

Системы высот

Изложение теории высот в гравитационном поле Земли известный отечественный ученый-гравиметрист, профессор кафедры высшей геодезии МИИГАиК Александр Павлович Юзефович (1938–2019) начинал со слов: «Кто знает, что такое нормальная высота, того не сократят на работе». Это и неудивительно, ведь строгое изложение теории высот в специализированной литературе трудоемко и сопряжено с изучением смежных вопросов теории фигуры Земли. Изучать теорию высот в отрыве от созданной выдающимся геодезистом и геофизиком, членом-корреспондентом Академии наук СССР Михаилом Сергеевичем Молоденским теории фигуры Земли затруднительно, поскольку нормальная высота представляет собой один из ее главных элементов.

Для простоты изложения системы высот можно начинать с наиболее практического бытового понимания «выше–ниже»: говоря о разности точек по высоте, мы всегда имеем в виду течение жидкости или движение однородного шарика под влиянием потенциала поля силы тяжести из области с меньшим потенциалом в область большего потенциала. Так разделяются понятия «верх» и «низ»; иначе говоря, высота в физическом смысле – это не просто «вертикальная длина». Но приращения потенциала пропорциональны превышениям, измеряемым в линейной мере, лишь на ограниченных участках.

Наиболее точным методом измерения превышений пока остается геометрическое нивелирование. В 1938 году в своей статье «О современной постановке высокоточного и точного нивелирования» Феодосий Николаевич Красовский писал, что высокоточное нивелирование должно обеспечивать определение разностей уровней морей и океанов, выяснение вековых движений суши, изучение вертикальных смещений земной поверхности в некоторых районах, не связанных с вековыми движениями суши, в том числе смещений, вызванных землетрясениями, и изучение деформаций уровенной поверхности, вызываемых перемещениями подземных масс.

Оно не лишено недостатков. При геометрическом нивелировании «из середины» принципиально неустранимые проблемы – это накопление ошибок отсчитывания с ростом числа станций (что критично в горах) и прямолинейность визирного луча, тогда как уровенная поверхность имеет кривизну. При работах на суше происходит плавный переход с одной уровенной поверхности на другую. Поскольку удаленные уровенные поверхности на разной высоте имеют различную кривизну, они не параллельны и не подобны, то сумма превышений по замкнутому ходу в общем случае будет ненулевой. По этой же причине сумма превышений между двумя реперами будет различной вдоль разных путей нивелирования. Здесь мы подходим к необходимости введения системы физических высот, где такие неопределенности устранены.

Принципы определения высоты в гравитационном поле

В гравитационном поле под высотой h понимают расстояние между уровенными поверхностями, т.е. отрезок 1–2 силовой линии (рис. 29). Расстояние между уровенными поверхностями $W = W_1$ и $W = W_2$, проходящими через точки 1

и 2, прямо пропорционально разности потенциалов $W_2 - W_1$ и обратно пропорционально среднему значению g_m силы тяжести вдоль силовой линии 1–2:

$$h = -\frac{W_2 - W_1}{g_m}. \quad (39)$$

Знак «минус» в формуле означает, что направление счета высот противоположно направлению силы тяжести. Сила тяжести является градиентом потенциала и направлена в сторону его возрастания, следовательно, в точке 1 потенциал больше, чем в точке 2, и разность $W_2 - W_1$ отрицательна. А высота точки 2 над точкой 1 на рис. 28 положительна. Сила тяжести на уровне поверхности изменяется, поэтому уровенные поверхности не параллельны, и расстояние h при перемещении точек 1–2 вдоль уровенных поверхностей неодинаково.

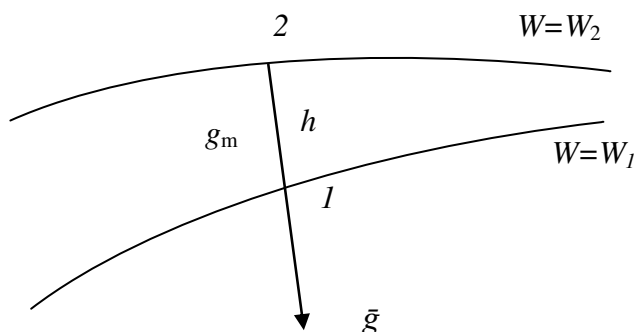


Рис. 29. Определение высоты в гравитационном поле

Расстояния h_1 и h_2 между уровенными поверхностями, проходящими через точки 1 и 2 на физической поверхности Земли, различны (рис. 30).

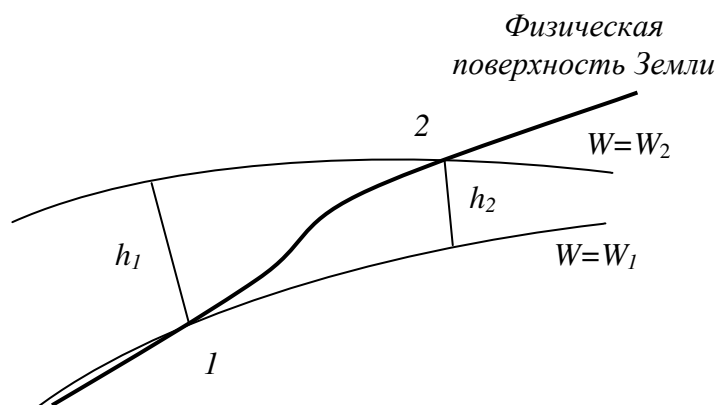


Рис. 30. Расстояние между уровенными поверхностями

При геометрическом нивелировании поскольку расстояние между рейками невелико и, как правило, не превышает 100–150 м, кривизной уровенных поверхностей пренебрегают и считают их плоскостями, параллельными горизонтальной плоскости, проходящей через ось нивелира. В этом случае определение нивелирного превышения на станции нивелирного хода выполняют в однородном гравитационном поле, в котором сила постоянна по величине и направлению, а уровенными поверхностями являются горизонтальные плоскости. При перемещении по поверхности Земли положение горизонтальной плоскости от одной станции к другой изменяется, и превышения Δh по ходу нивелирования зависят от пути нивелирования. Поэтому сумма нивелирных превышений будет зависеть от положения нивелирной линии, и в замкнутом полигоне не равна нулю. Теоретическую сумму превышений f в замкнутом нивелирном полигоне можно определить по формуле:

$$f = \sum \Delta h = -\frac{1}{g_0} \sum (g_m - g_0) \Delta h, \quad (40)$$

где Δh – превышение по секции нивелирного хода, g_m – среднее по секции значение силы тяжести, g_0 – среднее по полигону значение силы тяжести.

В каждой нивелирной сети измерение превышений начинают от исходного пункта O , через который проходит уровенная поверхность $W = W_0$, близкая к среднему уровню моря. Потенциал на уровне моря не постоянен и в нивелирных сетях, опирающихся на разные футштоки, значение W_0 различно. Разность $W_0 - W_P$ потенциалов в исходном пункте O счета высот и любой точке P называют геопотенциальным числом. Из курса геодезической гравиметрии известно, что эту величину получают из совместных измерений превышений dh и силы тяжести g по линии нивелирования:

$$W_0 - W_P = \int_0^P g dh. \quad (41)$$

Основной единицей измерения силы тяжести в гравиметрии является Гал (Gal), названный в честь итальянского физика и астронома Галилео Галилея (1564—1642). В настоящее время гал имеет статус единицы, отличной от СИ, но принятой для использования с единицами СИ в геодезии и геофизике. Положением о единицах величин, допускаемых к применению в Российской Федерации с 2009 года, гал допущен к использованию без ограничения срока с областью применения гравиметрия.

Гал применяется в гравиметрии при измерениях ускорения свободного падения (силы тяжести) g . Часто применяются также единицы с десятичными множителями – килогал (кГал, kGal), равный 10^3 Гал, миллигал (мГал, mGal), равный 10^{-3} Гал, и микрогал (мкГал, μ Gal), равный 10^{-6} Гал.

Стандартное (нормальное) значение $g = 980,665$ Гал.

Среднее значение g на поверхности Земли равно 979,7 Гал.

Величины вариаций g :

Изменение от полюса к экватору за счёт центробежной силы - 3,4 Гал;

Изменение от полюса к экватору за счёт сплюснутости Земли - 1,8 Гал;

Максимальная амплитуда лунно-солнечных возмущений - 0,24 мГал.

Геопотенциальные числа измеряются в Гал·м.

Очень приближенно можно считать, что геопотенциальное число равно высоте в метрах умноженной на ускорение силы тяжести. Так для горы Эльбрус высота равна 5642 м, приближенное геопотенциальное число 5527 кГал·м, для пика Топографов высота 3089 м, приближенное геопотенциальное число 3026 кГал·м, для горы Кашина высота 1425 м, приближенное геопотенциальное число 1396 кГал·м.



Рис. 31. Памятный знак на пике Топографов

При перемещении по уровенной поверхности $W = W_p = const$ геопотенциальное число постоянно, а работа по перемещению равно нулю. Нам легче идти от точки с меньшим потенциалом к большему, т.е. от точки с большим

геопотенциальным числом к меньшему. Вода в реках всегда течет в направлении уменьшения геопотенциального числа, а уровень воды в водоемах совпадает с поверхностью равных геопотенциальных чисел.

Геодезическая, ортометрическая, нормальная и динамическая высоты

ГОСТ «Геодезия. Термины и определения» [6] в 1976 году установил в качестве применяемых в науке, технике и производстве терминов и определений основных понятий в области геодезии четыре определения высоты: геодезическая, ортометрическая, нормальная и динамическая. Каждый термин приведен на четырех языках: русском, немецком, английском и французском. При этом только два вида высот определены через геопотенциальные числа (величины).

27. Геодезическая высота D. Geodätische Höhe E. Geodetic height F. Altitude géodésiques	Высота точки над поверхностью земного эллипсоида
28. Ортометрическая высота D. Orthometrische Höhe Meereshöhe E. Orthometric height F. Cote orthométrique Altitude orthométrique	Высота точки над поверхностью геоида
29. Нормальная высота D. Normalhöhe E. Normal height F. Altitude normale	Величина, численно равная отношению геопотенциальной величины в данной точке к среднему значению нормальной силы тяжести Земли по отрезку, отложенному от поверхности земного эллипсоида
30. Динамическая высота D. Dynamische Höhe E. Dynamic height F. Cote dynamique Altitude dynamique	Величина, численно равная отношению геопотенциальной величины в данной точке к некоторому постоянному значению ускорения силы тяжести Земли

Геодезическая высота уже рассматривалась в системе геодезических эллипсоидальных координат - трех величин, две из которых характеризуют направление нормали к поверхности земного эллипсоида в данной точке пространства относительно плоскостей его экватора и начального меридиана, а третья является высотой точки над поверхностью земного эллипсоида.

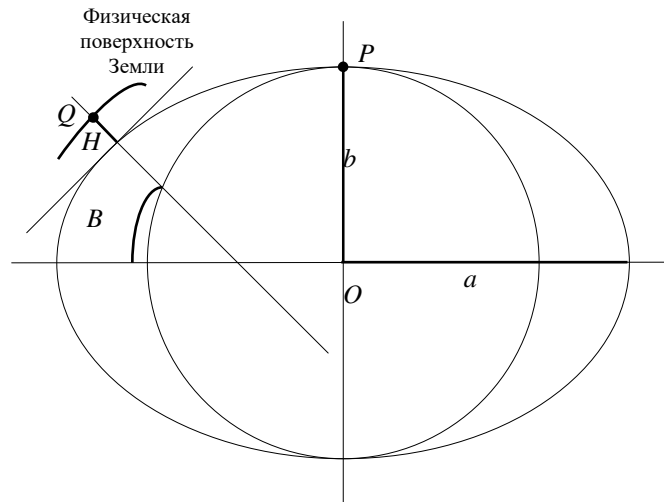


Рис. 32. Геодезическая высота в эллипсоидальной системе координат

Геопотенциальное число также можно рассматривать как координату точки, определяющую вместе с широтой и долготой ее положение в пространстве. Его можно выразить в линейных единицах, разделив на постоянное значение C силы тяжести:

$$H^d = \frac{W_0 - W_P}{C}, \quad (42)$$

т.е. предполагая поле силы тяжести однородным. Отношение H^d называют **динамической высотой**. В качестве постоянной C используют разные значения, принимая ее равной 1 кГал, значению нормальной силы тяжести на эллипсоиде на широте 45° $\gamma_0(45)$, среднему значению силы тяжести в отдельной области $g_{\text{ср}}$. Однако, несмотря на формальное выражение динамической высоты в метрах, эта высота геометрического смысла не имеет и по-прежнему выражает работу, которую нужно выполнить в гравитационном поле при перемещении от исходной уровенной поверхности $W = W_0$ до данной точки. Эти высоты используют в океанографических исследованиях, при решении энергетических задач - гидростатическом нивелировании, проектировании водохранилищ, продуктопроводов и т.п.

Для вычисления высоты над исходной уровенной поверхностью $W = W_0$ геопотенциальное число нужно разделить на среднее значение g_m силы тяжести вдоль отрезка 1–2 силовой линии (рис. 33):

$$H^g = \frac{W_0 - W_P}{g_m} = \frac{1}{g_m} \int g dh. \quad (43)$$

Высота H^g называется высотой над уровнем моря или **ортометрической высотой**. Чтобы вычислить значение g_m , нужно знать плотность пород вдоль силовой линии или измерять силу тяжести внутри Земли. Поэтому ортометрическую высоту нельзя найти по измерениям только на поверхности Земли.

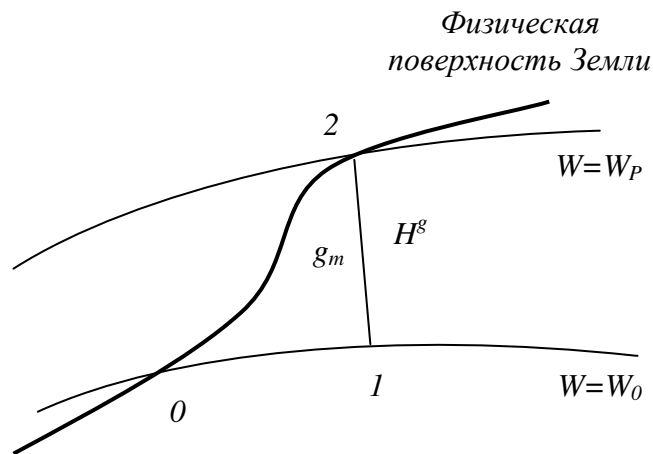


Рис. 33. Ортометрическая высота

Для получения высоты по результатам измерений только на поверхности Земли и во внешнем пространстве геопотенциальное число рассматривают в нормальном поле, и находят в нормальном поле высоту точки, для которой разность $U_0 - U_2^Y$ нормальных потенциалов относительно отсчетного эллипсоида $U = U_0$ равна геопотенциальному числу $U_0 - U_2^Y = W_0 - W_2$ (тождество Молоденского). Используя это условие и формулу определения высоты, для нормальной высоты H^Y находим:

$$H^Y = \frac{U_0 - U_2^Y}{\gamma_m} = \frac{W_0 - W_2}{\gamma_m} = \frac{1}{\gamma_m} \int g dh. \quad (44)$$

Представим потенциал W_P суммой нормального U и аномального T потенциалов $W_P = U_P + T_P$, тогда

$$H^Y = \frac{U_0 - U_P - T_P}{\gamma_m} = \frac{U_0 - U_P}{\gamma_m} - \frac{T_P}{\gamma_m}. \quad (45)$$

Если не учитывать кривизну нормальной силовой линии, первый член правой части этого равенства равен геодезической высоте H , а второй определяет аномалию высоты ζ . Таким образом, нормальная высота равна

$$H^Y = H - \zeta. \quad (46)$$

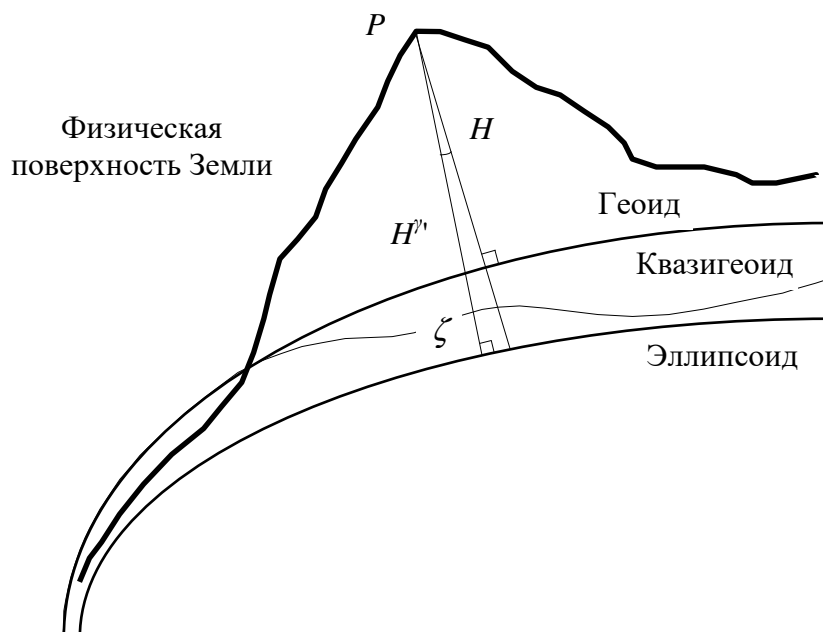


Рис. 34. К определению нормальной высоты

При развитии системы геодезического обеспечения традиционными методами геодезических измерений (до широкого применения спутниковых технологий) координатное, высотное и гравиметрическое обеспечение развивались достаточно обособленно друг от друга. Это было связано с тем, что существовавшие тогда методы и средства геодезических измерений в целях развития планового, высотного и гравиметрического обеспечения обуславливали необходимость развития плановых, нивелирных и гравиметрических сетей в различных местах расположения геодезических пунктов и при различных конструкциях самих геодезических пунктов. Развитие гравиметрических технологий и современные спутниковые технологии геодезических измерений обеспечивают возможность объединения геодезических опорных сетей в единую совокупность геодезических пунктов, обеспечивающих развитие и взаимосвязь всех трёх составляющих общей системы геодезического обеспечения, как единой геодезической категории. Тем не менее, до настоящего времени в развитии системы высотного обеспечения основным средством создания высокоточной высотной основы остаётся метод геометрического нивелирования.

Исторические сведения о нивелировании

История нивелирных работ в России началась в середине XIX в. Начиная с 40-х годов XIX в., решение вопросов, связанных с созданием на территории России высотной опорной сети, отметки которой исчислялись бы от одного общего уровня, диктовалось широко развитыми к тому времени топографическими съемками Военно-топографического отдела (ВТО). Эти же вопросы неоднократно поднимались русскими учеными. Так, например, в 1862 г. Совет Русского географического общества (РГО), обсуждая проект О. В. Струве (1819—1905 гг.) о создании опорной нивелирной сети в Европейской России, признал необходимость организации таких работ как одну из важнейших задач картографирования страны. В связи с появлением способа изображения рельефа горизонталями, сменившего

штриховой способ, более высокими стали требования к точности определения высот. Это вызвало необходимость повышения точности высотной опорной сети страны и отнесение ее к одному и тому же исходному уровню [91].

История развития нивелирных работ неоднократно рассматривалась в геодезической литературе, в частности в сборнике трудов ЦНИИГАиК 1956 года «Высокоточное нивелирование» [63], а также в современных публикациях «Государственная нивелирная сеть (главная высотная основа)» [62], «История создания и развития нивелирной сети России» [1]. Наиболее полно этот вопрос раскрыт в сборнике статей «О нивелирной сети СССР (К 100-летию создания высокоточной нивелирной сети)» [19], подготовленном по материалам докладов научно-технической конференции, организованной 12 декабря 1977 г. Главным управлением геодезии и картографии при Совете Министров СССР (ГУГК при СМ СССР), Всесоюзным астрономо-геодезическим обществом при Академии наук СССР (ВАГО) и научно-техническим обществом «Горное» (НТГО) – предшественником Российского общества геодезии, картографии и землеустройства.

В 1871–1872 гг. геодезисты Военно-топографического отдела (ВТО) - капитан Н. Я. Цингер и поручик М. А. Савицкий выполняли точное нивелирование вдоль Балтийской и Санкт-Петербургско-Варшавской железных дорог. Осуществление этого проекта было начато Н. Я. Цингером (1842-1918 гг.) в июне 1871 г. проложением по только что построенной Балтийской железной дороге нивелир-теодолитных ходов, идея которых была предложена бывшим начальником Военно-топографического отдела (ВТО) Э. И. Форшем (1828-1896 гг.). Для этих работ им был сконструирован особый прибор нивелир-теодолит, позволяющий измерять горизонтальные углы с точностью 5-10", как обыкновенным теодолитом, а расстояния и превышения при помощи вертикальных углов, определяемых с точностью 2-4" по вертикальному сектору (вместо полного круга).



Рис. 35. Нивелир-теодолит

Проложенные в 1871-1872 гг. Н. Я. Цингером нивелир-теодолитные ходы по Балтийской и частично по Санкт-Петербургско-Варшавской дороге от Динабурга (Двинск) до станции Лапы позволили ему установить точность определения высот и расстояний этим способом нивелирования. Точность таких ходов по его исследованиям характеризуется средней квадратической случайной погрешностью на 1 км хода порядка ± 10 мм [91] при расстояниях от нивелир-теодолита до рек 210 м, что не превышало точности современного нивелирования IV класса.

Невысокая точность нивелир-теодолитных ходов, выполненных в 1871-1872 гг., послужила основанием для отказа от создания на территории России высотной сети проложением таких ходов и к переходу в дальнейшем к определению высот марок геометрическим способом при помощи нивелира, позволяющего получать горизонтальный луч визирования.

Отказ КВТ от нивелир-теодолитных работ и переход к геометрическому способу нивелирования для создания высотной опорной сети в стране соответствовал решению Международной геодезической ассоциации, которая еще в 1864 г. рекомендовала всем государствам, выполняющим геодезические работы в общегосударственных интересах, определять высоту опорной сети геометрическим способом со средней погрешностью $\pm(3-5)$ мм на 1 км хода. Такие требования к постановке нивелирных работ предусматривали использование их результатов не только для целей картографирования, но и в решении научных проблем, и в первую очередь для определения разностей уровней морей и океанов и изучения вертикальных движений земной коры [91].

В 1873 г. военные геодезисты А. М. Ленчевский, Н. А. Котовский и А. П. Федотов начали геометрическое нивелирование между Петербургом и Москвой. А. П. Федотов для сравнения работу проводил нивелир-теодолитом. Нивелирование линии закончилось в 1876 г. Точность геометрического нивелирования была невысокой и характеризовалась случайной погрешностью $\pm 6,2$ мм на 1 км хода, а систематической $\pm 0,9$ мм. И все же по сравнению с нивелир-теодолитными ходами это были более точные работы.

В работе «Высокоточное нивелирование» [63] на основе использования национальных отчетов, представленных на XV, XVI и XVII Генеральных ассамблеях Международного геодезического и геофизического союза (МГГС), состоявшихся в 1971 г. в Москве, в 1975 г. в Гренобле и в 1979 г. в Канберре выполнен обзор национальных высотных сетей того времени.

Высотные сети методом геометрического нивелирования начали создавать после решения, принятого Международной геодезической ассоциацией в 1864 г. Геометрическое нивелирование должно было выполняться с вероятнейшей погрешностью менее 3 мм/км, при этом высоты в каждой стране должны быть отнесены к одному исходному пункту. В последующие годы требования к точности геометрического нивелирования повышались.

Первыми в 1865 г. начали создавать высотную сеть этим методом геодезисты Швейцарии и Саксонии, затем в 1867 г. - Пруссии, в 1872 г. - Испании, в 1873 г. - России и Австро-Венгрии, в 1876 г. - Италии, в 1882 г. - Португалии, в 1884 г. - Франции (если, не считать нивелирную сеть 1857-1864 гг., выполненную с

погрешностью 10 мм/км) и Дании, в 1886 г. - Швеции. В США работы по геометрическому нивелированию начались только в 1890 г.

К 80-м годам XX столетия практически во всех странах мира были созданы государственные высотные сети (табл. 17) [63].

Таблица 17

Страна	Площадь, тыс. кв. км	Длина линий, тыс. км	Годы создания
Австралия	7700	161,0*	1950—1970
Аргентина	2777	61,6*	1944—1974
Афганистан	655	6,0*	На 1970
Болгария	111	6,0*****	1958—1978
Боливия	1099	14,3	1949—1967
Бразилия	8512	98,0*	На 1970
Венгрия	93	3,8*****	1974—1976
ГДР	108	6,0***	1974—1976
Индия	3281	35,2**	1914—1978
Иран	1648	13,0	На 1971
Испания	505	11,3**	1925—1975
Канада	9974	95,0*	На 1973
Китай	9597	~45	На 1969
Ливия	1760	7,1	На 1974
Нидерланды	37	4,6***	1926—1940
-	37	2,0*****	1971—1979
Нигерия	924	13,0*	На 1974
Польша	313	10,6*****	1971—1979
Саудовская Аравия	2400	15,0*	На 1970
США	9364	855*	1890—1974
ФРГ	248	16,2**	1947—1962
Финляндия	337	8,0**	1935—1976
Франция	552	14,0***	1962—1969
Югославия	256	10,3**	1946—1966

* Суммарная длина линий нивелирования I и II классов.

** Второе нивелирование.

*** Третье нивелирование.

**** Четвертое нивелирование.

***** Высотная сеть создана методом гидростатического нивелирования.

С 1877 по 1880 гг. работы по нивелированию в стране не проводились в связи с тем, что Военно-топографический отдел (ВТО) оказывал помощь братской Болгарии, и возобновились они только в 1881 г. Возобновление работ по геометрическому нивелированию не было механическим продолжением работ, начатых в 1873 г., это был новый этап в развитии нивелирной сети страны. Исходя из просьб различных ведомств и крупнейших ученых страны, Военно-топографический отдел Главного штаба (ВТО) в разработал общую программу и новую инструкцию для производства точного геометрического нивелирования в России под названием «Геометрические нивелировки Военно-топографического отдела Главного штаба, возобновленные в 1881 году» [19].

Эта была первая программа развития и построения нивелирной сети в нашей стране. Она исходила не только из необходимости решения практических задач, но

и ставила перед собой научные проблемы, определив основные направления развития точного нивелирования на несколько десятилетий вперед. Программа предусматривала решение таких научно-технических задач, как определение уровней Балтийского, Черного и Азовского морей, связь нивелирной сети России через прусские и австро-венгерские нивелировки с Северным и Средиземным морями, установление 3 - 4 особых марок и принятие мер для их сохранения, с тем, чтобы они «могли послужить для позднейших исследований поднятий континента».

При составлении программы и инструкции для геометрического нивелирования учитывались рекомендации Международной геодезической ассоциации (МГА) [60].

Схема проекта нивелирования 1881 г. была следующей:

1. Линии нивелирования прокладывались от Петербурга на запад по обоим берегам Финского залива. Южная ветвь через Ригу, по побережью Балтийского моря должна была связать русские, немецкие и голландские линии нивелирования.

2. Кронштадтский футшток по нескольким направлениям связывался с футштоками Черного и Азовского морей, а через австро-венгерскую нивелирную сеть с футштоком Триеста.

В нивелирную сеть включались установленные в 1874 г. на Черном море футштоки в Одессе, Севастополе и Очакове. На Азовском море была запроектирована установка футштоков в Геничевске, Таганроге и Мариуполе, что и было осуществлено соответственно в 1876, 1882, 1887 гг. Всего в нивелирной сети было 11 футштоков [60].

3. Проложенная в 1873-1876 гг. линия нивелирования Петербург - Москва продолжалась в юго-восточном направлении на Рязск - Воронеж - Новочеркасск. От Рязска нивелирная линия продолжалась через Сызрань, Самару до Оренбурга. Западные и восточные линии нивелирования соединялись между собой линиями нивелирования, прокладываемыми в широтном направлении. Всего образовывалось восемь полигонов и одна висячая линия Сызрань - Оренбург. Первую очередь нивелирования протяженностью в 13 752 версты намечалось осуществить в течение 12 лет четырьмя наблюдателями.

Вторая очередь нивелирования должна была связать нивелирную сеть Европейской России с Большой Сибирской нивелировкой, проходящей примерно по 52-й параллели, вдоль будущей транссибирской магистрали, а также предполагала нивелирование по линиям Ростов - Владикавказ - Тифлис, Поти - Тифлис - Баку, Сызрань - Царицын - Астрахань и другим направлениям, предусматривающим определение уровней Черного и Каспийского морей.

С 1881 г. нивелирование стали производить в прямом и обратном направлениях, двумя исполнителями, нивелирами ВТО-I. Они были оснащены трубами с увеличением 30-40 крат, а длина визирного луча составляла 85 метров. Стали применять двухсторонние шашечные рейки, одна из сторон была в делениях сажени. Предъявлялись требования, чтобы погрешность нивелирования на 1 км хода не превышала 3 мм. Но, несмотря на тщательность проведения работ, требования к точности выполнены не были, и погрешности превысили установленные предельные значения: случайные погрешности составили порядка 4,0-4,5 мм, а систематические до 1 мм на 1 км хода.

Проанализировав в 1882-1883 гг. выполненные с 1881 по 1882 гг. работы по нивелированию, Д. Д. Геденов предложил изменить конструкцию нивелира ВТО-I, скрепив уровень с трубой, а не с подставкой (коромыслом). По его предложению Военно-топографический отдел Главного штаба (ВТО) изготовил новый нивелир ВТО-II с ценой деления цилиндрического уровня 2-7" и увеличением зрительной трубы 35-40 крат.

В 1883 г. была утверждена Инструкция для проведения нивелирных работ, которая предусматривала на 1 км хода случайную погрешность не более 3 мм, а систематическую - 0,5 мм. При наблюдениях на станции вводился симметричный во времени порядок отсчетов по рейкам, стали обязательными контрольные вычисления в поле. Методика нивелирования, установленная в 1883 г., применялась до 1913 г., а точность соответствовала заявленной в Инструкции [1, 19].

В 1894 г., согласно намеченному плану, под руководством полковника С. Д. Рыльке было проведено первое уравнивание российской нивелирной сети [1, 19], выполненной в 1871–1893 гг. Был составлен каталог, известный под названием «Каталога Рыльке». Каталог содержал высоты 1 092 марок, укрепленных на линиях нивелирных ходов протяженностью 1 300 км. Точность нивелирования из уравнивания характеризовалась погрешностью не более 3 мм на 1 км хода, а как показала их последующая обработка совместно с нивелировками, проложенными в более позднее время, средние поправки на 1 км хода составили 0,28 мм, при максимальных поправках на отдельных участках 1,5—2,7 мм. Первая нивелирная сеть страны 1871-1893 гг. сохраняла свое значение до конца 40-х годов XX столетия, т. е. до времени полного перекрытия ее новыми нивелирными ходами [60].

Впервые было установлено, что уровень Черного, Азовского, Адриатического и Северного морей ниже уровня Балтийского моря. Понижение Черноморско-Азовского уровня по отношению к уровню Балтийского моря оказалось равным 0,4 сажени (0,85 м), а уровней Адриатического моря в Триесте и Северного у Амстердама, вычисленных через Среднеевропейские нивелировки, на 0,32 сажени (0,68 м) и 0,23 сажени (0,49 м) соответственно. Конечно, новейшие данные по абсолютной величине отличаются от полученных в 1894 г., но знак и порядок разности уровней подтверждается.

Эти результаты нивелирных связей уровней морей для С. Д. Рыльке и других ученых-геодезистов того времени были полной неожиданностью. По их представлениям это противоречило теории гравитационного поля Земли и не соответствовало плотностям и солёности вод Черного и Балтийского морей. Считая, что уровень Черного моря никак не может быть ниже уровня Балтийского моря, С. Д. Рыльке для вычисления принимает уровни обоих морей одинаковыми и все вычисления проводит от среднего Балтийско-Черноморского уровня.

Балтийско-Черноморская система высот просуществовала до 1934 г., отвечая практическим запросам картографирования страны.

Инструкция 1883 г. действовала до 1913 г. Затем в соответствии с решениями Международной геодезической ассоциации 1912 г., изменившими требования к точности геометрического нивелирования, в 1913 г. была введена новая «Инструкция для нивелировок высокой точности, производимых Корпусом военных топографов». Инструкция 1913 г. была издана только в 1921 г. Предельные значения

погрешностей нивелирования на 1 км хода по Инструкции 1913 г. не должны были превышать для случайной погрешности $\pm 1,5$ мм, а для систематической 0,3 мм.

Технические требования к приборам не изменились, но длина визирного луча сокращалась до 65 м. Первой линией нивелирования «высокой точности», выполненной в соответствии с требованиями Инструкции 1913 г., была линия Петроград-Одесса. Нивелирование линии проводилось с 1913 по 1917 гг.

Военные геодезисты продолжали выполнение высокоточного и точного нивелирования и после 1917 г. Но основные объемы работ по точному и высокоточному нивелированию в стране, начиная с 20-х годов, выполнялись уже Высшим геодезическим управлением (ВГУ), Главным геодезическим управлением (ГГУ), Главным управлением государственной съемки и картографии (ГУГСК), а затем ГУГК при СМ СССР. Преодолев огромные трудности, подразделения ВГУ за первые 5 лет своего существования с 1919 по 1923 г. выполнили 1 750 км высокоточного и точного нивелирования [19].

В целях координации работ Высшего геодезического управления (ВГУ) и Военно-топографического управления (ВТУ) с февраля 1924 г. в стране начало функционировать постоянное «Совещание ответственных работников ВТУ Штаба РККА и ВГУ ВСНХ» (сокращенно «Совещание ВТУ, ВГУ»).

Это совещание в 1924 г. по предложению Ф. Н. Красовского рассмотрело и утвердило «Главные основания составления проекта рядов триангуляции 1 класса и проекта полигонов линий нивелирования высокой точности в пределах территории Европейской части СССР».

В основу проекта нивелирования высокой точности были положены следующие главные требования:

1. Основная сеть высокоточного нивелирования должна состоять из полигонов с периметром 800-1000 км. Полигоны на востоке и юго-востоке России могли превышать указанные размеры.

2. В эту сеть не должны входить прежние нивелирные ходы, выполненные с меньшей точностью по сравнению с точностью, предъявляемой к современному высокоточному нивелированию. При необходимости такие нивелирные ходы должны переделываться.

3. Сеть нивелирных полигонов по возможности должна быть согласована с полигонами триангуляции 1 класса и охватывать всю европейскую часть СССР до Урала.

Для технического руководства при производстве высокоточного нивелирования Высшее геодезическое управление (ВГУ) в 1925 г. ввело новую «Инструкцию по нивелированию высокой точности», составленную при участии и под редакцией Ф. Н. Красовского. Эта инструкция установила для высокоточного нивелирования более высокие требования к точности. Средние квадратические погрешности на 1 км хода не должны были превышать для случайной ± 1 мм, а для систематической $\pm 0,3$ мм. Новые требования полностью соответствовали рекомендациям Международной геодезической ассоциации.

В дальнейшем развитии нивелирной сети страны значительную роль сыграли решения Первого (19-22 апреля 1926 г.) и Второго (11-14 апреля 1927 г.) геодезических совещаний, созванных Геодезическим комитетом Госплана СССР.

Первое геодезическое совещание, уделив большое внимание развитию и приведению в порядок существующей нивелирной сети страны, приняло решение:

- считать нуль Кронштадтского футштока по-прежнему основным нулем всех высот СССР;

- осуществить в самом непродолжительном времени нивелирные связи всех футштоков, расположенных на Белом, Черном, Балтийском морях и Тихом океане;

- провести общее уравнивание нивелирной сети и издать каталоги высот.

Второе геодезическое совещание при Госплане СССР также отметило: «Необходимо отнести высоты в стране к одной и той же точке, в качестве таковой точки принять нуль Кронштадтского футштока» (Геодезист, 1927, № 6) [91].

В его решении отмечалось: «Учитывая большой научный интерес и громадную практическую важность существования медленных колебаний суши, признать своевременным изучение путем повторных нивелировок высокой точности и по возможности повторных триангуляционных работ в тех областях, в которых такие движения можно считать заведомо установленными, например, в Каспийско-Черноморской области и в районе, примыкающем к Финно-Скандинавскому щиту, поручая эту работу авторитетным учреждениям» [91].

В соответствии с решением Второго геодезического совещания в 1933 г. Главным геодезическим управлением (ГГУ) под руководством А. М. Вировца было выполнено новое, второе после 1894 г., уравнивание нивелирной сети страны. Оно включало нивелировки, исполненные с 1875 по 1932 гг., проложенные в европейской части СССР.

В каталог высот марок и реперов высокоточного и точного нивелирования [19] вошли линии общим протяжением 69 450 км; почти половина из них была проложена подразделениями Высшего геодезического управления (ВГУ) и заменившим его Главным геодезическим управлением (ГГУ). Если за период с 1919 по 1924 гг. ВГУ, ГГУ было выполнено всего 1 750 км нивелирования, то с 1925 по 1929 гг. – 13 500 км, а с 1930 по 1934 гг. – 21 100 км.

В уравнивание 1933 г. были включены высокоточные нивелировки, проложенные по 106 линиям. Точность нивелирования по результатам уравнивания характеризовалась следующими поправками на 1 км хода: до 0,1 мм в 69% линий; до 0,2 мм в 17% линий и до 0,5 мм в 14% линий при наибольшей поправке 0,7 мм.

Уровень Черного моря на футштоках Севастополя, Одессы, Феодосии, Новороссийска оказался ниже нуля Кронштадтского футштока на 0,41 м, а Азовского моря — на 0,39 м. Уравнивание 1933 г. не охватывало всю страну. Для Сибири и Дальнего Востока в 1931 г. Военно-топографическим управлением (ВТУ) был составлен «Временный каталог сибирских нивелировок» [60]. Высоты в этом каталоге были вычислены от нуля Кронштадтского футштока. Но вследствие большой разности средних уровней Балтийского моря и Тихого океана (1,873 м) было признано целесообразным на Дальнем Востоке и в Восточной Сибири использовать Тихоокеанскую систему счета высот.

Впоследствии, по мере проложения новых нивелирных линий, к каталогу составлялись дополнения. Важнейшими из них были:

- 1) первое и второе дополнения нивелирования, выполненного на Украине, в Белоруссии, на Урале и в других районах страны;

2) каталог нивелировок Кавказа, заменивший «Временный каталог высот марок Кавказской нивелирной сети», составленный Н. И. Шлепневым и включивший нивелировки, выполненные на Кавказе до 1915 г. общим протяжением 3,5 тыс. км. Высоты в нем были, вычислены от уровня Черного моря;

3) каталог нивелирования Средней Азии, составленный ВТУ в 1935 г., и др.

В целях быстрее удовлетворения возросших потребностей народного хозяйства в высотной основе, в 1933 г. было принято решение ввести новую классификацию; нивелирование стали делить на высокоточное и точное. Для высокоточного нивелирования снова устанавливались допуски Инструкции 1913-1921 гг. Случайная погрешность на 1 -км хода не более 1,5 мм, систематическая не более 0,3 мм, а для точного нивелирования 2,0 и 0,4 мм соответственно. Таким образом, требования к точности нивелирования по сравнению с Инструкцией 1925 г. снижались.

В 1938 г. Главным управлением государственной съемки и картографии (ГУГСК), заменившим Главное геодезическое управление (ГГУ), была издана новая инструкция по нивелированию, в которой названия «высокоточное» и «точное» заменялись соответственно на нивелирование I и II разрядов. Показатели точности при этом не изменились. Положительным в этой инструкции было то, что линии нивелирования, кроме стенных марок, впервые закреплялись на местности грунтовыми реперами, в том числе, хотя и редко, фундаментальными и даже вековыми.

Государственная система высот

Государственной системы высот 1932 года не было. В соответствии с работой «Нивелирная сеть СССР» [60] результатом уравнивания государственных нивелирных сетей 1933 года был «Каталог высот марок и реперов высокоточного и точного нивелирования, исполненных Главным геодезическим управлением и Управлением военных топографов в Европейской части СССР с 1875 по 1932 гг.» и «Временный каталог высот Сибирских нивелировок с 1901 по 1928 гг.».

Следует отметить несколько моментов, касающихся двух следующих государственных систем высот СССР.

Уравнивание и каталогизация основной нивелирной сети СССР, начатые в 1946 г., были успешно завершены в 1950 г. Уравниванию предшествовала разработка и утверждение 7 апреля 1946 г. нормативного акта большой государственной важности - постановления Совета Министров СССР «О введении единой системы геодезических координат и высот на территории СССР». Согласно этому постановлению, за исходный уровень для вычисления высот на всей территории СССР принималось Балтийское море - нуль Кронштадтского футштока. Вводимая система высот постановлением коллегии ГУГК от 12 августа 1946 г. была названа «Балтийской» и должна была представлять систему ортометрических высот, полученную в результате уравнивания нивелировок I и II классов [19].

Балтийская система высот 1977 года, после очередного цикла уравнивания нивелирной сети страны была введена как система нормальных высот приказом Главного управления геодезии и картографии при Совете Министров СССР (ГУГК при СМ СССР) и Военно-топографического управления Генерального штаба (ВТУ ГШ) от 05 июня 1978 г. № 7/155 «О введении в действие каталога главной высотной

основы СССР». Нормативно-правовых актов по данному вопросу не издавалось [19].

Система высотного обеспечения Российской Федерации

В настоящее время на территории Российской Федерации действует Балтийская система высот 1977 года. До настоящего времени в развитии системы высотного обеспечения основным средством создания высокоточной высотной основы остаётся метод геометрического нивелирования. Государственная нивелирная сеть России разделяется на нивелирные сети I, II, III и IV классов. Государственные нивелирные сети высокоточного нивелирования I и II класса являются основой системы нормальных высот, и получили название главной высотной основы (ГВО). Общая протяжённость сетей нивелирования I и II класса составляет порядка 400 тысяч км. Схема главной высотной основы представлена рис. 36. На основе реперов нивелирования I и II класса развивается сеть государственного нивелирования III и IV класса.

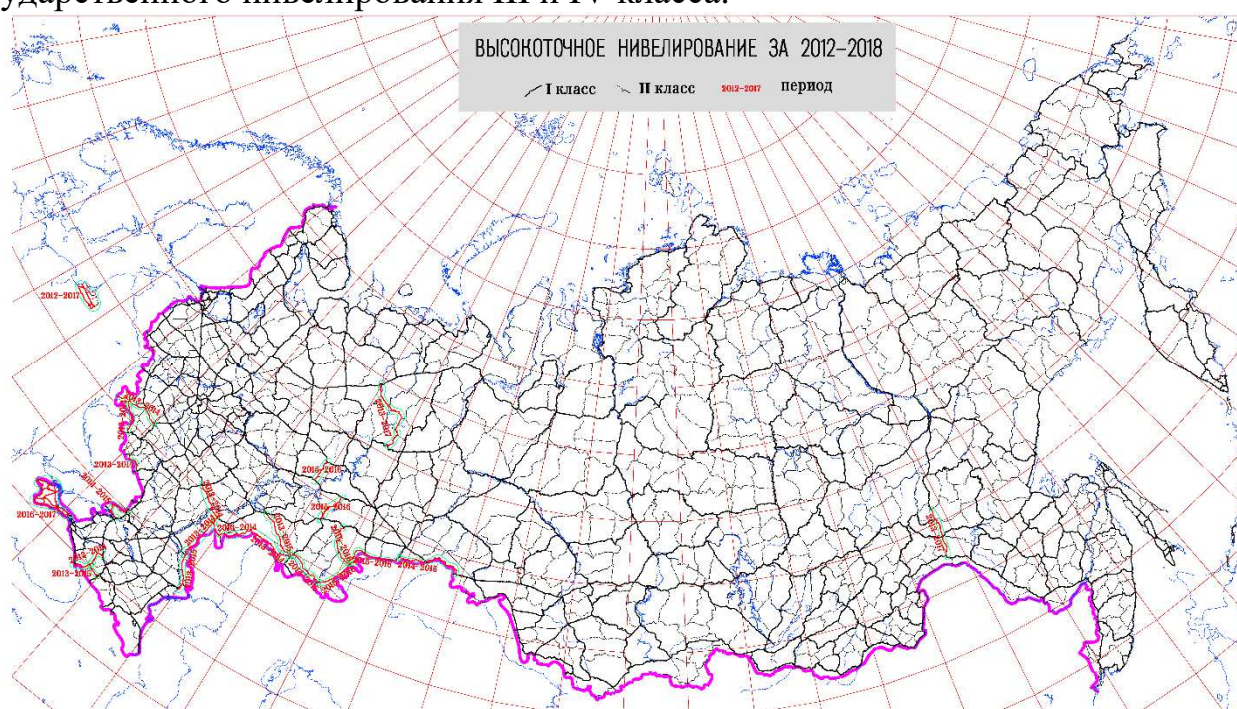


Рис. 36. Схема главной высотной основы России в 2019 г. [90]

При использовании геометрического нивелирования в системе высотного обеспечения нормальные высоты определяются от одного исходного пункта относительными методами передачи высот. За исходный пункт на территории России принят уровневый пост, расположенный в городе Кронштадте (Кронштадтский футшток), в котором средний многолетний уровень Балтийского моря соответствует нулю в значении нормальной высоты. При использовании уровневых постов в качестве исходных пунктов для определения начала счета высот подразумевается совпадение среднего уровня моря в этих пунктах с поверхностью геоида. Таким образом, вся нивелирная сеть огромной протяженности на территории России опирается на один исходный пункт, не имеет внешнего контроля и уравнивается как свободная система.

Главная высотная основа России модернизируется в соответствии с ведомственными Программами модернизации ГВО, которые определяют перечень

линий нивелирования, на которых выполняются повторные измерения, перечень новых линий высокоточного нивелирования. Последние работы по модернизации и развитию ГВО выполнялись по Программе модернизации ГВО на период 1991-2000 гг. («Программа 1991») и по Программе модернизации ГВО на период 2001-2010 гг. («Программа 2010»). Из запланированных «Программой 1991» объемов нивелирования было выполнено 45% объемов работ по нивелированию I класса и 22% по нивелированию II класса. Из запланированных «Программой 2010» объемов нивелирования I и II классов выполнено всего 17.3% нивелирования I класса и 4.8% нивелирования II класса. В последнее время работы по модернизации и развитию ГВО осуществляются в рамках двух мероприятий Росреестра - «Оптимизация Главной высотной основы (ГВО) в пограничных областях России с целью формирования полигонов I класса» и «Модернизация Главной высотной основы (ГВО) России с целью обновления высот по линиям нивелирования ГВО, измеренных в 60-х и 70-х годах прошлого столетия». Одновременно с этим выполняются работы по подготовке исходных данных для нового уравнивания ГВО и установления новой государственной системы нормальных высот [1, 90].

Геометрическое нивелирование является наиболее трудоёмким и дорогостоящим методом в системе геодезического обеспечения. Развитие спутниковых технологий создаёт возможность эффективного использования глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) в системе высотного обеспечения. Строгое в рамках теории Молоденского соотношение (46) $H^y = H - \zeta$, устанавливающее связь гравиметрической высоты квазигеоида ζ , геодезической H и нормальной высот H^y , можно по-прежнему использовать для косвенной интерполяции. Подобно тому, как при астрономо-гравиметрическом нивелировании такая косвенная интерполяция высоты квазигеоида помогала передавать геодезические высоты над референц-эллипсоидом от исходного пункта во все пункты ГГС, спутниковое нивелирование помогает переносить нормальную высоту на определяемые пункты с исходных на большие расстояния [27].

Таким образом, применение спутниковых технологий в системе высотного обеспечения требует построения точного квазигеоида по гравиметрическим данным. В свою очередь при выполнении гравиметрических измерений необходимо знание нормальной высоты в гравиметрических пунктах. Эти требования обуславливают тесную взаимосвязь в развитии систем координатного, высотного и гравиметрического обеспечения на новом, более высоком уровне точности [27,84].

Важным аспектом применения гравиметрических данных и спутниковых данных в системе высотного обеспечения является развитие метода спутникового нивелирования, как возможной альтернативы наиболее трудоёмким и дорогостоящим методам традиционного геометрического нивелирования.

В данном случае использование современных спутниковых технологий в системе высотного обеспечения не следует рассматривать в качестве альтернативы высокоточного геометрического нивелирования I, II классов. На данном этапе развития системы геодезического обеспечения методы спутникового нивелирования реально применять при определении нормальных высот с точностью государственного нивелирования III, IV классов.

Данные высокоточных ГНСС измерений в системе высотного обеспечения следует использовать в целях контроля главной высотной основы и достоверности современных вертикальных движений земной коры, а так же повышения точности передачи значений нормальных высот от исходного пункта (Кронштадтский футшток) на территорию Восточной Сибири и Дальнего Востока.

Если по исследованиям ЦНИИГАиК, выполненным ранее для Европейской части России, совместный анализ нивелирных и спутниковых данных с использованием равенства (1) и данных высот квазигеоида подтверждает оценку точности ГВО, то для территории Восточной Сибири и Дальнего Востока различие спутниковых и нивелирных данных втрое превосходит их априорную оценку точности.

В этих условиях, принятая концепция связи пунктов ФАГС с реперами нивелирования I класса и пунктов ВГС с реперами нивелирования I или II класса обеспечит решение задачи контроля и повышения достоверности данных о точности ГВО. Непрерывность измерений на постоянно действующих пунктах ФАГС и повторные измерения на пунктах ВГС (через 5-10 лет) позволят судить о достоверности и однозначности нивелирных данных о вертикальных движениях земной поверхности.

Таким образом, в направлении развития системы высотного обеспечения в современных условиях наряду развитием повторного геометрического нивелирования (в первую очередь нивелирования I класса) и внедрением современных цифровых нивелиров необходимо использование данных постоянно действующих пунктов ФАГС и повторных измерений на пунктах ВГС в целях контроля и повышения точности ГВО.

Другим важным направлением развития современной системы высотного обеспечения в настоящее время является разработка новых принципов отсчёта нормальных высот.

При существующих принципах установления системы отсчета высот относительно среднего многолетнего уровня моря в одном исходном пункте создаётся ряд противоречий, которые не могут быть разрешены традиционными методами геодезических измерений. Однако эти противоречия не могут быть игнорированы при существующей точности современных спутниковых методов и при решении фундаментальных задач современной геодезии. Эти противоречия связаны с тем, что различия средних многолетних уровней моря на разных уровнемерных постах могут достигать метра и более (рис. 37).

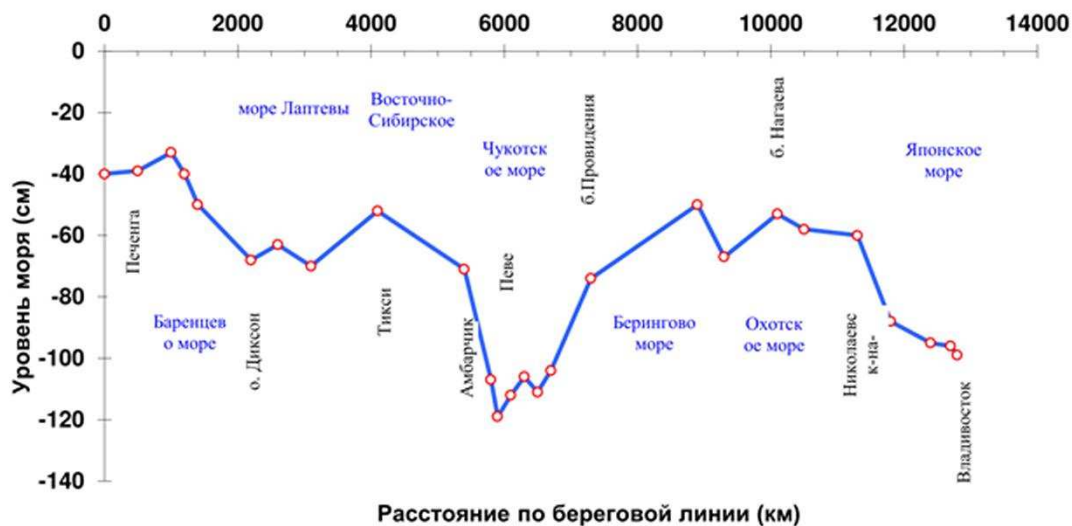


Рис. 37. Средние уровни морей Северного Ледовитого и Тихого океанов в Балтийской системе высот [27, 84]

Для решения большинства задач традиционной геодезии эта неопределенность не вызывала особых проблем, поскольку точность системы высот порядка одного метра удовлетворяла требованиям к точности редукции базисных измерений на поверхность эллипсоида. Но и к тому же, что самое главное, не существовало других методов для установления системы отсчета высот.

В настоящее время высокоточные средства спутниковых измерений геодезической высоты результатам их совместной обработки с гравиметрическими и нивелирными данными обеспечивают возможность создания новых принципов отсчёта нормальных высот.

Высоты квазигеоида, определяемые по гравиметрическим данным, теоретически строго определяются относительно общего земного эллипсоида, центр которого совмещен с центром масс Земли. Размер большой полуоси общего земного эллипсоида в этом случае определяется условием равенства нулю интеграла по всей поверхности Земли σ от гравиметрических высот квазигеоида ζ , вычисленных по гравиметрическим данным:

$$\int_{\sigma} \zeta d\sigma = 0. \quad (47)$$

Именно это свойство гравиметрических высот квазигеоида обеспечивает их эффективное использование при решении проблемы установления единой общемировой системы нормальных высот, и как следствие возможность контроля геоцентричности систем координат.

Основная идея новых принципов установления единой общемировой системы нормальных высот состоит в том, что единую систему отсчета высот определяет поверхность общего земного эллипсоида и, принимаемый за нормальный, потенциал U_0 на поверхности этого эллипсоида. Понятие геоида в этом случае формулируется как эквипотенциальная поверхность с потенциалом W_0 равным нормальному U_0 на поверхности общеземного эллипсоида. В этом случае не постулируется равенство нулю нормальной высоты на уровнемерных постах, принятых в качестве исходных. При этом подходе исходные нивелирные пункты вообще в принципе отсутствуют, как отсутствует исходный пункт в общеземной

геоцентрической системе координат. При этом систему координат определяет совокупность постоянно действующих геодезических пунктов, используемых для установления и периодического уточнения системы координат. На территории России такой совокупностью пунктов являются пункты ФАГС, а для распространения системы координат служат пункты ВГС, СГС-1, ГГС 1 – 4 классов, пункты дифференциальных станций [36, 83, 84].

Систему нормальных высот определяет совокупность геодезических пунктов, в каждом из которых с высокой точностью по спутниковым данным определена геодезическая (эллипсоидальная) высота H , нормальная высота H^N по нивелирным данным и высота квазигеоида ζ по гравиметрическим данным. На территории России такой совокупностью пунктов могут служить специально созданные исходные пункты Главной высотной основы в число которых могут быть включены пункты ФАГС конструкция центров которых позволяет их использование в качестве исходных пунктов ГВО. Для распространения системы нормальных высот должны служить пункты сети нивелирования I и II класса (ГВО) и пункты сети нивелирования III и IV класса, определяемые технологиями геометрического или спутникового нивелирования.

Применение спутниковых данных в системе высотного обеспечения во всех перечисленных выше направлениях требует в первую очередь построения детальных моделей гравиметрических высот квазигеоида по уровню точности, сопоставимой с нивелирными и спутниковыми данными.

К направлениям первоочередных работ по уточнению гравиметрических высот квазигеоида в соответствии с современными требованиями в первую очередь относятся:

- создание детальных цифровых гравиметрических карт аномалий Буге на территории России;
- построение высокоточной модели рельефа по современным топографическим картам и зарубежной информации на основе космических аппаратов в целях учёта редукции Буге при определении аномалий силы тяжести в редукции Фая (аномалия в свободном воздухе плюс топографическая поправка);
- разработка технологий построения планетарных моделей гравитационного поля Земли (ГПЗ) высокого уровня детальности и точности.

Таким образом, проблема изучения гравитационного поля Земли (ГПЗ), являясь самостоятельным направлением научной и производственной деятельности, одновременно входит неотъемлемой составной частью в систему высотного и общего геодезического обеспечения.

В работе «Оценка изложения теории высот в отечественной литературе» [73, 108] предложено следующее взаимодействие геометрического и спутникового нивелирования.

Средний уровень моря и морская топографическая поверхность отклоняются от уровенной поверхности (геоида) в пределах двух метров по причине неоднородности морской воды (различные плотность, солёность, разность давления, температуры), течений, ветровых нагонов, поэтому при уравнивании обширных высотных сетей приходится использовать не все уровенные посты, а один исходный пункт на побережье. Но если в доспутниковую эпоху геометрическое

нивелирование было единственным способом связать уровни различных морей, то постепенно точность определения геодезических высот и гравиметрических аномалий высоты сравнялась, став меньше накопления систематических ошибок высокоточного геометрического нивелирования. В условиях, когда наземное геометрическое нивелирование не позволяет передать разность нормальных высот на большие расстояния (от 1 000 км) точнее спутникового нивелирования, высокоточное геометрическое нивелирование следует в перспективе применять лишь для распространения системы высот в главной высотной основе, считая исходными пунктами лишь те, которые полно обеспечены гравиметрической съемкой в очень большом радиусе (для интегрирования в ближней зоне при вычислении аномалии высоты).

На рис. 38 показаны наиболее выгодные места на территории России для организации исходных пунктов при установлении государственной системы высот, согласованной с мировой системой высот; указано, в окрестности каких населенных пунктов удобно выбрать фундаментальный или вековой репер, а также для наглядности приведены радиусы ближней зоны при вычислении аномалии высоты численным интегрированием [73, 108].

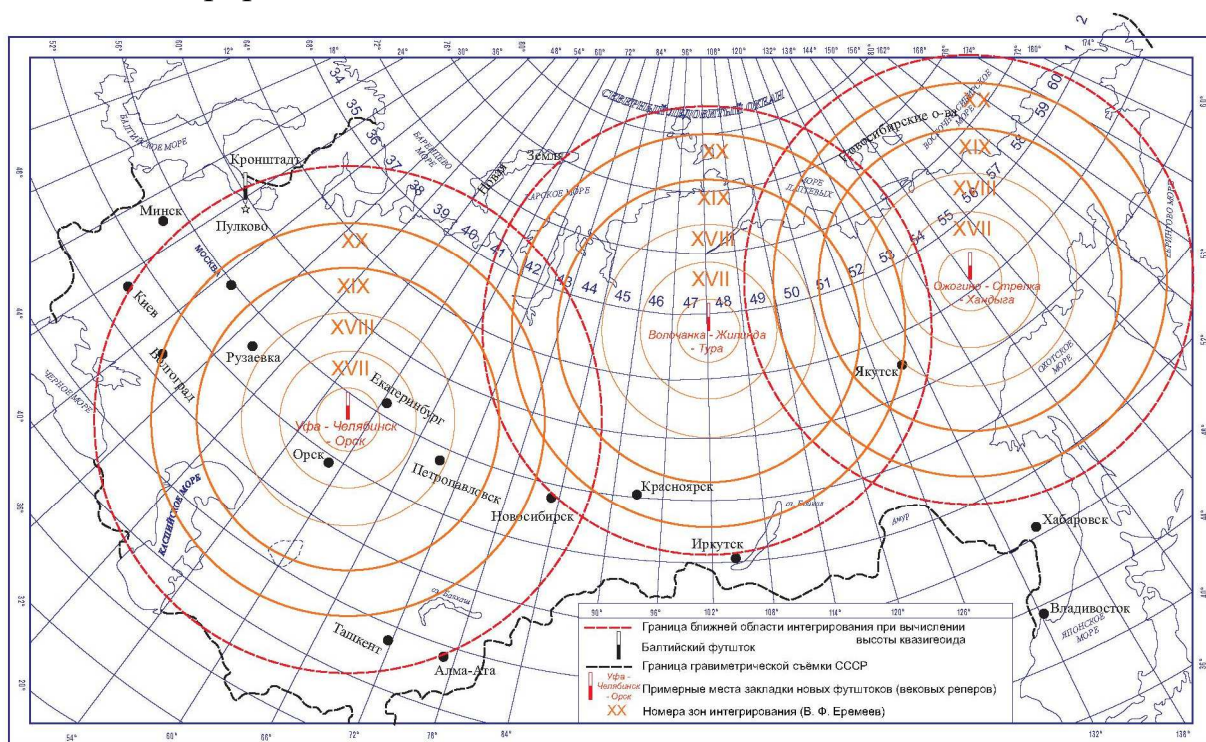


Рис. 38. Примерные места исходных пунктов на территории России [73, 108]

В настоящее время Главная высотная основа Российской Федерации включает в себя 188 нивелирных полигонов I класса. Периметры полигонов колеблются в пределах от 0,2 до 4,7 тыс. км. Замыкание измерений в нивелирных полигонах I класса определяется периодом от 20 до 40 лет. Анализ полигонов I класса ГВО показал, что 28 из них имеют недопустимые невязки.

Из анализа разностей $\Delta = H - H^y$ по всей стране получена величина систематической погрешности $\sigma = 0,07$ мм/км и она накапливается с одним знаком [108].

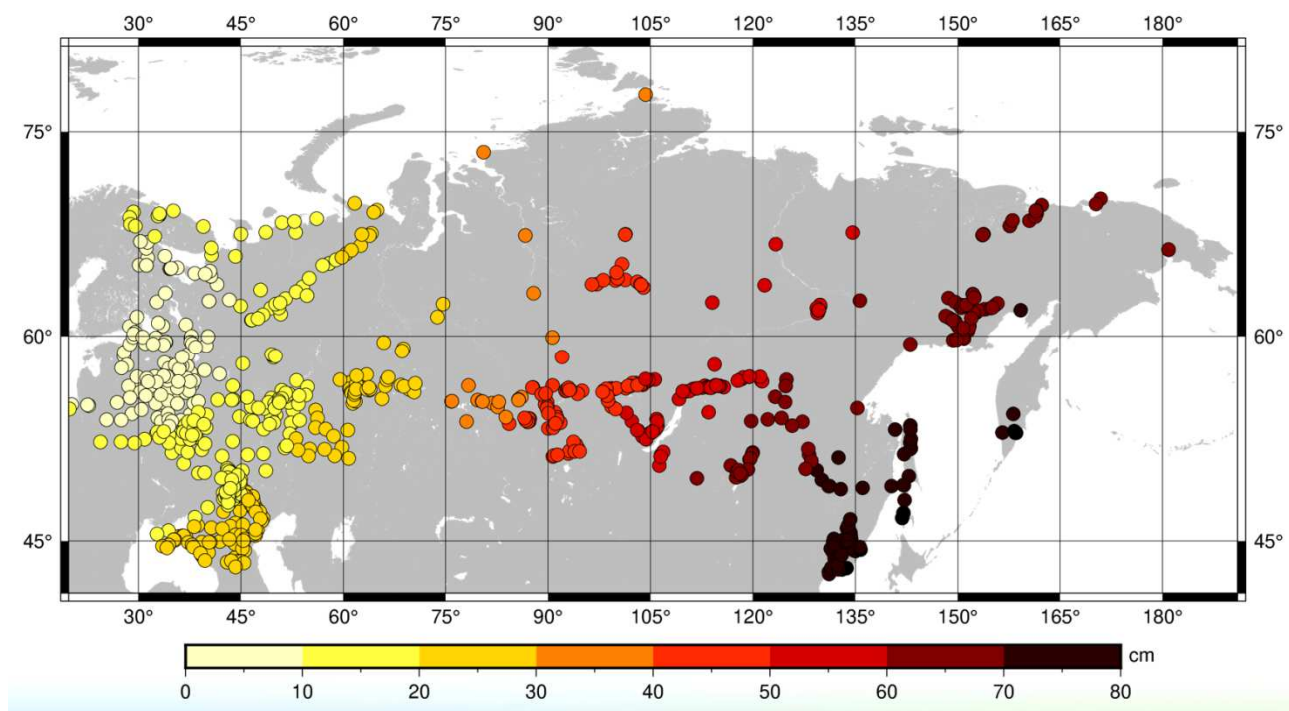


Рис. 39. Средние квадратические погрешности передачи высоты [108]

В таблице 18 приведены накопленные погрешности для некоторых городов.

Таблица 18

Расстояние от футштока, км	Город	Накопленные погрешности, см
700	Москва	- 5
2 500	Екатеринбург	- 18
5 900	Иркутск	- 41
9 800	Владивосток	- 67

Вопросы установления европейской и единой общеземной систем высот

Глобализация современной геодезии обуславливает необходимость международной интеграции в решении фундаментальных проблем. Именно широкая международная интеграция обеспечила создание достаточно равномерно распределенной по всей территории земного шара опорной геодезической сети и построение общеземной высокоточной геоцентрической системы координат.

Решение проблемы установления европейской и единой общеземной системы высот на современном уровне точности возможно также только при условии широкой международной кооперации.

Первоочередными и необходимыми элементами такой кооперации являются:

- нивелирная связь государственных (национальных) нивелирных сетей стран Европы;
- создание единого массива данных средних аномалий по трапециям 5'x5' для Северного полушария;
- построение точного квазигеоида Евразийского континента;
- построение точных планетарных моделей гравитационного поля Земли с использованием современных космических комплексов GRACE, CHAMP и GOCE.

Итогом результатов на основе такой кооперации будет построение единой общеевропейской, а затем общеземной систем нормальных высот.

Традиционно за уровенную поверхность, относительно которой определялись высоты точек земной поверхности, принималась осреднённая невозмущенная поверхность мирового океана. А в качестве начала счёта высот принимался средний уровень моря в одном исходном пункте. Поскольку в действительности в различных морях средний уровень может значительно (в пределах нескольких дециметров) отличаться друг от друга, то и системы высот, распространяемые от среднего уровня этих морей, будут отличаться друг от друга.

Только на территории Европы около 10 государственных нивелирных сетей, для каждой из них использовалась своя система высот, свой исходный пункт (уровнемерный пост), а следовательно, и «свой геоид». До развития спутниковых технологий не существовало других методов установления начала счёта нормальных высот, кроме футштока. В настоящее время создание глобальных навигационных систем создаёт условия для принципиально нового подхода к решению этой проблемы. На рис. 40 приведена схема расположения футштоков государственных нивелирных сетей государств Европы [27].

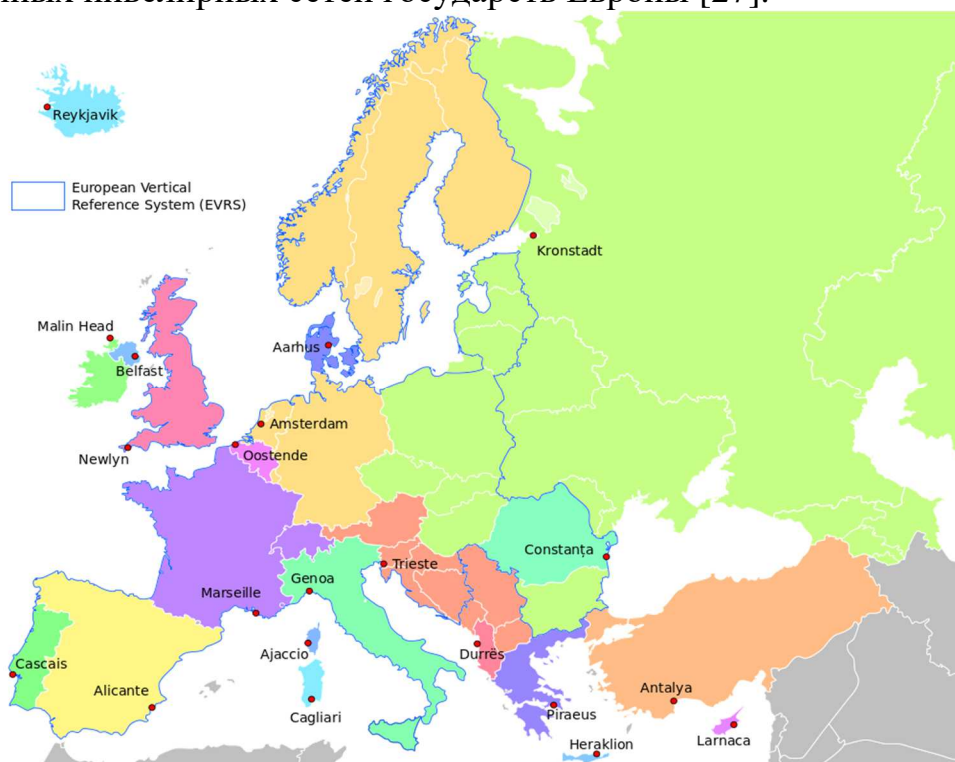


Рис. 40. Футштоки государственных нивелирных сетей Европы.

На рис. 41 приведены поправки в национальные системы высот за переход к одной из практических реализаций этой системы EVRF2007.

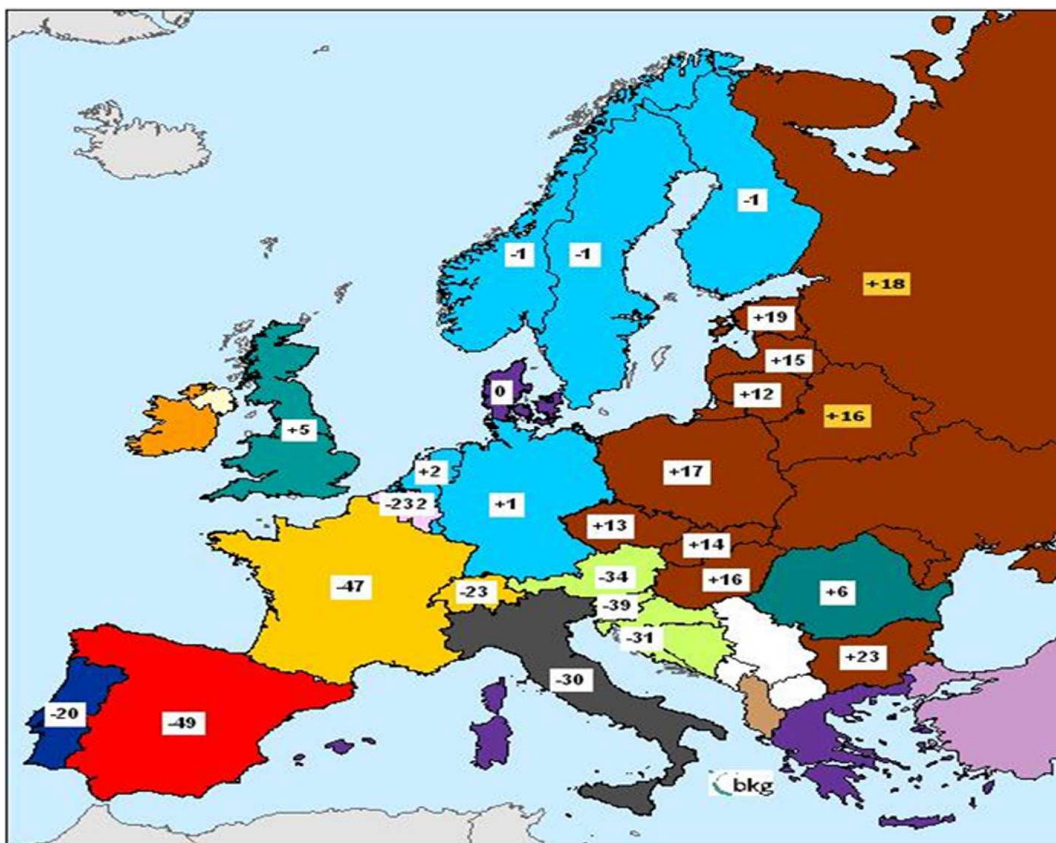
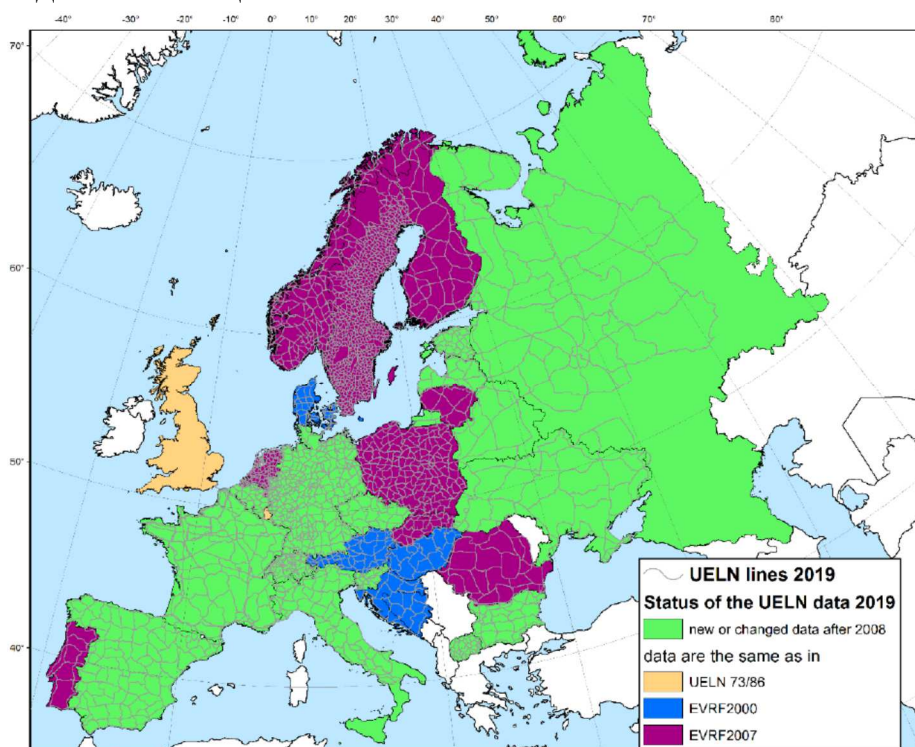


Рис. 41. Поправки в национальные системы высот при переходе к EVRF2007

Созданием общеевропейской нивелирной сети UELN (United European Leveling Network, UELN) с 80-х годов прошлого века занимается Федеральное агентство картографии и геодезии Германии BKG (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, BKG) в рамках реализации решений Европейской подкомиссии Международной ассоциации геодезии. Вначале в проекте участвовало 20 стран, позднее присоединились еще пять.



Российская Федерация участвовала в данных работах в рамках соглашений о научном сотрудничестве, заключенных Роскартографией с BKG и Финским геодезическим институтом (FGI).

В настоящее время Европейская система высот EVRS в реализации EVRF2019 действует только на территории UELN, которая более или менее ограничена материковой Европой. Для определения высот в системе EVRS на островах подходящим методом оказалось использование ГНСС и европейского квазигеоида. Следует заметить, что уравнивание UELN выполнено в геопотенциальных числах, а окончательный каталог высот представлен в геопотенциальных числах и в нормальных высотах.

Следуя тенденции глобализации и упрощая практическое применение теории Молоденского, нужно принять общее начало счета высот и установить равенство $U_0 = W_0$, выделив еще один геоид – земную уровенную поверхность, потенциал W_0 которой равен потенциалу U_0 силы тяжести на отсчетном эллипсоиде [27].

Общий земной эллипсоид представляет Землю в среднем, по большей части на океанах (в связи с этим проф. Л. В. Огородова даже использовала термин «океаноид»). Общий земной эллипсоид, принимаемый в качестве нормального, должен удовлетворять условию (47):

$$\int_{\sigma} \zeta d\sigma = 0.$$

для всей поверхности Земли σ . Следовательно, величина $U_0 = W_0$ представляет потенциал близко к среднему его значению W_0 и на океанах. Таким образом, решение $U_0 = W_0$ будет также оптимальным приближением к геоиду в смысле Брунса и Гаусса-Листинга в среднем для всей Земли.

Поверхность общего земного эллипсоида является отсчетной при определении эллипсоидальных (геодезических) высот. Именно применение нормальных высот H^{γ} и высот квазигеоида ζ позволяет строго и однозначно согласовать нивелирные данные с результатами определения эллипсоидальных (геодезических) высот H по спутниковым данным. Это утверждение ни в коей мере не исключает возможность использования геопотенциальных чисел, поскольку между величинами нормальной высоты и геопотенциала существует строгое соответствие:

$$W_i = \gamma_m H_i^{\gamma}. \quad (48)$$

В соответствии с теорией М. С. Молоденского сумма нормальной высоты и высоты квазигеоида теоретически равна геодезической высоте точки физической поверхности Земли над общим земным эллипсоидом, принятым за нормальный:

$$H = H^{\gamma} + \zeta, \quad (49)$$

где H – геодезическая высота; H^{γ} – нормальная высота; ζ – высота квазигеоида.

Несоблюдение этого условия обуславливается ошибками измерений и различиями региональных систем отсчета нормальных высот.

Значение поправки к данной –ой региональной системе высот за переход к общеземной будет определяться по всей совокупности N геодезических пунктов, для которых известны эти величины:

$$\Delta H_i^Y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(H_i - (H_i^Y + \zeta_i) \right). \quad (50)$$

Таким образом, фиксированный закрепленный на местности исходный пункт, в котором нормальная высота равна нулю, отсутствует, но это не является практической трудностью. Нормальная высота равна нулю в той точке земной поверхности, в которой реальный потенциал W_i равен нормальному U_0 на поверхности общего Земного эллипсоида. В этой же точке совпадают поверхности геоида и квазигеоида $W_i = W_0 = U_0$. В принципе положение этой точки может быть и не известно.

В этих условиях особое значение приобретает проблема построения новых современных планетарных гравитационных моделей. В 2012 году было выполнено построение новой глобальной гравитационной модели ГАО-2012 с использованием данных проектов для решения проблемы построения гравиметрического геоида.

С использованием моделей ГАО-2012, EIGEN-5C и EGM2008 была выполнена оценка возможности определения поправок к региональным системам нормальных высот в соответствии с предлагаемой технологией. Результаты такой оценки приведены в табл. 19.

Таблица 19

Регион	Средние разности $\Delta H_{\text{ср}}$, м		
	ГАО-2012	EIGEN-5C	EGM2008
США (6 169 пунктов)	1,0421	1,0367	1,0277
Германия (87 пунктов)	0,6004	0,5962	0,5901
Россия (526 пунктов)	0,2376	0,2040	0,2016
Западная часть России	0,4051	0,3564	0,3593
Восточная часть России	-0,0226	-0,0327	-0,0434

Таким образом, величины $\Delta H_{\text{ср}}$ для разных групп характеризуют отличие систем высот для территорий США, Европы и России от общеземной, устанавливаемой в соответствии с изложенными принципами. Подтверждением достоверности полученных результатов являются данные об отличии Амстердамской системы высот и Кронштадтской по нивелирным данным. По нивелирным данным и по данным модели ГАО-2012 эта разность равна 16 см.

Международная система отсчета высот - International Height Reference Frame (IHRF), принятая Международной ассоциацией геодезии (IAG) в своей Резолюции № 1 на XXVI Генеральной Ассамблее Международного геодезического и геофизического союза - МГГС (International Union of Geodesy and Geophysics, IUGG) в Праге в 2015 году, содержит два нововведения:

- официально принята концепция среднего прилива / поверхности (mean tide / mean crust);

- в качестве отчетной поверхности принята поверхность геоида.

Потенциал на поверхности геоида - гравитационная постоянная:

$$W_0 = W_0^{\text{IHRF}} = 6,26368534 \cdot 10^7 \text{ м}^2/\text{с}^2.$$

Измеряемая физическая величина - геопотенциальное число:

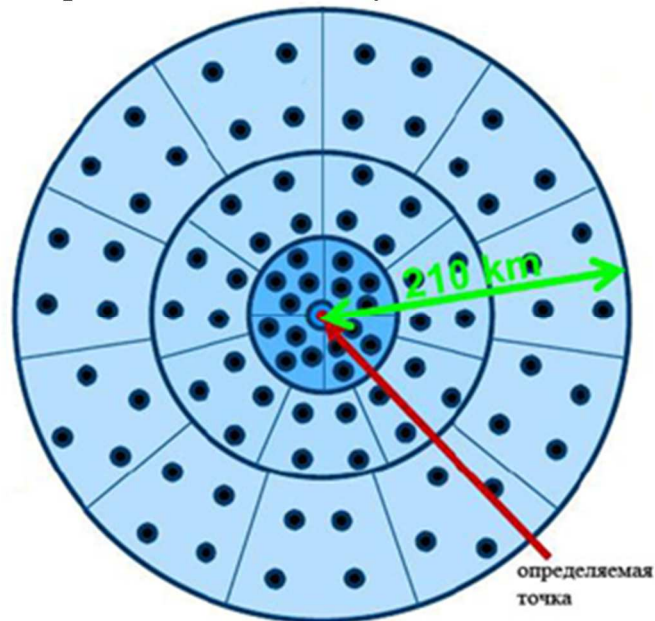
$$\Delta C_p = W_0 - W_p ,$$

где W_p - гравитационный потенциал в исследуемой точке.

Требования к точности измерений:

$$\delta C_p = 10^{-2} \text{ м}^2/\text{с}^2 \ (\delta H \approx 1 \text{ мм}) .$$

С использованием таких нововведений должны создаваться не привязанные к уровням морей и береговым линиям футштоки Международной системы отсчета высот (IHRС). Определение гравитационного потенциала в местах расположения футштоков необходимо производить по следующей схеме.



Расстояние от определяемой точки (радиус окружности)	Количество секторов	Общее количество гравиметрических измерений
10 км	1	4
50 км	4	16
110 км	7	28
210 км	11	44

Рис. 43. Схема определения гравитационного потенциала в местах расположения футштоков

Другим вариантом является предполагаемая реализация международной сети квантовых футштоков, основанных на эффекте Саньяка. Общая схема расположения квантовых футштоков Международной системы отсчета высот (IHRС) приведена на рисунке.



Рис. 44. Предполагаемая реализация международной сети квантовых футштоков

Развитие новых технологий и средств геодезических измерений привело к необходимости изменений в принципах построения всей системы геодезического обеспечения. Эти принципиальные изменения происходят не только в структуре построения геодезических сетей (спутниковых, нивелирных и гравиметрических), но в характере взаимосвязей составляющих системы геодезического обеспечения: координатной, высотной и гравиметрической. Это связано в первую очередь с повышением точности системы координат ГСК-2011 практически на порядок по сравнению с СК-95 (на два порядка по сравнению с СК-42) и изменением принципов ориентации осей координат в теле Земли относительно центра масс и оси вращения.

Внедрение в практику научной и хозяйственной деятельности современной системы геодезического обеспечения и её дальнейшее развитие обуславливают необходимость решения целого комплекса научно-технических задач, включая совершенствование вопросов законодательного и правового характера.

Решение вопросов дальнейшего развития системы высотного и гравиметрического обеспечения в первую очередь связано с совершенствованием сети ГВО, как основы государственной системы нормальных высот. Это совершенствование, по нашему мнению, должно идти в двух направлениях - создание 3-4 исходных пунктов ГВО, с выполнением на них комплекса работ от закладки группы центров (исходных, рабочих, контрольных) до выполнения спутниковых, нивелирных и гравиметрических работ по их связи с существующими сетями пунктов ГВО, ФАГС, ВГС и пунктами фундаментальной гравиметрической сети.

Проектирование новых исходных пунктов ГВО должно вестись с учётом геотектонической структуры территории России. Эти требования к размещению новых исходных пунктов ГВО, во-первых, обеспечат дифференцированный подход к определению скоростей изменений высот во времени для разных геотектонических структур, а во-вторых, создадут более благоприятные условия для

нового цикла уравнивания государственной нивелирной сети и уточнения каталогов высот.

Вопросы сохранности геодезических центров связаны с причинами не только результатов хозяйственной деятельности, но и причинами природного характера - влияние изменений распространения вечной мерзлоты, процессов эрозии, которые в последние годы резко возросли, особенно в северных регионах, и других природных явлений.

Для уменьшения влияния причин природного характера, имея в виду в первую очередь сохранность реперов главной высотной основы, то, по нашему мнению, наиболее эффективно следует принимать меры в двух направлениях. Во-первых, следует совершенствовать конструкции нивелирных центров с использованием, где это возможно, буровых технологий и значительно увеличить в процентном отношении число фундаментальных и вековых реперов (последние в обязательном порядке для исходных и узловых пунктов ГВО). Второй путь связан с комплексированием исходных и узловых пунктов ГВО с пунктами ФАГС и ВГС.

Повышение требований к точности определения высот квазигеоида обуславливает необходимость не только повышения детальности и точности гравиметрических данных и данных о рельефе, но, а также дальнейшее развитие теории определения геопотенциала и её практическая реализация в современной системе геодезического обеспечения.