометрические условия сети. Отметим основные геометрические условия, возникающие в сети спутниковой триангуляции.

*Условие компланарности трёх векторов.* Например, положения сторон каждого пространственного треугольника определяют три вектора -  $g_1, g_2, g_3$ . Каждый из этих векторов найден независимо. Однако все они должны лежать в плоскости треугольника. Поэтому должно быть поставлено условие компланарности - равенства нулю смешанного произведения этих векторов в каждом треугольнике

$$g_1 g_2 g_3 = 0.$$

*Условие пучка плоскостей.* Вектор  $g$  направления  $P_1P_2$  определяется пересечением плоскостей, проходящих через пункты  $P_1$  и  $P_2$ . Предположим, имеются три пересекающиеся плоскости, заданные перпендикулярными к ним единичными векторами  $n_1, n_2, n_3$ . Чтобы все плоскости пересекались по одной линии, смешанное произведение этих векторов должно равняться нулю:

$$n_1 n_2 n_3 = 0.$$

*Условие общей вершины пересечения плоскостей.* Три плоскости всегда пересекаются в одной точке. Однако, чтобы четыре плоскости пересекались в одной точке, надо ставить соответствующее условие. Если каждая из четырёх плоскостей задана уравнениями вида

$$Ax + By + Cz + D = 0,$$

то определитель четвертого ряда, составленный из коэффициентов уравнений, равен нулю.

*Полюсное условие.* Это условие возникает, если возможно выделить цепь треугольников, начинающуюся и заканчивающуюся одной и той же стороной.

Как и в классической триангуляции, дополнительные исходные стороны или пункты приводят к появлению *условий сторон* и *условий координат*.

В 60-х годах прошлого столетия в СССР и других странах были созданы сети спутниковой триангуляции<sup>5</sup>. В период 1969-73 гг. построена *Глобальная сеть спутниковой триангуляции* из 45 пунктов и 174 сторон длиной 3000–5000 км.<sup>6</sup> Для определения линейного масштаба в сети измерено 7 космических базисов. Два из них, длиной 2458 км и 1195 км, проложены в Европе.

- **Доплеровские системы**<sup>7</sup>. В США в 1958 г. начаты разработки системы *TRANSIT*. К 1964 г. выведены на космические орбиты спутники. Высоты практически круговых орбит составляли около 1100 км. В измерениях использовался доплеровский сдвиг частоты, возникающий в результате движения спутника по орбите. Координаты 30 пунктов упомянутой Глобальной сети спутниковой триангуляции были определены с *TRANSIT*. Средняя квадратическая погрешность координат из сопоставления двух методов составила 4,4 м. В 1984–

<sup>5</sup> The worldwide satellite triangulation camera station network. URL:

<http://www.photolib.noaa.gov/htmls/geod0003.htm>

(Дата обращения 6. 08. 2014)

<sup>6</sup> WORLDWIDE GEOMETRIC SATELLITE TRIANGULATION NETWORK, BC-4 CAMERAS.GIF. URL:

[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/60/WORLDWIDE\\_GEOMETRIC\\_SATELLITE\\_TRIANGULATION\\_NETWORK%2C\\_BC-4\\_CAMERAS.GIF](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/60/WORLDWIDE_GEOMETRIC_SATELLITE_TRIANGULATION_NETWORK%2C_BC-4_CAMERAS.GIF) (Дата обращения 6. 08. 2014).

<sup>7</sup> Конспект лекций по курсу «космическая геодезия и геодинамика». URL: (Дата обращения 07.08.2014)

<http://kk.docdat.com/docs/index-376832.html?page=7>

93 гг. системой *TRANSIT* построена на территории СССР *Доплеровская геодезическая сеть* – ДГС. Впоследствии ДГС совместной обработкой с другими сетями была включена в Государственную геодезическую сеть России ГГС. В 1996 г. *TRANSIT* после успешной 32-летней работы прекратила существование.

Доплеровский сдвиг частоты возникает в результате движения спутника по орбите. Когда спутник движется навстречу неподвижному приемнику, частота принимаемых электромагнитных колебаний увеличивается, а длина волны становится короче. При удалении спутника картина обратная - частота уменьшается, а волны удлинняются. Если скорость взаимного перемещения приемника и передатчика значительно меньше скорости света, то доплеровский сдвиг частоты  $f_d$  (доплеровская частота) равен:

$$f_d = -f \frac{\rho'}{c} = -\frac{\rho'}{\lambda},$$

где  $f$  - излучаемая на спутнике частота,  $c$  - скорость радиоволн в среде распространения,  $\lambda$  - длина излучаемой волны в этой среде,  $\rho'$  - радиальная скорость спутника, равная скорости изменения расстояния  $\rho$  от наземной станции до спутника.

Методы определений местоположения, основанные на измерении доплеровской частоты, подразделяются на траверзный, дифференциальный и интегральный [9, с. 154-159].

*Траверзный метод* реализуется путем определения момента  $t_0$  прохождения доплеровской частоты через нуль (смены её знака). В этот момент радиальная скорость  $\rho' = 0$ . Спутник и приёмник находятся на кратчайшем друг от друга расстоянии  $\rho_0$ . Они расположены в плоскости, содержащей расстояние  $\rho_0$ , и нормальной к вектору скорости спутника. Эта плоскость, пересекая земную сферу, на которой находится приёмник, образует на ней дугу большого круга (ортодромию). Дугу большого круга пересекает сфера радиуса  $\rho_0$  с центром на спутнике. Иначе, приёмник находится в одной из точек пересечения этих двух сфер и упомянутой плоскости.

Траверзный метод единственный из доплеровских методов, которым можно измерить дистанцию между спутником и наземным приёмником. Алгоритм определения кратчайшего расстояния  $\rho_0$  и скорости движения спутника в этот момент по орбите  $v_0$  изложим по учебному пособию [17, с. 97-99].

Спутник движется по орбите со скоростью  $v_0$ . За небольшой интервал времени  $(t-t_0)$  спутник перемещается по орбите на отрезок  $v_0(t-t_0)$ . Расстояние от спутника до наземного приёмника будет равно  $\rho$ :

$$\rho = \sqrt{\rho_0^2 + v_0^2(t-t_0)^2}.$$

Дифференцируя расстояние  $\rho$  по времени  $t$ , получаем:

$$\rho \rho' = v_0^2(t-t_0).$$

Или:

$$\frac{(t-t_0)}{\rho'} = \frac{\rho}{v_0^2}.$$

Возводя левую и правую сторону этого уравнения в квадрат и подставляя значения для расстояния и его производной по времени с учётом эффекта Доплера, получаем:

$$\frac{(t-t_0)^2}{f_d^2} = \lambda^2 \left( \frac{\rho_0^2}{v_0^4} + \frac{(t-t_0)^2}{v_0^2} \right).$$

Введём обозначения:

$$y = \frac{(t - t_0)^2}{f_d^2}, \quad x = (t - t_0)^2, \quad a = \frac{\lambda^2}{v_0^2}, \quad b = \lambda^2 \frac{\rho_0^2}{v_0^4}.$$

Получим уравнение прямой линии:

$$y = ax + b.$$

Интервал времени и доплеровская частота – измеряемые величины. Получив серию пар значений  $x$  и  $y$  и выполнив обработку по методу наименьших квадратов, определим параметры  $a$  и  $b$ , а по ним – значения  $\rho_0$  и  $v_0$ .

Несколько иной подход к определению  $\rho_0$  изложен в книге [9, с. 156].

*Дифференциальный метод* основан на суммировании циклов доплеровской частоты с момента  $t_1$  до момента  $t_2$ :

$$N = \int_{t_1}^{t_2} \frac{\rho'}{\lambda} dt.$$

В реальных измерениях учитывалось, что частота принимаемого сигнала сравнивается не с частотой излучения, а с эталонной частотой, генерируемой в приемнике. В дифференциальном режиме интегрирование ведется в течение 1–5 секунд. На основании теоремы о среднем значении интеграла получаем:

$$N = \rho'_m \frac{t_2 - t_1}{\lambda}.$$

Определяемой величиной становится  $\rho'_m$  – средняя в данном интервале времени радиальная скорость спутника. Она постоянна на поверхности конуса с вершиной в передатчике. На этой поверхности расположен приемник. Такую поверхность называют *поверхностью положения*. Одновременно приемник окажется на соответствующих конических поверхностях, построенных с других спутников. Пересекаясь, эти поверхности определяют положение приемника в пространстве.

*Интегральный метод.* В этом случае интервал интегрирования циклов доплеровской частоты больше – до нескольких минут. Получают:

$$N = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\lambda}.$$

Определяемым параметром становится разность  $(\rho_2 - \rho_1)$ , показывающая, как изменилось расстояние от приёмника до спутника с момента  $t_1$  до момента  $t_2$ . Измеренная разность расстояний остается постоянной на поверхности двуполостного гиперboloида вращения. Его фокусы соответствуют двум положениям спутника на орбите. На одном из этих гиперboloидов расположен приемник. Измеренные разности расстояний по нескольким спутникам образуют серию поверхностей положения. Пересекаясь, они определяют координаты приемника. В данном случае имеет место гиперболическая, иначе разностно-линейная (разностно-дальномерная) засечка.

Поверхности положения наглядно геометрически показывают, как образуется та или иная засечка. При построениях геодезической сети все измеряемые величины описываются аналитически. Так, разность расстояний представляется уравнением, содержащим известные координаты спутников и определяемые координаты наземного приёмника. При этом используется большое количество измерений. Продолжительность радиовидимости спутника, при его высоте 1100 км, составляет 15-16 мин. При двухминутной продолжительности сеанса измерений будет реализовано около 8 сеансов. Измерения могут быть повторены многократно в разные эпохи. Полученный массив данных обрабатывается по методу наименьших квадратов.



• **Использование геодезических спутниковых комплексов ГЕОИК.** Эти комплексы созданы в СССР и продолжают развиваться в России. Они оснащены отражателями для световой лазерной локации с Земли, а также радиотехническими средствами для определения дальностей, скорости и высоты спутника. Имеется также система импульсной световой сигнализации для фотографирования спутника на фоне звездного неба.

При таком обилии измерительных средств появляется возможность использовать фундаментальное уравнение взаимосвязи положений космического объекта и наземного пункта:

$$\mathbf{R} + \mathbf{r} - \mathbf{\rho} = \mathbf{0},$$

где  $\mathbf{R}$  — геоцентрический вектор пункта наблюдений на Земле,  $\mathbf{r}$  — топоцентрический вектор, определяющий расстояние и направление в пространстве линии "наземный пункт - спутник",  $\mathbf{\rho}$  — геоцентрический вектор космического объекта (спутника). По заданному вектору  $\mathbf{\rho}$  и измеренному вектору  $\mathbf{r}$  можно найти вектор  $\mathbf{R}$ .

Предположим, что определены топоцентрические вектора  $\mathbf{r}_A$  и  $\mathbf{r}_B$  с двух наземных станций  $A$  и  $B$ :

$$\mathbf{R}_A + \mathbf{r}_A - \mathbf{\rho} = \mathbf{0},$$

$$\mathbf{R}_B + \mathbf{r}_B - \mathbf{\rho} = \mathbf{0}.$$

Для вектора  $\mathbf{D}$ , соединяющего эти наземные станции, можно записать:

$$\mathbf{D} = \mathbf{R}_B - \mathbf{R}_A = \mathbf{r}_A - \mathbf{r}_B,$$

$$\mathbf{R}_B = \mathbf{R}_A + \mathbf{D}.$$

Пространственный вектор  $\mathbf{D}$  иногда называют *хордовым*. Нетрудно представить себе сеть на земной поверхности из хордовых векторов, привязанную к некоторому начальному пункту.

Программа ГЕОИК начата в 1985 г. По результатам наблюдений спутников ГЕОИК-1, ЭТАЛОН, создана *Космическая геодезическая сеть* - КГС. Первоначально КГС включала 26 пунктов на территории бывшего СССР и 7 пунктов в Антарктиде. Погрешность взаимного положения пунктов при расстояниях между ними до 10 000 км не более 30 см. Пункты КГС, как и ДГС, совмещены с пунктами АГС с целью совместной обработки и построения Государственной геодезической сети – ГГС систем координат СК-95 и ПЗ-90.02.

По результатам эксплуатации ГЕОИК-2 получена координатная система ПЗ-90.11. Введённые Постановлением Правительства РФ от 28 декабря 2012 года №1463 новые координатные системы ПЗ-90.11 и ГСК-2011 и их опорные геодезические сети теоретически ничем не уступают международным и передовым зарубежным геоцентрическим системам и сетям [6].

• **Использование ГНСС.** При их помощи строят высокоточные спутниковые сети. Развиваемые в Российской Федерации ГГС образуют три уровня. Первый уровень – *Фундаментальные астрономо-геодезические сети* ФАГС с расстояниями между пунктами 600–800 км; второй уровень – пункты *Высокоточной геодезической сети* ВГС при средних расстояниях между ними 150–300 км; третий уровень – пункты *Спутниковой геодезической сети I класса* СГС-1 с расстояниями между пунктами 25–35 км. Величины погрешностей взаимного положения пунктов оцениваются первыми сантиметрами.

При работе с ГНСС используют относительные измерения. Пусть при помощи приёмников станций  $A$  и  $B$  измерены до  $i$ -го спутника дальности  $r_{Ai}$  и  $r_{Bi}$ ; результаты измерений равны соответственно  $P_{Ai}$  и  $P_{Bi}$  (рис. 8.7,  $i = 1, 2$ ). Измерения искажены погрешностями  $d_i$  в аппаратуре спутника,  $D_{Ai}$  и  $D_{Bi}$  в аппаратуре на станциях  $A$  и  $B$ , и погрешностями внешней среды  $e_{Ai}$  и  $e_{Bi}$ .



Чтобы ослабить влияния погрешностей формируют разности результатов  $\Delta P_i$  из разности  $\Delta r_i$  измерений на один и тот же спутник  $S_i$ :

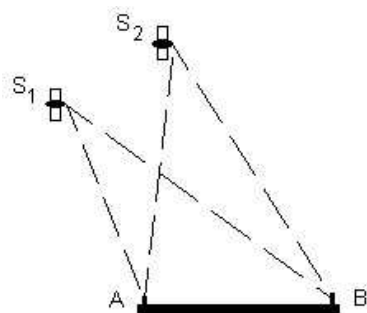


Рис. 8.7. Относительные измерения по спутникам ГНСС

$$\Delta P_i = P_{Ai} - P_{Bi} = \Delta r_i + \Delta D_i + e_i$$

Это так называемые *первые* или *простые* разности. Они не содержат искажений  $d_i$  в аппаратуре спутника. В значительной степени ослаблено влияние внешней среды. Член  $e_i$  содержит лишь остаточные погрешности малой величины. Однако сохранились искажения  $\Delta D_i$ , обусловленные аппаратурой приемника.

В ходе дальнейшей обработки из первых разностей, отнесенных, например, к спутникам  $S_1$  и  $S_2$ , формируют *вторые* или *сдвоенные* разности:

$$\Delta P_{12} = \Delta P_1 - \Delta P_2 = \Delta r_1 - \Delta r_2 + e_{12}.$$

Вторые разности свободны как от искажений на спутнике, так и от искажений на наземных станциях. В большой степени скомпенсированы влияния всех остальных источников. Остаточные погрешности  $e_{12}$  являются малыми, случайными и практически будут отфильтрованы обработкой по методу наименьших квадратов. В относительных ГНСС измерениях вторые разности — основной полевой материал для построения геодезических сетей.

Естественно, наблюдают не два спутника, а все видимые в данную эпоху на допустимых высотах над горизонтом. Разность  $(r_{Ai} - r_{Bi})$  зависит от составляющих вектора  $D$ , соединяющего наземные станции и используются для нахождения координат этих станций.

Относительным измерениям появилась замена в виде нового способа *прецизионного позиционирования пунктов PPP (Precise Point Positioning)*. Измерения выполняются не двумя, а одним приемником. Величины ошибок позиционирования при работе с одночастотными приемниками определяются дециметрами, а при использовании двухчастотных приемников — сантиметрами. Во втором случае точность повышается благодаря исправлению спутниковой шкалы времени и исключению задержек радиосигналов в ионосфере. Трудности применения *PPP* обусловлены тем, что фазовые измерения надо корректировать и разрешать их неоднозначность. Координаты пунктов определяют засечкой сочетанием фазовых и кодовых дальностей, измеренных двухчастотным приемником. Используются точные значения эфемерид и поправок к часам спутников, предоставляемых разными службами, в первую очередь службой *IGS*.

- **Радиоинтерферометрия со сверхдлинной базой - РСДБ (VLBI - Very Long Baseline Interferometry).** Это одно из основных средств и методов исследования космического пространства и построения глобальных небесных и наземных геодезических сетей. Системой отслеживаются излучения точечных внегалактических радиоисточников. Их угловые диаметры менее  $0,001''$ , а собственные движения не обнаруживаемы. По своей природе радиоизлучения этих объектов представляют собой случайный широкополосный шум. Аппаратура состоит из пары направленных антенн, разнесенных на сотни или тысячи километров и отслеживающих один и тот же внегалактический источник шумового радиоизлучения. Линию между антеннами называют базой. Шумовые сигналы, а также метки времени, генерируемые при помощи высокостабильных атомных стандартов частоты-времени, записываются на магнитные ленты, диски или другие носители. Записи отправляются в специальные устройства — *корреляторы*. Интервал сдвига сравниваемых сигналов до наступления максимума их взаимной корреляции определяет разность моментов прихода фронта радиоволны на две на-

земные антенны. При этом учитываются перемещения базы относительно радиоисточника вследствие суточного вращения Земли и её движения по орбите. Разность времени пропорциональна разности расстояний от радиоисточника до этих станций на Земле. В свою очередь, разность расстояний зависит от разности координат станций наблюдений - вектора базы. Длина и направления вектора определяются с погрешностями  $\sim 1\text{--}2$  см и  $0,0001''$  соответственно<sup>8</sup>.

**Виды геодезических сетей.** Геодезические сети часто называют *опорными*, ибо их пункты служат опорой для последующих исследований, измерений и съемок. Для решения поставленных задач сети должны быть 1) *сплошными*, иметь необходимую 2) *густоту* и 3) *точность*<sup>9</sup>.

Сеть, создаваемую с помощью искусственных спутников Земли или по наблюдениям других космических объектов, называют *космической геодезической сетью* — КГС. Если на части пунктов наземной сети определены астрономические широты, долготы и азимуты, ее называют *астрономо-геодезической сетью* - АГС. Сети более высокого порядка точности заполняют так называемыми *сетями сгущения*. Если они предназначены для производства топографических съемок, их именуют *съёмочными* сетями.

Отметим следующие геодезические сети:

- **Пространственные** сети, создаваемые методами космической геодезии. Каждый пункт хранит три координаты, определяющие его положение в геоцентрической системе координат, и может быть закреплен как на земной поверхности, так и на космическом объекте.

- **Плановые** сети. Каждый пункт плановой сети хранит отнесенные к эллипсоиду геодезические широты и долготы и (или) плоские прямоугольные координаты.

Эти сети создают способами:

- 1) *триангуляции*, когда сеть образована из треугольников и геодезических четырехугольников, в которых измеряются все углы и длины некоторых сторон;

- 2) *полигонометрии*, состоящей из ходов, все стороны и углы поворота которых измерены;

- 3) *трилатерации*, когда определены только длины сторон геометрических фигур;

- 4) *линейно-угловыми* измерениями;

- 5) *векторными* построениями на основе спутниковых измерений.

Пункты плановых сетей, если возможно, совмещают с пунктами нивелирной сети. В ином случае их высоты, определяют точным тригонометрическим нивелированием.

- **Нивелирные** (высотные) сети, построенные, как правило, методами точного и высокоточного геометрического нивелирования, при этом каждый нивелирный пункт хранит высоту.

- **Гравиметрические** сети, на пунктах которых определены ускорения силы тяжести. Нивелирные сети совместно с гравиметрическими сетями решают вопрос о введении определенной системы счета высот.

Геодезические сети различают по назначению, территориальному охвату, точности и густоте построения. Они бывают глобальными (общеземными), региональными (охватывают территории нескольких государств), государственными (национальными), местными.

- **Глобальные** сети. Пункты этих сетей отстоят друг от друга на сотни и тысячи километров. Их координаты определены в геоцентрической системе. Обычно пункты мировой

<sup>8</sup> URL: [http://www.see.leeds.ac.uk/structure/dynamicearth/plates\\_move/active\\_tectonics/vlbi.htm](http://www.see.leeds.ac.uk/structure/dynamicearth/plates_move/active_tectonics/vlbi.htm) (Дата обращения 07.08.2014)

<sup>9</sup> Геодезические сети и их назначение. URL: <http://geodetics.ru/geodezseti.html> (Дата обращения 07.08.2014)

сети совмещены с астрономическими обсерваториями или наземными станциями спутниковых систем. Они служат для решения научных и практических задач глобального характера, например, для изучения геодинамических процессов, для запуска космических аппаратов и слежения за их полетом, для выполнения геодезических наблюдений с использованием ИСЗ, Луны и других космических объектов. Такие сети строят с наивысшей точностью. Примером глобальной является сеть Международной земной системы отсчета *ITRF*. Со временем геоцентрические координаты пунктов опорных сетей вследствие непрерывного их совершенствования и геодинамических процессов изменяются. Скорость их изменения может достигать до 1-2 см в год. Поэтому каталоги координат обновляют и указывают их эпоху, например, *ITRF-2008*.

- **Региональные сети.** Известны сети Северной Америки, Европы, Австралии, Антарктиды. В 1987 г. Международной ассоциацией геодезии создана подкомиссия для установления европейской системы параметров *ETRS (European Terrestrial Reference System)*. Системе *ETRS* принадлежат опорные сети *ETRF (European Terrestrial Reference Frame)*, объединяющие в единую систему геодезические сети стран Европы.

- **Государственные (национальные) сети.** Они включают плановые, нивелирные и гравиметрические сети данной страны. При использовании комплекса выполняемых в них астрономо-геодезических и гравиметрических измерений однозначно определяются плановые координаты и высоты пунктов в единой для страны системе. Их используют при картографировании и решении научных и практических задач в пределах данного государства. По точности эти сети делят на классы или разряды. Так, первоначально в России плановые и нивелирные сети подразделялись на четыре класса точности. Наиболее точными были сети 1 класса. Расстояния между пунктами уменьшались от нескольких десятков километров в 1 классе до нескольких километров в 4 классе. Плановые и нивелирные сети СССР и России – уникальные и громадные построения; их геометрические схемы, методика измерений, способы закрепления на местности, история развития заслуживают внимательного изучения [10-12 и др.].

- **Местные сети.** Дальнейшее сгущение государственных сетей в разных странах выполняют по-разному. В России местные нивелирные и плановые сети строят на основе государственных сетей в целях картографирования, решения инженерных и других задач некоторого района или города. Они являются исходными для построения съемочных сетей.

**Закрепление пунктов.** Опорная геодезическая сеть способна выполнять поставленные перед ней задачи только в том случае, если её пункты надежно закреплены на местности и легко могут быть найдены. Каждый пункт на местности закрепляется специальным подземным знаком - центром. Устойчивость центров зависит от многих факторов, важнейшими среди которых являются сезонные замерзания и оттаивания грунта. По мере промерзания грунта силы морозного пучения преодолевают вес подземного знака и силы трения его боковых стенок о грунт, и грунт, вспучиваясь, увлекает за собой центр кверху. Весной при оттаивании грунта талые воды заносят под основание центра некоторое количество частиц грунта, и центр не может опуститься на прежнее место. В последующие годы процесс повторяется, и через несколько лет подземный знак может оказаться выброшенным на дневную поверхность. На рис. 8.8 показан грунтовый знак с якорем внизу, в верхней части неудачно закреплен бетонным блоком; за 14 лет он приподнялся на 110 см (склон долины в 14 км от Москвы) [18].

Принимается ряд мер для стабилизации центров:

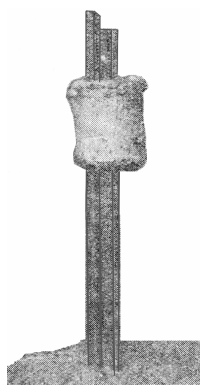


Рис. 8.8 Неудачный грунтовый знак

- знаки закладывают в грунты, мало подверженные морозному пучению (в скальный грунт, сухой или слабо увлажненный песчаный грунт, а в условиях значительного увлажнения - в крупнозернистые грунты);
- подземные знаки делают облегченными в верхней части с уменьшенной поверхностью соприкосновения знака с грунтом, а в нижней части устанавливается достаточно мощный якорь;
- нижнее основание подземного знака устанавливается в наименее активной зоне грунта - в районах сезонного промерзания на 0,5 м ниже границы наибольшего промерзания грунта, в зоне многолетней мерзлоты - на 1 м ниже границы наибольшего оттаивания,
- на территориях подвижных песков - на глубине 4 – 6 м.

По типу применяемых центров на территории страны выделены зоны сезонного промерзания грунтов, многолетней мерзлоты, подвижных песков, скальных горных пород и заболоченных грунтов. Для определения глубины закладки центров и реперов составлены карты районирования территории, на которых классифицированы регионы по глубинам протаивания или промерзания грунтов.

**Этапы создания геодезической сети.** Технологический процесс создания геодезической сети включает: 1) постановку задания; 2) сбор и изучение имеющихся геодезических и картографических материалов; 3) составление проекта, когда на топографических картах намечают схему сети, места расположения геодезических пунктов, выполняют расчет точности сети, готовят смету работ и составляют научно-технический отчет по строительству сети; 4) рекогносцировку, в процессе которой проект уточняют на местности; 5) закладку в местах размещения геодезических пунктов подземных знаков, а также, если необходимо, постоянных или временных наружных знаков для производства измерений; 6) выполнение измерений; 7) уравнивание, под которым понимается обработка результатов измерений по способу наименьших квадратов с целью получения наиболее достоверных значений координат, высот, длин линий, азимутов, значений ускорений силы тяжести, других величин, и оценка их точности; 8) составление каталога координат пунктов и сдачу работы заказчику<sup>10</sup>.

Выше отмечены общие для любых сетей этапы построения. Содержание каждого этапа весьма существенно зависит от назначения геодезической сети и размеров охватываемой территории. Так, например, технологии создания геодезической сети традиционными и спутниковыми методами имеют принципиальные различия.

**Геодезическая отсчетная основа Российской Федерации.** В бывшем СССР картографо-геодезические работы опирались на координатную систему отсчета 1942 г. СК-42. Система отсчета СК-42 была введена Постановлением Совета Министров СССР от 7 апреля 1946 г.

Эта система отсчета до 1 июля 2002 г. применялась и в Российской Федерации.

СК-42 была закреплена пунктами плановой государственной геодезической сети и реперами государственной нивелирной сети. Развитие плановых государственных сетей началось в начале 20-х годов и продолжалось свыше полувека<sup>11</sup>. В основу проекта их построения положены замыслы выдающегося геодезиста Ф.Н. Красовского (1878–1948)<sup>12</sup>. Плановые госу-

<sup>10</sup>Основной принцип построения государственной геодезической сети. URL: <http://geodetics.ru/principseti.html> (Дата обращения 07.08.2014).

<sup>11</sup>Опорные геодезические сети в дореволюционной России. URL: <http://geodetics.ru/setiold.html> (Дата обращения 07.08.2014).

<sup>12</sup>Схема и программа Ф.Н. Красовского построения государственной триангуляции. (Дата обращения 07.08.2014). URL: <http://geodetics.ru/sxemakrasovskij.html>

дарственные сети разделены на четыре класса точности и строились по принципу "от общего к частному".

Сеть I-го класса состояла, в основном, из звеньев, образующих четырехугольные полигоны (рис. 8.9). Звенья преимущественно ориентированы по меридианам и параллелям и представляли собой или ряд триангуляции – цепь треугольников, или ход полигонометрии. В

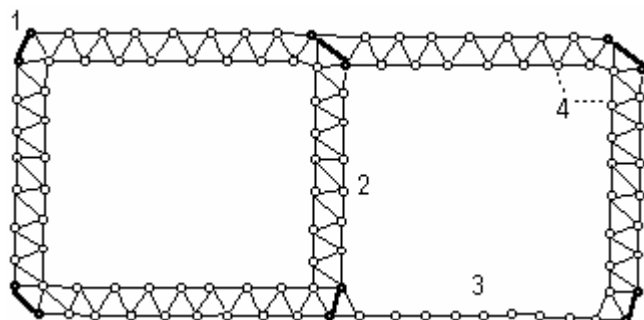


Рис. 8.9. Полигоны АГС первого класса: 1 — базисные стороны и астропункты, 2 — ряд триангуляции, 3 — ход полигонометрии, 4 — пункты геодезической сети первого класса

среднем длина звена около 200 км, а периметр полигона – 800 км. В вершинах полигонов, на стыке звеньев измерены длины базисных сторон треугольников. На концах каждой базисной стороны определены астрономические широты, долготы, азимуты и по этим данным вычислены геодезические азимуты Лапласа. Через 70–100 км располагались пункты с измеренными астрономическими широтами и долготами. В звеньях расстояния между смежными пунктами не менее 20 км. На северо-востоке страны вместо полигональной сети была развита сплошная сеть триангуляции с расстояния-

ми между пунктами около 70 км. В 70-х годах прошлого столетия построения сети I класса практически были завершены.

По проекту средняя квадратическая погрешность (СКП) измерения углов равнялась 0,7" — фактически составила 0,6". В построенных сетях линии длиной 20 - 30 км измерены с погрешностью 7 - 10 см; точность определения широт — 0,3", долгот — 0,5", азимутов — 1,15". Длина отдельного 200-километрового звена получена в среднем с погрешностью 0,6 м, азимут звена — 1,15". СКП взаимного положения вершин полигонов равны 0,40 - 0,65 м. Точность сети 1-го класса позволяет получить координаты пунктов, удаленных от исходного на 4 - 5 тысяч километров с погрешностью 2 - 2,5 м, а азимут такой линии — с погрешностью 0,1". Тем не менее, после обработки сети в 90-х годах на Дальнем Востоке обнаружены сдвиги пунктов величиной до 30 м.

Полигоны геодезической сети первого класса заполнены сплошной сетью триангуляции или полигонометрии второго класса (рис. 8.10). Эти работы практически завершены в 80-х годах прошлого столетия. Расстояния между смежными пунктами второго класса в зависимости от рельефа и залесенности местности составляют 7–20 км. В каждой сети триангуляции второго класса измерены длины 4–5 базисных сторон. На концах базисной стороны в середине полигона определены астрономические широты, долготы, азимуты и вычислены азимуты Лапласа. По проекту СКП измерения углов 1", фактически — 0,8". Схемы этих построений имеются во многих учебниках и публикациях, например [1, 21].

Государственные сети первого и второго классов, построенные по геодезическим и астрономическим измерениям, образуют *астрономо-геодезическую сеть* (АГС). В 1990 – 1991 гг.

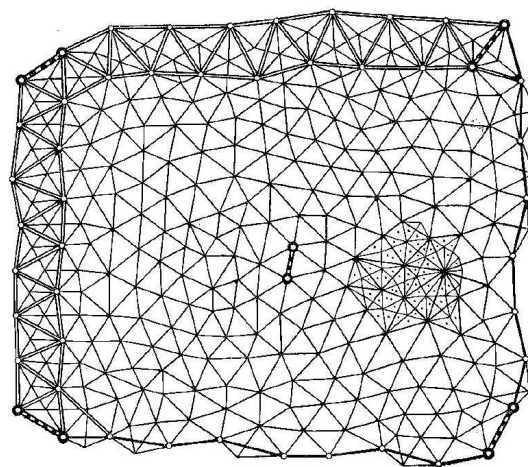


Рис. 8.10. Полигон первого класса заполнен сетью второго класса. Сети третьего и четвертого классов сгущают АГС

проведено общее уравнивание АГС, включавшей свыше 164 тысяч пунктов триангуляции и полигонометрии этих классов, расположенных на территории бывшего СССР.

Сети третьего и четвертого классов сгущают АГС. Расстояния между пунктами III-го класса 3–8 км, а IV-го класса – 2–5 км. СКП измерения углов в третьем классе — 1,5", а в четвертом — 2". В России таких пунктов свыше 210 тыс.

На каждом пункте любого класса установлены два *ориентирных пункта*, по которым можно ориентироваться непосредственно с земли, например, при выполнении топографических съёмок. Направления на них определены с СКП 2,5". Ориентирные пункты закреплены

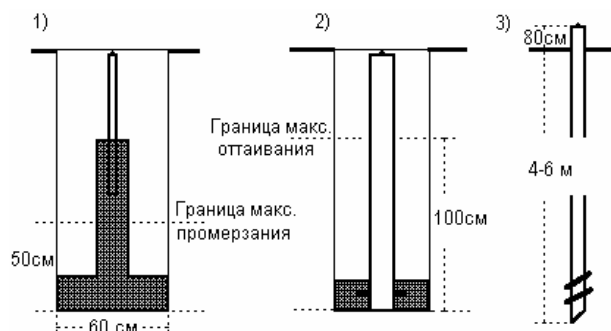


Рис. 8.11. Типы центров пунктов плановой государственной геодезической сети: 1) для северной зоны сезонного промерзания; 2) для районов многолетней мерзлоты; 3) для районов подвижных песков

подземными знаками и наружными опознавательными столбами. Они установлены на расстоянии 250 - 1000 метров от основного пункта. В отдельных случаях одним из ориентирных пунктов является геодезический знак или местный предмет (шпиль башни, колокольня), расположенный не далее 3 км и хорошо видимый с земли.

На рис. 8.11. отражены принципы закладки подземных знаков в разных регионах. На застроенных территориях их закрепляют в стенах и фундаментах зданий или устанавливают на зданиях.<sup>13</sup>

Над центрами сооружают наружные знаки. Они нужны для обеспечения видимости между пунктами на время производства угловых и

линейных измерений. Наружные знаки являются хорошими ориентирами. Они бывают деревянными, металлическими или железобетонными. В зависимости от конструкции их делят на туры (сооружаются в горной местности из камней или кирпичей), пирамиды, пирамиды со штативом, простые и сложные сигналы (рис. 8.12)<sup>14</sup>.

Конструкция определяется необходимой высотой наружного знака. В открытых горных районах складывают каменные или кирпичные столбы — туры, во всхолмленных открытых районах строят пирамиды высотой до 5-6 м; высоты простых сигналов обычно до 10 м, сложных сигналов — от 10 м и выше. Простой сигнал состоит из двух независимых пирамид — внутренней, на столике которой устанавливают прибор — теодолит или светодальномер, и внешней, которая несет визирную цель для наблюдений на нее с других пунктов и площадку для наблюдателя. В сложных сигналах в целях экономии строительного материала внутренняя пирамида сооружается не на земле, а опирается на столбы внешней пирамиды в местах, расположенных несколькими ярусами ниже площадки для наблюдателя. Наружные знаки должны быть устойчивыми к опрокидыванию, жесткими и прочными.

Пункты с закреплёнными подземными и наружными знаками, окапывают канавой и устанавливают опознавательные столбы.

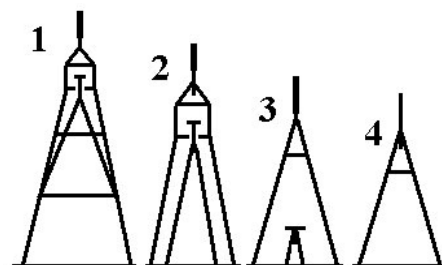


Рис. 8.12. Наружные знаки: 1) сложный сигнал, 2) простой сигнал, 3) пирамида со штативом, 4) простая пирамида

<sup>13</sup> Центры геодезических пунктов. URL: <http://geodetics.ru/center.html> (Дата обращения 07.08.2014).

<sup>14</sup> Геодезические знаки. URL: <http://geodetics.ru/znaki.html> (Дата обращения 07.08.2014).

Первоначальные плановые государственные сети СССР впоследствии пополнились новыми построениями, созданными методами космической геодезии. В 1984–93 гг. государственными геодезическими организациями создана сеть из 131 пункта, получившая название *доплеровской геодезической сети* - ДГС. Она построена по данным спутниковой системы позиционирования первого поколения *TRANSIT*. Усилиями Топографической службы Вооруженных сил была построена упоминавшаяся выше сеть КГС. Сеть КГС создана по результатам наблюдений геодезических спутников ГЕОИК-1, ЭТАЛОН, а также при помощи спутниковых систем позиционирования *GPS* и ГЛОНАСС.

Пункты ДГС и КГС были совмещены с соответствующими пунктами АГС. В итоге их совместного уравнивания в единой координатной системе определено пространственное положение 134 пунктов с расстояниями между смежными пунктами 400–500 км. С этих пунктов результаты совместного уравнивания распространены на все остальные пункты новой Государственной геодезической сети – ГГС [3, 4].

Постановлением правительства Российской Федерации от 28 июля 2000 г. с 1 июля 2002 г. введена новая, предназначенная для геодезических и картографических работ, единая государственная система отсчета геодезических координат 1995 г. СК-95. Геодезическая отсчетная основа СК-95 представлена пунктами ГГС Российской Федерации.

В СК-42 координатные оси эллипсоида Красовского составляли углы в несколько десятых долей угловой секунды с соответствующими осями общеземной системы. Объяснялось это тем, что ось *Z* была направлена не на Условный земной полюс, а на средний полюс эпохи построения государственных сетей СССР. Другой причиной поворота координатных осей могли быть постепенные изменения долгот пунктов. В новой системе координат СК-95 оси эллипсоида Красовского повернуты и ориентированы параллельно соответствующим осям общеземной координатной системы отсчета ПЗ-90. Центр эллипсоида, определяющий начало референционной системы координат, по-прежнему остался смещенным с центра масс примерно на 155 м.

Точность СК-95 характеризуется средними квадратическими погрешностями 2–4 см в положении смежных геодезических пунктов и 0,3–0,8 м при расстояниях между пунктами от 1 до 9 тыс. км. СК-95 точнее СК-42 в 10–15 раз при расстояниях между пунктами свыше 1000 км, и в 2–3 раза для смежных пунктов; главное – новая система являлась однородной по точности в пределах территорий России и стран СНГ [16].

В настоящее время в Российской Федерации развиваемые сети ФАГС (50 пунктов, из них 33 открытого пользования), ВГС (300 пунктов) и СГС (4500 пунктов) являются геоцентрической основой новых систем координат ПЗ-90.11 и ГСК-2011 [1, 10, 11]. Система координат ГСК-2011 практически на порядок точнее СК-95 и на два порядка СК-42 [10]. По уровню точности эти системы соответствуют координатной основе *ITRF*.

В соответствии с действующими установками [15] постоянно работающие и периодически определяемые пункты ФАГС закрепляются на местности группой центров, состоящей из *основного* центра, обеспечивающего принудительное центрирование спутниковой антенны на нем и являющегося основным носителем координат, *контрольного* и *рабочего* центров.

Пункты ВГС закрепляются на местности группой из трех центров, состоящей из основного, контрольного и рабочего центров.

Пункты СГС-1 закрепляются на местности центрами, используемыми для закрепления на местности пунктов государственной геодезической сети 1-4 классов.

Типовые конструкции центров выбирают с учетом климатических и физико-географических условий зон.

**Государственные нивелирные сети.** Государственные нивелирные сети в пределах всей страны устанавливают единую систему высот. Они служат научным и практическим целям и



являются высотной основой всех геодезических работ и топографических съемок. Высотная сеть решает, по крайней мере, три задачи: 1) создание сети пунктов с известными высотами; 2) определение разностей уровней морей и океанов, омывающих государство; 3) изучение вертикальных движений земной поверхности. На всю территорию Российской Федерации распространена Балтийская система нормальных высот 1977 г., началом которой служит нуль Кронштадтского футштока — черта на металлической плите, укрепленной на устой моста через Обводной канал в Кронштадте, соответствующая среднему уровню Балтийского моря за период 1825 -1840 гг.<sup>15</sup>

Государственная нивелирная сеть разделяется на сети 1, 2, 3 и 4 классов точности<sup>16</sup>. Сети 1 и 2 классов являются главной высотной основой; сети 3 и 4 классов служат для обеспечения инженерных задач и топографических съемок. Сети всех классов построены методом геометрического нивелирования. Линии нивелирования 1 и 2 классов проложены по трассам, географическое положение которых научно обоснованы и наилучшим образом соответствуют решению указанных выше задач. Для достижения наивысшей точности нивелирные линии проложены по максимально благоприятным для измерений трассам: по железным, шоссейным и улучшенным грунтовым дорогам, в труднодоступных районах — по тропам, зимникам, вдоль берегов больших рек. Каждые 25 лет, а в сейсмоактивных районах и через 15 лет, выполняется повторное нивелирование по линиям 1-го класса, а через 35 и 25 лет соответственно — и по линиям 2-го класса.

Периметры полигонов нивелирных линий 1-го класса составляют 1200 км в обжитых районах и 2000 км в малообжитых. Нивелирные линии 2-го класса опираются на пункты 1-го класса и образуют полигоны периметром соответственно в 400 и 1000 км.

Линии 3-го класса прокладывают между пунктами 1 и 2 классов. Периметры полигонов 3 класса 60-150 км, а в труднодоступных районах — 100-300 км.

Сети высших классов сгущают нивелированием 4-го класса. Длины их ходов не превышают 60 км в обжитых районах, и 80 км в малообжитых местах. Расположение и густота их пунктов определяются масштабами топографических съемок или требованиями других работ.

Все нивелирные пункты закреплены знаками — нивелирными реперами. Нивелирные реперы обычно бывают трех типов — грунтовые, скальные, стенные. Грунтовыми реперами часто бывают железобетонные пилонеры или металлические трубы с якорями. Знаки закладывают не реже чем через 5 км, а в труднодоступных районах — через 7 км. Кроме того, пункты 1 и 2 классов через каждые 60 км закрепляют знаками повышенной устойчивости — фундаментальными реперами. В городах плотность знаков значительно выше.

Случайная средняя квадратическая ошибка составляет 0,8; 2; 5 и 10 мм/км соответственно для нивелирований 1-го, 2-го, 3-го и 4-го классов точности. Для 1-го и 2-го классов указывается систематическая составляющая - 0,08 и 0,2 мм/км.

Общая протяженность сетей нивелирования I и II классов около 400 тыс. км. Точность нормальных высот смежных пунктов I-II классов составляет 6–10 см. При расстояниях между пунктами в тысячу километров взаимная точность высот несколько ниже и оценивается погрешностями в 0,3–0,5 м.

**Местные геодезические сети сгущения.** Местные сети развивают, когда недостаточна густота пунктов государственных сетей. Их создают спутниковым позиционированием или

<sup>15</sup> Кронштадтский футшток. Откуда есть пошла Русская Земля. (Дата обращения 07.08.2014). URL: <http://geoblog.rgo.ru/blog/364.html>

<sup>16</sup> Инструкция по нивелированию I, II, III, IV классов. ГКИНП (ГНТА)-03-010-02. – Москва. ЦНИИГАиК. 2003 г. <http://gis-lab.info/docs/law/gkinp03-010-02.pdf> (Дата обращения 07.08.2014).

традиционными методами триангуляции, полигонометрии (плановые сети) и технического геометрического нивелирования (высотные сети). Плановые сети триангуляции и полигонометрии по точности подразделяют на сети 1 и 2 разрядов.

Местные сети сгущения развивают между пунктами государственных сетей. Их закрепляют постоянными знаками, соблюдая те же принципы, что и при заложении центров в государственных сетях. Над центрами пунктов сооружают наружные знаки — как правило, пирамиды. Точностные характеристики следующие: СКП измерения сторон в триангуляции 1 разряда  $1/50\,000$ ; 2 разряда  $1/20\,000$ ; в полигонометрии — соответственно  $1/10\,000$  и  $1/5000$ ; СКП измерения углов в сетях 1 разряда  $5''$ , 2 разряда —  $10''$ .<sup>17</sup>

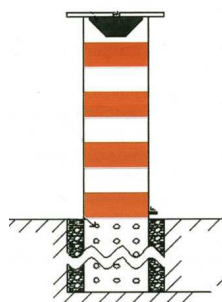


Рис. 8.13.  
Трубчатый знак

### Геодезическая основа государственного кадастра недвижимости.

Это новое и важное понятие. Ею является государственная геодезическая сеть и специальные опорные межевые сети - ОМС [7]. ОМС подразделяется на два класса: ОМС1 и ОМС2. Они различаются СКО взаимного положения пунктов — 0,05 и 0,10 м.

ОМС1, как правило, создаётся для установления границ городской территории или границ земельных участков в собственности (пользовании) граждан или юридических лиц.

ОМС2 развивается в черте других поселений для решения задач на землях сельскохозяйственного назначения и других землях для межевания земельных участков, мониторинга, инвентаризации, создания межевых карт, планов и др.

Разработан удобный трубчатый знак с принудительным центрированием геодезических приборов для закрепления пунктов ОМС [14] (рис. 8.13). Это труба  $\varnothing 150-200$  мм с металлическим столиком и отверстием для станового винта. Обеспечивается центрирование с погрешностью 0,1 мм. У основания трубы просверлены отверстия. Труба опускается в скважину, предварительно залитую жидким раствором бетона, и заливается бетонной смесью. Труба раскрашивается в красно-белый или чёрно-белый цвета и хорошо видна на фоне окружающей среды. Знак одновременно служит визирной целью для наблюдений с соседних пунктов. Глубина закладки выбирается с учётом общих правил закладки геодезических подземных знаков. На уровне земли к трубе приваривается марка для установки нивелирных реек.

**Съёмочные геодезические сети.** Съёмочные геодезические сети развивают на базе государственных и местных геодезических пунктов спутниковым позиционированием или традиционно — теодолитными ходами, методом триангуляции, засечками (плановая основа), геометрическим и тригонометрическим нивелированием (высотная основа). Пункты съёмочной сети служат для непосредственной съёмки контуров и рельефа местности. Густота пунктов определяется масштабом съёмок. Предельные погрешности в координатах пунктов по отношению к пунктам высших классов или разрядов точности не должны превышать 0,2 мм в масштабе создаваемого плана. Часть знаков, с расчетом на долговременное сохранение, закрепляют металлическими трубами с якорями или железобетонными пилонами, углубляемыми в грунт на глубину до 1 м. Временные точки обозначают забиваемыми в грунт кольями.

<sup>17</sup> ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОДЕЗИЯ. ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ СЕТИ. Уч. п. - Санкт-Петербург. Изд. СПбГПУ. 2003. [https://www.google.ru/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=5&ved=0CD0QFjAE&url=http%3A%2F%2Fgeoengineer.spb.ru%2Fgeoseti.doc&ei=O1jjUnUEJOO4gSxuoGgCg&usg=AFQjCNF\\_WtdRXY5wbMtLxwa1Cw64Ci0\\_mQ&sig2=RMOU85HB1PN1kAzJCzdkpw&bvm=bv.72676100,d.bGE&cad=rjt](https://www.google.ru/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=5&ved=0CD0QFjAE&url=http%3A%2F%2Fgeoengineer.spb.ru%2Fgeoseti.doc&ei=O1jjUnUEJOO4gSxuoGgCg&usg=AFQjCNF_WtdRXY5wbMtLxwa1Cw64Ci0_mQ&sig2=RMOU85HB1PN1kAzJCzdkpw&bvm=bv.72676100,d.bGE&cad=rjt) (Дата обращения 05.04. 2015)

**Гравиметрические сети.** Прежде всего, отметим мировую сеть. Мировая сеть развивается на основе гравиметрической сети с исходным пунктом в Потсдаме. В 1971 г. на XV международной ассамблее в Москве введена новая система. Она получила название Международной гравиметрической стандартной сети 1971 г. — МГСС-71 (*IGSN-71*). Сеть создана на основе (1) измерений абсолютных значений ускорений силы тяжести в 8 пунктах: Севре (Франция), Теддингтоне (Англия), Боготе (Колумбия), Денвере, Вашингтоне, Миддлтауне, Бостоне, Фербенксе (США); и (2) многих сотен гравиметрических связей, осуществленных маятниковыми приборами, и десятков тысяч высокоточных измерений разностей силы тяжести, выполненных при помощи гравиметров.

Основой высокоточного гравиметрического обеспечения России являются Государственная фундаментальная гравиметрическая сеть и гравиметрическая сеть первого класса.

**Государственная фундаментальная гравиметрическая сеть (ГФГС)** [13]. ГФГС служит для связи с мировой и зарубежными гравиметрическими системами, для обеспечения единой метрологической основой всех гравиметрических измерений в стране, для изучения изменений гравитационного поля во времени. Её пункты совмещены с пунктами ФАГС и ВГС.

На всех пунктах ФАГС определяются ускорения силы тяжести. Средняя плотность размещения пунктов в этом случае составит 1 пункт на 0,5-1,0 млн. кв. км.

Абсолютные определения ускорения силы тяжести выполняются также на пунктах высокоточной геодезической сети (ВГС).

Один из пунктов ГФГС в Москве, на котором имеется продолжительный ряд повторных определений ускорения силы тяжести, является Главным гравиметрическим пунктом России (ГГП).

В районе Москвы, Санкт-Петербурга, Новосибирска, Хабаровска и Петропавловска-Камчатского создаются кустовые главные фундаментальные пункты с расстоянием между ними до 50 км и связанные между собой относительными измерениями с погрешностью <10 мкГал.

**Государственная гравиметрическая сеть 1 класса (ГГС-1)** предназначена для распространения гравиметрической системы на всю территорию страны. Построение ГГС-1 выполняют поэтапно. На первом этапе определяют от пунктов ГФГС основные пункты 1 класса с густотой один пункт на 50-100 тыс. кв. км. Затем, учитывая перспективные требования практики, выполняют сгущение сети до плотности 1 пункт на 10-25 тыс. кв. км. Пункты размещаются с учетом удобства подъезда к ним наземным транспортом или полета на вертолете.

Фундаментальные гравиметрические пункты и пункты ГГС-1 закрепляют центрами, которые закладывают в помещениях, обеспечивающих их долговременную сохранность. В малонаселенных районах разрешается закладка центров пунктов ГГС-1 вне помещений, причем пункты 1 класса, как правило, совмещают с пунктами триангуляции и нивелирными реперами.

#### Источники информации Лекции 8

1. Андреев В.К. Роль и место в исследованиях по геодезическому обеспечению системы ГЛОНАСС в рамках НИР «Развитие» государственных единых систем координат ГСК-2011 и ПЗ-90, высокоточного определения координат и гравитационного поля Земли. URL: [http://www.glonass-center.ru/aboutIAC/Report%20by%20Andreev\\_4.pdf](http://www.glonass-center.ru/aboutIAC/Report%20by%20Andreev_4.pdf) (дата обращения 3.02.2014).
2. Арнольд К. Методы спутниковой геодезии. – М.: Недра. 1973. – 224 с.

3. Базлов Ю. А., Галазин В. Ф., Каплан Б. Л., Максимов В. Г., Чугунов И. П. Анализ результатов совместного уравнивания астрономо-геодезической, доплеровской и космической геодезических сетей // Геодезия и картография. 1996. N 7. С. 26–36.
4. Бовшин Н. А., Зубинский В. И., Остач О. М. Совместное уравнивание общегосударственных опорных геодезических сетей // Геодезия и картография. 1995. N 8. С. 6–17.
5. Бойко Е.Г., Кленицкий Б. М., Ландис И. М., Устинов Г. А. Построение, уравнивание и оценка точности космических геодезических сетей. – М.: Недра. 1972. – 208 с.
6. Вдовин В.С. Доклад на заседании секции №3 НТС ФГУП ЦНИИмаш по вопросу «Общий замысел геодезических направлений исследований в рамках НИР «Развитие»» от 28 мая 2013 года. ФГУП «ЦНИИмаш», г. Королев. [Электронный ресурс] (дата обращения 22.07.2014). URL: [http://www.glonass-center.ru/aboutIAC/Report%20by%20Vdovin\\_2.pdf](http://www.glonass-center.ru/aboutIAC/Report%20by%20Vdovin_2.pdf)
7. Геодезическая основа государственного кадастра недвижимости. [Электронный ресурс]. URL: [http://wiki.cadastre.ru/doku.php?id=geodezicheskaya\\_osnova](http://wiki.cadastre.ru/doku.php?id=geodezicheskaya_osnova) (дата обращения 27.07.2014).
8. Геодезическое применение Шоран. – М.: Издательство геодезической литературы. 1961. –252 с.
9. Глумов В. П. Основы морской геодезии. Учебное пособие. – М.: Недра. 1983. 184 с.
10. Горобец В. П., Демьянов Г. В., Майоров А. Н., Побединский Г. Г. Современное состояние и направления развития геодезического обеспечения РФ. Высотное и гравиметрическое обеспечение // Геопрофи. 2014. № 1. С. 5–11.
11. Горобец В. П., Демьянов Г. В., Майоров А. Н., Побединский Г. Г. Современное состояние и направления развития геодезического обеспечения РФ. Системы координат. // Геопрофи. 2013. № 6. С. 4–9.
12. Иванов Г.Б. 140 лет точному нивелированию в России // Геодезия и картография. 2013. N 10. С. 60–64.
13. Инструкция по развитию высокоточной государственной гравиметрической сети России. ГКИНП (ГНТА)-04-122-03. Издание официальное. - Москва ЦНИИГАиК. 2004. – 152 с.
14. Мурзайкин И.Я., Сивакова Н.И. Геодезические знаки (центры) при создании опорных межевых сетей // Геодезия и картография. 2013. № 5. С.12-15.
15. Правила закрепления центров пунктов спутниковой геодезической сети. Издание официальное. - М.: ЦНИИГАиК. 2001. – 29 с.
16. Руководство пользователя по выполнению работ в системе координат 1995 года (СК-95). Издание официальное. – М.: ЦНИИГАиК. 2004. –138 с.
17. Тищенко А. П. Геодезические основы карт. Тексты лекций. – М.: Издательство Московского университета. 1975. 174 с.
18. Успенский М.С. Условия устойчивости геодезических центров и реперов. – М.: Геодезиздат. 1955. -94 с.
19. Хаимов З.С. Основы высшей геодезии. Учебник. – М.: Недра. 1984. – 360 с.
20. Центры и реперы государственной геодезической сети СССР. - М.: Недра. 1973. 40с.
21. Яковлев Н.В. Высшая геодезия. Учебник для вузов. - М.: Недра. 1989. - 445 с.

### Контрольные вопросы

1. Что понимают под геодезической сетью?
2. Какие условия возникают в треугольнике, геодезическом четырёхугольнике и в центральной системе, используемых в триангуляции?
3. В чём суть метода измерения длинных линий пересечением их створа?
4. Какие выполнены измерения системой Шоран, имевшие мировое значение?
5. Как определяются направления сторон в треугольниках спутниковой триангуляции?
6. Почему при уравнивании спутниковой триангуляции ставятся условия равенства нулю смешанного произведения векторов в каждом треугольнике?

7. Поясните смысл фундаментального уравнения, устанавливающего взаимосвязь между положениями космического объекта и наземного пункта.
8. Какие и зачем формируются разности при относительных измерениях с помощью ГНСС?
9. Поясните суть работы РСДБ.
10. Какие имеют место этапы создания геодезической сети?
11. Плановая и высотная геодезическая основа СК-42.
12. Плановая и высотная геодезическая основа СК-95.
13. Геодезическая основа ГСК-2011.
14. Основные правила закрепления пунктов геодезических сетей.