

УДК 528.2

ПРОБЛЕМА ВЫБОРА СИСТЕМ ВЫСОТ В МИРОВОЙ ПРАКТИКЕ

Д. Н. НОВОКРЕЩЕНОВА, А. В. ПРОКОПОВИЧ*(Представлено: канд. техн. наук, доц. Г. А. ШАРОГЛАЗОВА)*

Статья посвящена проблеме высотного обеспечения, существующей в мировой геодезической практике. Эта проблема связана, прежде всего, с непостоянством уровня мирового океана из-за различных характеристик солёности, плотности, температуры воды и других факторов и не является уральной, отличаясь по высоте даже в пределах одного моря. Поэтому в отдельных государствах установлены не только свои национальные начала счета высот, но и различные системы, строго говоря, не согласующиеся друг с другом и не отвечающие возможностям современной геодезии. В статье систематизированы системы высот, используемые в мировой практике геодезических работ. Показано, что современные направления ее решения тесно связаны с ГНСС технологиями и гравиметрией.

Национальные системы высот в геодезии[1] — принятые в разных странах стандарты для определения высоты точек на местности. Используются в любой проектной документации по строительству.

Благодаря тому, что планетарные геодезические системы координат имеют три оси координат, кроме широты и долготы требуется третья координата, а так как поверхность Земли рельефна и объемна, существует система высот. Не существует какой-то определенной планетарной системы высот. Обычно они национальны, т.е. на одну или несколько близко расположенных государств. Документально подтвержденные исторические сведения об изменениях уровня, представляющие научный интерес, немногочисленны и касаются главным образом катастрофических или экзотических событий.

Основные системы высот[2]:

– *Балтийская система высот и Кронштадтский футшток*

Балтийская система высот (БСВ) — это принятая в СССР система нормальных высот, отсчёт которых ведётся от нуля Кронштадтского футштока. От этой отметки отсчитаны нормальные высоты реперов, образующих нивелирную сеть России. Нуль Кронштадтского футштока представляет собой многолетний средний уровень Балтийского моря.

– *Амстердамский футшток*

Система высот, принятая в 1879 в Нидерландах. Нулевой уровень высот — отметка в центре Амстердама на высоте 9 футов 5 дюймов над уровнем моря. Эта система высот послужила основой для *Normalnull* и используется до сих пор.

– *North American Datum*

Система высот, используемая в Северной Америке. Применяется на территории США, Канады и Мексики. За свою историю уточнялась четыре раза. Последнее уточнение было завершено к 1991 году. Последняя версия этой системы получила название "North American Vertical Datum of 1988 (NAVD88)". Различия в отметках между в WGS84 и NAVD88 на большей части США составляют порядка одного метра. В отличие от отметок в системе WGS84, отметки NAVD88 считаются постоянными, в то время как отметки в системе WGS84 могут меняться со скоростью 1-2 см в год.

– *Ordnance Datum Newlyn*

Система высот, используемая в Великобритании. За начало отсчета принят средний уровень воды в гавани Ньюлин с 1915 по 1921 год.

– *European Terrestrial Reference System 1989*

Система высот, используемая в Италии и ряде других европейских стран. Отсчет ведётся по уровню высот Евразийской литосферной плиты.

– *Normalhohennull*

Система высот используемая в Германии с 1992 года. Отсчет высот ведётся от отметки на церкви святого Александра в Валленхорсте

– *Türkiye ulusal düzey kontrol ağı (TUDKA-99)*

Система высот, принятая в Турции. За начало отсчета принят средний уровень Средиземного моря за период с 1936 по 1971, измеренный в районе Анталии.

Балтийская система высот и Кронштадтский футшток

Балтийская система высот (БСВ) [2] — принятая в СССР система нормальных высот, отсчёт которых ведётся от нуля Кронштадтского футштока. От этой отметки отсчитаны нормальные высоты реперов, образующих нивелирную сеть России. Нуль Кронштадтского футштока представляет собой многолетний средний уровень Балтийского моря. При использовании уровневых постов в качестве

исходных пунктов для определения начала счета высот подразумевается совпадение среднего уровня всех морей в этих пунктах с поверхностью геоида. Таким образом, вся нивелирная сеть на территорию России опирается на один исходный пункт, не имеет внешнего контроля и уравнивается как свободная система.

Служба наблюдения за уровнем Балтийского моря была создана 1707 году. В 1840 Михаилом Рейнеке на граните Кронштадтского Синего моста через Проводной канал была нанесена метка соответствующая среднему уровню воды в Финском заливе за период с 1825 по 1839 год.

В настоящее время в России и ряде других стран СНГ используется Балтийская система высот 1977 года. За точку отсчета принят нуль Кронштадтского футштока — многолетний средний уровень водной поверхности Балтийского моря. По нему в нашей стране считают высоты и глубины, к нему привязаны высоты самолетов и даже орбиты космических кораблей.

Минусом Балтийской системы высот является то, что нуль на Кронштадтском футштоке не отражает изменения высоты футштока, вызванного вертикальными движениями литосферной плиты под Кронштадтом.

Действующая Балтийская система высот 1977 года, после очередного цикла уравнивания нивелирной сети СССР была введена приказом ГУГК при СМ СССР и ВТУ ГШ ВС СССР от 05.06.1978 г. № 7/155 «О введении в действие каталога главной высотной основы СССР». Балтийская система высот использовалась в некоторых странах членах СЭВ (Болгарии, Польше, Венгрии, Чехословакии и ГДР). В настоящее время эта система применяется в Болгарии, Эстонии, Латвии, Литве, Польше, Сербии, Словакии, Чехии и Венгрии

Для распространения единой системы высот по территории страны применяется Государственная нивелирная сеть (является частью Государственной геодезической сети). Главной высотной основой сети являются нивелирные сети I и II классов. Кроме установления Балтийской системы высот, они используются для решения научных задач: изучение изменения высот земной поверхности (земной коры), определения уровня воды морей и океанов и т. д. Как минимум, каждые 25 лет проводится повторное нивелирование всех линий нивелирования I класса и некоторых линий II класса.

Общая протяженность сетей нивелирования I и II классов составляет порядка 400 тыс. км. Нивелирная сеть I класса состоит из полигонов периметром 1200—2000 км. Средняя квадратическая ошибка определения высоты — менее 0.8 мм на 1 км хода. Нивелирная сеть II класса образует полигоны с периметром в 400—1000 км. Средняя квадратическая погрешность определения высоты — менее 2 мм на 1 км хода. На основе пунктов нивелирования I и II классов развивается сеть государственного нивелирования III и IV классов.

С XVII в. опорные наблюдения за уровнями морей в Европе постепенно концентрировались в крупных торговых или военных портах. Наблюдения выполнялись по вертикально устанавливаемым и закрепляемым разными способами рейкам (например, футштокам) с нанесенными на них шкалами, например футовыми и дюймовыми в России (петровское время). На таких объектах были накоплены одни из самых продолжительных (из сохранившихся) рядов равномерных наблюдений в Амстердаме (1700–1925), Стокгольме (1774), Кронштадте (1777), Бресте (1807), Свиноуйсце (1811) и в других пунктах.

Кронштадтский футшток расположен в восточной части Финского залива, на о.Котлин, отделяющем восточную часть Финского залива оз.Котлино от его наиболее узкой и мелководной акватории, называемой в разное время «Маркизовой лужей», или «Невской губой».

Международный проект «Уровень Балтийского моря». Первой международной программой сотрудничества стран региона Балтийского моря [3], нацеленной на унификацию «нулей» вертикальных систем отсчета с использованием спутниковых измерений, стал международный проект «Уровень Балтийского моря» / The Baltic Sea Level Project. Он был инициирован в 1989 г. [3] на Генеральной Ассамблее Международной ассоциации геодезии, являющейся Секцией геодезии Международного союза по геодезии и геофизике / Section of Geodesy of the International Union of Geodesy and Geophysics (далее – IUGG) в рамках исследовательской группы «Изучение Балтийского моря» / «Studies of the Baltic Sea», которая после заседания Генеральной Ассамблеи IUGG в Вене в 1991 г. была переименована в Специальную исследовательскую группу / Special Study Group (далее – СИГ/SSG).

На очередном заседании Генеральной Ассамблеи IUGG в г. Боулдер, США / (англ. Boulder) в 1995 г. группа СИГ/SSG получила статус Подкомиссии 8.1. Были согласованы следующие цели деятельности группы:

- унификация «нулей» вертикальных систем отсчета и их изменчивость во времени в странах Балтийского моря;
- содействие в определении гравитационного поля и геоида в регионе Балтийского моря;
- определение уровня моря и топографической поверхности Балтийского моря;
- изучение влияния рельефа морского дна;

- мониторинг послеледникового подъема суши, особенно в морской части;
- проведение новых измерений Балтийского кольца / Baltic Ring для исследования горизонтальной деформации земной коры.

В проекте «Уровень Балтийского моря» приняли участие все страны Балтийского моря. Россия присоединилась к реализации проекта в 1994 г. В ходе его выполнения в целях усовершенствования и унификации технологии прецизионного определения высотных отметок геодезических реперов и нуль-пунктов морских уровенных постов были широко использованы возможности спутниковых технологий того периода. Ожидалось, что решение указанной задачи приведет к заметному улучшению качества данных уровенных постов и сведений о деформации земной коры как источников информации о пространственно-временной изменчивости физической поверхности Балтийского моря, его дна и берегов в единой геодезической системе (геоцентрических координат). В целях достижения одной из главных целей – унификации «нулей» вертикальных систем отсчета в странах региона Балтийского моря, были организованы три балтийские кампании GPS-наблюдений в 1990, 1993 и 1997 гг. При этом компания 1997 г. была скоординирована с компанией ГНСС-наблюдений, проводившейся подкомиссией EUREF на опорных пунктах сети EUVN, и включала ГНСС-наблюдения на нескольких пунктах Северо-Западного региона России. Логичной причиной объединения этих двух кампаний явилось то, что большинство пунктов наблюдений в регионе Балтийского моря были общими для обеих сетей.

Сеть наблюдений проекта «Уровень Балтийского моря» состояла из двух частей, одна из которых была образована сетью опорных станций, а другая – сетью уровенных постов. Было задействовано 13 опорных станций.

Обработанные результаты GPS-наблюдений использовались для выполнения привязки уровенных постов Балтийского моря к единой геодезической основе (на тот момент времени – ITRF-93). Для этой цели центр антенны GPS приемника должен был быть связан с отметкой нивелирного репера уровенного поста, «нулем» системы отсчета вертикальных координат и вертикальной координатой современного значения среднего многолетнего уровня моря – СМУ (Россия) или Среднего уровня моря / Mean Sea Level – MSL.

Полученное GPS значение представляло собой эллипсоидальную высоту нивелирного репера уровенного поста, обозначаемую h^{GPS} , которая далее преобразовывалась в ортометрическую высоту H_o^{GPS} с помощью уравнения (1):

$$H_o^{GPS} = h^{GPS} - N, \quad (1)$$

где N – высота геоида над эллипсоидом.

Очевидно, что погрешность определения ортометрической высоты опорных реперов, полученной с использованием результатов GPS-наблюдений, определялась погрешностями значений h^{GPS} и N . По результатам первой кампании, которая проводилась в период неблагоприятных условий для наблюдений, вызванных повышенной активностью Солнца, рассчитанная точность эллипсоидальной высоты оказалась не лучше $\pm 4,6$ см. По данным анализа GPS-наблюдений второй и третьей кампаний эллипсоидальная высота опорных реперов была определена с погрешностью уже порядка $\pm 1-2$ см. Однако из-за приведения высот к конкретной требуемой эпохе и их исправления поправкой за послеледниковый подъем суши возникли дополнительные погрешности. Это связано, во-первых, с тем, что показания уровня моря, фиксируемые на уровенных постах, подвержены значительным отклонениям под воздействием климатических изменений. Во-вторых, скорость подъема суши, которая определяется по сериям наблюдений на уровенных постах за несколько десятилетий, имеет точность не лучше, чем $\pm 0,4$ мм/год, что за десять лет приводит к ошибке уже в 4 мм. Ещё одним, причём основным, источником погрешности являлся собственно геоид. Из-за разреженности или полного отсутствия точек гравиметрических измерений в определенных областях так называемого Фенноскандинавского шельфа, точность расчета неровности поверхности геоида варьировала по площади в разных областях шельфа от сантиметра до нескольких дециметров.

В результате трех кампаний проекта «Уровень Балтийского моря» был собран большой объем высокоточных данных ГНСС-наблюдений. Также для мест расположения уровенных постов были рассчитаны высоты твердой поверхности земной коры без приливов относительно эллипсоида GRS-80 (англ. Geodetic Reference System 1980 – глобальная система отсчета с моделью гравитационного поля Земли). GRS-80 рекомендован Генеральной ассамблеей IUGG для геодезических работ в 1979г. Кроме того, были получены серии наблюдений на уровенных постах, а также гравиметрические данные из стран Прибалтики и России. Все полученные данные были в дальнейшем использованы для расчета гравиметрического геоида для Балтийского моря и для определения морской топографической поверхности Балтики/Sea Surface Topography (далее – SST) (рис. 1).

На рис. 1 видно, что высота морской топографической поверхности SST может быть вычислена из уравнения:

$$SST = h_{ГНСС} - N - \Delta H_1 - \Delta H_2, \quad (2)$$

где $h_{ГНСС}$ является эллипсоидальной высотой, полученной по результатам ГНСС-наблюдений, N – превышением геоида над эллипсоидом, ΔH_1 определяется по результатам геометрического нивелирования, а ΔH_2 – по формуле 3:

$$\Delta H_2 = H_{ВР} - H, \quad (3)$$

где H вычисляется на основе данных наблюдений на уровне поста на эпоху ГНСС-наблюдений. Значение SST может быть вычислено для трех различных методов учета приливов твердой оболочки Земли (без прилива, средний прилив или нулевой прилив).

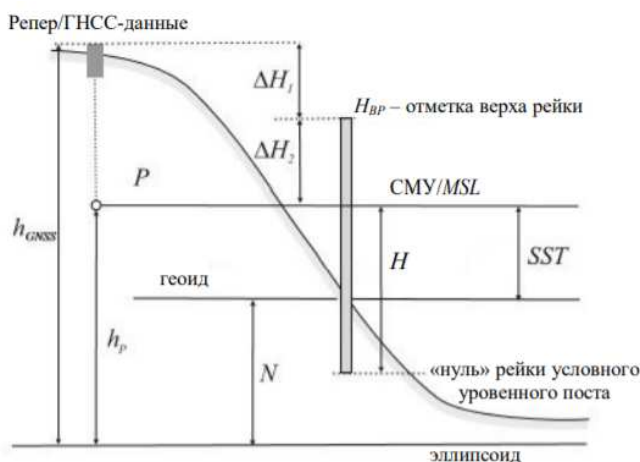


Рисунок 1. – Схема определения морской топографической поверхности SST и эллипсоидальной высоты h_p

Как показали расчеты высот морской топографической поверхности SST, выполненные относительно гравиметрического геоида Балтийского моря по данным проекта «Уровень Балтийского моря», поверхность SST (которая представляет собой сглаженную поверхность моря, освобожденную от волновых колебаний) поднимается к северу и востоку Балтийского моря. В северной части Ботнического залива морская топографическая поверхность SST примерно на 40 см выше, чем в южной части Балтики и на входе в Датские проливы из Северного моря, а в восточной части Финского залива – соответственно, примерно на 25 см выше. Расчеты SST, полученные по результатам высокоточного нивелирования на уровне поста в 1996 г, также показали аналогичный тренд.

Важным результатом проекта также явилось создание сети постоянно действующих станций ГНСС-наблюдений во всех странах Балтийского региона. К станциям национальных сетей Германии, Польши, Финляндии и Швеции добавились станции в Латвии, Литве, России и Эстонии. Кроме того, полученные в ходе выполнения проекта «Уровень Балтийского моря» данные были впоследствии использованы для расчета потенциала силы тяжести W_0 и его вариации по времени в регионе Балтийского моря.

Однако дальнейшие исследования результатов трех кампаний проекта показали, что полученные в ходе проекта на основе GPS-наблюдений и геометрического нивелирования результаты вполне вероятно содержат ошибки, повлиявшие на вычисления морской топографической поверхности SST и потенциала силы тяжести W_0 . Возможно, в том числе и по этой причине основная из целей проекта «Уровень Балтийского моря» – унификация «нулей» вертикальных систем отсчета стран Балтийского региона решена не была. Решение этой задачи на основе общеевропейской вертикальной системы отсчета EVRS, которая рассматривается ниже, в настоящее время выполняет Рабочая группа по нулю глубин Гидрографической комиссии Балтийского моря.

Проблемы установления и использования единой государственной системы высот [2]. Значительная часть существующих равномерных постов, созданных различными ведомствами на морских побережьях, крупных водохранилищах и реках, имеют высоты в существовавших ранее системах высот

(Охотской, Восточно-Сибирской, Тихоокеанской, Балтийско-Черноморской), а также в условных, принятых при проектировании и строительстве водных объектов (таких как «система высот Волгостроя», «Беломорская система высот», «система высот Истростроя» и т. п.), отличающихся от Балтийской системы высот 1977 года. Условные системы высот некоторых крупных водохранилищ отличаются от Балтийской системы высот 1977 года на величины от $-0,18$ м до $+0,88$ м:

- каскад Нивских водохранилищ (Мурманская обл.) $+0,88$ м;
- Нижнетуломское водохранилище (Кольский полуостров) $+0,275$ м;
- Ивановское водохранилище (Московское море) $-0,11$ м;
- Угличское водохранилище $-0,18$ м;
- Рыбинское водохранилище $-0,19$ м;
- Братское водохранилище (Иркутская обл.) $+0,27$ — $+0,35$ м;
- озеро Байкал и Иркутское водохранилище $+0,41$ — $+0,52$ м.

Мареограф. В 1898 году на берегу рядом с Кронштадтским футштоком был установлен *мареограф*[4] – прибор-самописец для измерения и непрерывной автоматической регистрации колебаний уровня моря. Вскоре его поместили в небольшой павильон с глубоким колодецем.

Существующий ныне павильон был построен в 1950 году. Он представляет собой сооружение в петровском стиле. Внутри него находится колодец глубиной 7 метров, сообщающийся с Финским заливом Балтийского моря. На поверхности воды находится специальный поплавок, соединенный с самописцем, непрерывно рисующим кривую колебаний уровня Балтийского моря. Средняя величина уровня Балтийского моря приведена к нулю Кронштадтского футштока. Это так называемый *прибрежный мареограф* — поплавковый самописец уровня моря.

В наши дни работа мареографа полностью автоматизирована. Однако, в соответствии с традицией, четыре раза в сутки метеоролог вручную снимает показания с бумажного самописца.

Рассказывают такую легенду (а может, это правда), когда Юрию Гагарину показали Кронштадтский футшток и павильон с мареографом, он воскликнул: «Теперь я знаю, где находится Пуп Земли!»

Отметка наводнения 1824 года

Над футштоком есть еще одна отметка[4]: 3,67 метров, 1824 год. 7 (19) ноября 1824 года произошло самое разрушительное наводнение за всю историю Санкт-Петербурга и Кронштадта.

од воду ушла практически вся территория Кронштадта, за исключением «Горы» — возвышенного участка в районе нынешних Интернациональной улицы (бывшая Богоявленская) и улицы Аммермана (бывшая Песочная). В целом, в городе не осталось ни одного неповрежденного военного или гражданского здания. Серьезный ущерб был причинен крепостным постройкам и фортам. Погибло 96 человек гражданского населения и военные, которые не могли оставить свой пост. Ущерб оценивался в несколько миллионов рублей — огромную по тем временам сумму.

Амстердамский футшток. Система высот, принятая с 1879 в Нидерландах[2]. Нулевой уровень высот — отметка в центре Амстердама на высоте 9 футов 5 дюймов над уровнем моря. Эта система высот послужила основой для Normalnull и используется до сих пор.

Именно в Амстердаме находится нулевая отметка моря, которая является таковой для всего мира. Вообще то, даже само название «Нидерланды» в переводе звучит как «Низкие земли». Более 40% поверхности страны находится как раз таки ниже уровня моря, а одна из самых высоких точек страны (гора Ваалсерберг) имеет высоту около трехсот метров. Голландцы часто поговаривают, что, дескать, Бог создал море, а их гордая нация создала берег. В этой поговорке можно достаточно быстро найти рациональное зерно, так как достаточно большие территории в прибрежных регионах страны заняты так называемыми «польдерами» – участками земли, которую сами же голландцы и насыпали.

Что касается непосредственно амстердамского футштока (это прибор для измерения уровня воды), то он был установлен в этом месте еще 1 сентября 1648 года. И так уж получилось, что в мае 1988 года уровень моря в Амстердаме был официально признан как нулевая точка отсчета. Подобное решение предприимчивые голландцы решили увековечить в памятнике, который являет собой три трубки. Так что туристы могут своими пальцами пощупать нулевую отметку, а то и вовсе опуститься ниже уровня этого самого моря не замочив при этом ботинок.

Переход на Амстердамский футшток: С 1 апреля 2018 года Таллин поднялся на 23,5 сантиметра [5].

Таллинский департамент городского планирования сообщил, что с 1 апреля 2017 года Эстония окончательно отказалась от использования Балтийской системы высот (отсчитываемой от установленной в Кронштадте отметки) и перешла на отсчет уровня абсолютных высот и впадин от Амстердамского футштока, принятого в качестве стандарта в большей части Европы. После перехода абсолютные высоты в Эстонии стали выше на 15-24 см, в зависимости от региона. В частности в Таллине высоты в среднем увеличились на 23,5 см.

До этого в Эстонии, как и на всей территории бывшего СССР, использовалась введенная в 1977 году Балтийская система высот, где за основу брался так называемый "ноль" Кронштадского футштока, показывающий многолетний средний уровень Балтийского моря.

Трехмесячный переходный период завершился 1 апреля, и теперь в Таллине регистрируются топографические и геодезические работы и чертежи только с данными по европейской системе ЕН2000, независимо от того, когда начиналась их разработка.

Исключение допускается лишь для строительных проектов, работа над которыми началась до 1 января 2018 года. Поэтому, ходатайствуя о разрешении на строительство, теперь нужно будет указывать использованную систему высот.

Заключение. Существующие проблемы высотного обеспечения нашей планеты вызваны большими отклонениями морской поверхности от уральной, что приводит к невозможности установления единой мировой системы высот, а также возникновению большого числа не связанных между собой государственных систем высот. Современные спутниковые технологии дают направления для решения этих проблем.

ЛИТЕРАТУРА

1. https://studbooks.net/1815713/geografiya/osnovnye_natsionalnye_sistemy_vysvy
2. <https://ru.wikipedia.org/wiki/>
3. Журнал «НАВИГАЦИЯ И ГИДРОГРАФИЯ» 2017, №49
4. <https://anashina.com/kronshtadtskij-futshtok>
5. http://www.prosvet.ee/ArtNews.aspx?news_id=15558