

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования «Полоцкий государственный университет имени
Ефросинии Полоцкой»

УДК 551.461.2:528.37

ПРОКОПОВИЧ Александр Владимирович

**КОЛЕБАНИЯ УРОВНЕЙ МОРЕЙ И ОКЕАНОВ И ПРОБЛЕМА
ВЫСОТНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В МИРОВОЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ
ПРАКТИКЕ**

Магистерская диссертация

Специальность 1-51 80 01 «Горнопромышленная и нефтегазопромысловая
геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр, геодезия»

Научный руководитель:
Ялтыхов Вадим Викторович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры геодезии и ГИС.

Допущен к защите:
«_____» февраля 2024 г.
Зав. кафедрой геодезии и
геоинформационных систем, к.т.н.

_____Маркович Кирилл Игоревич

Новополоцк, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ	5
Глава 1. Причины колебания уровней морей и океанов	7
1.1. Данные о колебаниях уровня мирового океана в историческом аспекте.....	7
1.2. Анализ космических влияний на океанический уровень.....	9
1.3. Геодинамические факторы, вызывающие колебания уровней морей и океанов.....	12
1.4. Анализ техногенных влияний на океанический уровень.....	14
1.5. Анализ климатических влияний на океанический уровень.....	16
1.6. Обзор существующих концепций колебаний уровней на примере Каспийского моря.....	17
Глава 2. Колебания уровней морей и океанов и национальные системы высот в геодезии	20
2.1. Системы высот, существующие в мировой практике.....	20
2.2. Балтийская система высот.....	26
Глава 3. Колебания уровней морей и океанов и проблема высотного обеспечения в мировой геодезической практике	30
3.1. Инструментальные наблюдения уровней морей и океанов: морские уровнемерные посты; спутниковая альтиметрия.....	30
3.2. Влияние гравитационного поля на высотное обеспечение.....	35
3.3. Выбор оптимальной системы высот.....	48
3.4. Современный подход к организации геодезического высотного обеспечения.....	50
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	54
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	55

ВВЕДЕНИЕ

Моря и океаны играют важную роль в жизни человека, так как являются не только транспортными коммуникациями и источником воды, но и служат исходной отсчетной поверхностью для высотного обеспечения нашей планеты. Однако уровни морей и океанов непрерывно меняются, то отступая от суши, то затапливая ее.

Проблема колебания уровней морей и океанов не только связана с жизненным существованием человека (наводнения и засухи), но и с необходимостью решения научно-технических и инженерных задач, так как высотная основа многих государств соотносится с уровнем моря, который постоянно колеблется. Поэтому можно констатировать, что выбираемый ранее за начало счета высот уровень мирового океана не оправдал себя, так как в разных частях его поверхность из-за различных характеристик солёности, плотности, температуры воды и других факторов не является уровенной и отличается по высоте даже в пределах одного моря. Как следствие, в отдельных государствах установлены не только свои национальные начала счета высот (Балтийская система высот, Амстердамский и Кронштадтский футштоки, North American Datum, Ordnance Datum Newlyn, Normalhohennull и т.д.), но и различные системы высот (нормальная, ортометрическая), строго говоря, не согласующиеся друг с другом и не отвечающие возможностям современной геодезии.

Кроме того, инструментальные уровнемерные морские наблюдения, которые в последние десятилетия активно дополняются данными спутниковой альтиметрии, показали, что невозмущенная поверхность мирового океана не является уровенной.

Указанные обстоятельства требуют исследования причин изменения уровней морей и океанов, систематизирования их последствий, а также меняют подходы к высотному геодезическому обеспечению, связанные, прежде всего, с внедрением в геодезию космических технологий и гравиметрии.

В магистерской работе приведены исторические сведения о колебаниях уровней морей и океанов, результаты инструментальных наблюдений за океанической поверхностью (морские уровнемерные посты и спутниковая

альтиметрия), а также рассмотрен комплекс причин, вызывающих изменения уровней морей и океанов, включая космические, геологические, климатические и техногенные. В качестве конкретного примера взято Каспийское море, примечательное большими колебаниями уровня в историческое время.

В работе представлена общая информация о национальных системах отсчёта высот в геодезии. Изложены реализуемые уже в настоящее время направления перехода к общеземной системе отсчёта высот, базирующиеся на сочетании GNSS технологий и гравиметрии, свободной от уровня морей и океанов, с которой будут надёжно связаны национальные начала счета высот, включая и Беларусь.

Таким образом, актуальность исследований также обусловлена необходимостью создания современной исходной системы отсчёта высот на территории Беларуси и определяется высокой социальной и научно-практической значимостью проблемы.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Цель и задачи исследования: Оценка современного состояния государственных систем геодезического обеспечения и основные мировые тенденции их развития и совершенствования с применением GNSS измерений и гравиметрических данных.

Научная новизна:

- В магистерской диссертации показана необходимость учёта поправок за уклонение отвеса при высокоточном нивелировании для территории Республики Беларусь.
- Приведены основные принципы создания исходной системы отсчёта высот для территории страны.

Положения, выносимые на защиту:

- Необходимость учета поправок за уклонение отвеса при высокоточном нивелировании;
- Основные принципы создания исходной системы отсчёта высот в мировой геодезической практике.

Личный вклад магистранта: Заключается в самостоятельном выполнении математической обработки данных по исследуемым вопросам с последующим анализом результатов. Диссертационная работа является самостоятельно выполненной работой, основанной на использовании литературных источников, включающей теоретические и численные исследования по теме диссертации.

Апробация магистерской диссертации и информация об использовании ее результатов: Результаты диссертационного исследования были представлены на республиканском научно-практическом семинаре студентов и молодых ученых. Минск, 18 ноября 2020 г [50].

Опубликованность результатов магистерской диссертации:

В 2020 году по теме магистерской диссертации опубликовано 2 статьи в электронном сборнике трудов молодых специалистов Полоцкого государственного университета в которых описывались, как проблемы выбора систем высот в мировой практике, так и причины изменений уровней морей и океанов [48, 49].

Структура и объем магистерской диссертации: Работа состоит из введения, общей характеристики работы, 3 глав, заключения, списка литературных источников. Работа изложена на 60 страницах машинописного текста, включает 9 таблицы, 21 рисунков, 5 формул. Список литературы содержит 62 наименований.

Глава 1. ПРИЧИНЫ КОЛЕБАНИЯ УРОВНЕЙ МОРЕЙ И ОКЕАНОВ

1.1. Данные о колебаниях уровня мирового океана в историческом аспекте.

Как известно, уровни морей и океанов постоянно меняются в силу различных причин, что влияет на жизнедеятельность человека, так как с морями и океанами связано судоходство, рыболовство и просто проживание людей в прибрежных зонах из-за более благоприятного климата, использования водного транспорта, получения продуктов питания. Поэтому издавна люди собирали сведения о колебаниях уровней морей и океанов и прогнозировали возможные наводнения и засухи.

В настоящей работе сделан акцент на Каспийское море, интересного большими колебаниями уровня в исторический период.

В Каспийское море втекает множество рек, главными из которых является Волга, Терек, Урал, Кура, но ни одна не вытекает. Единственным местом оттока воды из Каспийского моря служит залив Кара-Богаз-Гол, его уровень ниже уровня самого моря. Само Каспийское море расположено между двумя тектоническими плитами Иранской и Скифско-Туранской. Дно Каспийского моря имеет строение земной коры океанического типа. Территория вокруг Каспийского моря часто подвержена землетрясениям, но при этом она является густо населённой с развитой инфраструктурой, добывающей промышленностью большой процент которой является добыча нефти и газа, а так же сельским хозяйством что приводит к развитию мелиорации которая ведёт к обмелению рек.

Главной особенностью Каспийского моря являются значительные колебания его уровня за короткие промежутки времени на протяжении всего исторического периода наблюдений, что приводит к значительному урону инфраструктуре и повреждению сельскохозяйственных угодий, вызванных засухами и наводнениями.

На (рисунке 1) можно видеть, что Каспийское море изменяло свой уровень в диапазоне 15 метров, то поднимая его то опуская, а данные о этих процессах

находят в письменных источниках даже раннего средневековья.

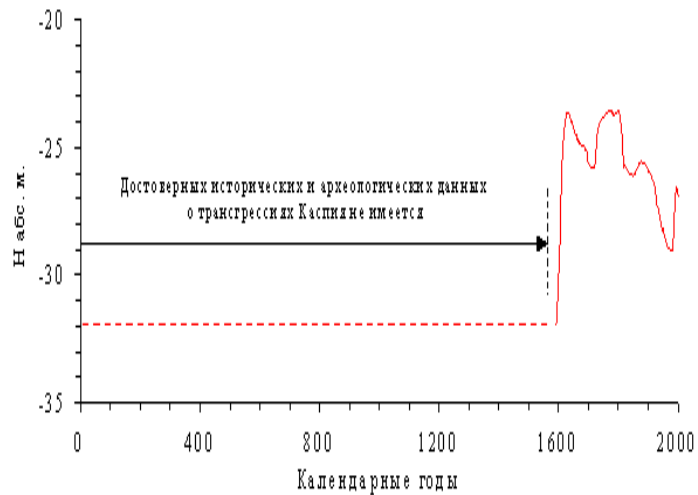


Рисунок 1 – Колебания уровня Каспийского моря в исторический период [23].

Задокументированные наблюдения за Каспийским морем, специально для этого разработанными устройствами, начались ещё при российском императоре Александре Николаевиче Романове правившем с (1855-1881 год). Основными устройствами для наблюдения, за уровнем моря в то время, стали уровнемерные посты. А в наше время, с развитием спутниковых технологий появилась возможность использовать ещё и спутниковую альтиметрию, для определения уровней морей и океанов. На рисунке (рисунке 2), можно видеть колебания уровня Каспийского моря с (1840-2010 год), диапазон этих колебаний, если брать высшую и низшую точку графика составил 3,5 метра.

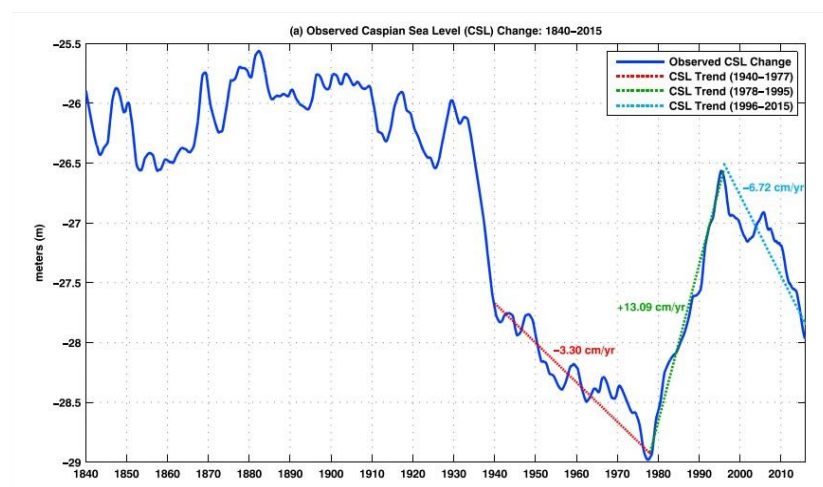


Рисунок 2 – Колебания уровня Каспийского моря по данным инструментальных наблюдений с 1840 г. по 2015 г [21].

Существуют четыре теории колебания уровней морей и океанов: климатическая, антропогенная, космическая и тектоническая. В связи с тем, что изменения уровней морей и океанов происходит на протяжении всей истории, то антропогенный фактор не может быть основной причиной изменения уровня Каспийского моря. Что касается остальных теорий то они могут иметь равнозначное влияние на изменение уровня Каспия так к примеру сторонники космических влияний связывают колебания уровня Каспийского моря с космическими ритмами и солнечной активностью, но космические ритмы так же имеют влияние как на тектонику, так и на погоду. Разбору существующих гипотез, посвящена следующая глава работы.

1.2. Анализ космических влияний на океанический уровень.

Причин для колебания уровней морей и океанов на нашей планете предостаточно. Их можно классифицировать как космические, климатические, геологические, техногенные и т.д. Если глубже рассматривать этот вопрос, то становится понятно, что все причины взаимосвязаны друг с другом. Начнём, например, с космических факторов. Земля входит в состав Солнечной Системы, и она не может не подчиняться законам ее существования. Земля, как и другие планеты, совершает вращение вокруг Солнца по эллиптической орбите, вращается с определенной скоростью вокруг своей земной оси, имеет свой энергетический запас и не может не взаимодействовать с этими планетами через гравитацию и корпускулярные воздействия от Солнца в виде космических лучей во время солнечных вспышек. К данному пониманию человечество пришло через такое направление в философии как космизм, рассматривающее космос, окружающую природу, человека как единое взаимосвязанное целое. Здесь следует отметить, прежде всего, труды В.И.Вернадского [1] и А.Л.Чижевского [2], в которых представлено учение о биосфере, а также К.Э. Циолковского, глубоко убеждённого в существовании иных разумных цивилизаций во Вселенной. Вернадский шёл к пониманию космической роли жизни от цикла геологических наук, а Чижевский во

главу угла поставил солнечную активность и её влияние на природу нашей планеты.

Активность в солнечной системе, движение небесных тел в ней, прежде всего планет и спутников происходят с определенным периодом: к примеру, вращение земли вокруг солнца, или луны вокруг земли, так же периодические явления происходят и на солнце, эти явления в своей основе носят усиление и ослабление магнитной активности и называются 11 летними солнечными циклами. По факту расположения небесных тел относительно Земли, главным образом, меняется гравитационное поле нашей планеты, что проявляется в морских, атмосферных и литосферных приливах, основной вклад в воздействия на землю оказывают Луна и Солнце. Периодически 2 раза в сутки в результате морских приливов уровень гидросферы Земли колеблется на 1-3 метра, а литосферы – до 50 см. Считается, что это может быть основной причиной землетрясений и извержений вулканов, наблюдаемых, кстати сказать, и на других планетах земной группы. Солнечная активность оказывает наибольшее воздействие на нашу планету, а изучение и анализ этого воздействия оформился в космическую концепцию влияния солнечной активности. Основными видами воздействия Солнца на планету Земля являются гравитационное и электромагнитное воздействия (рисунок 3).

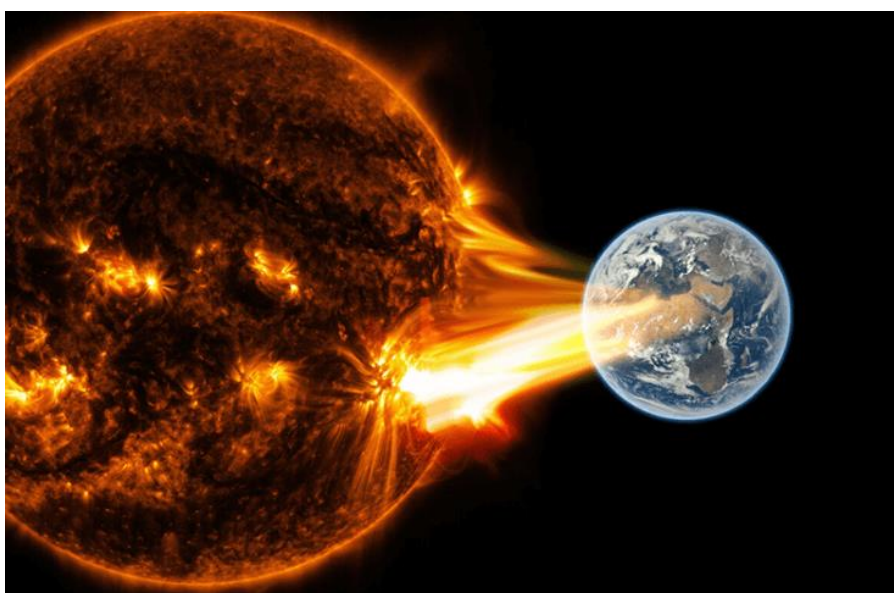


Рисунок 3 – Влияние солнечной активности на планету земля.

В контексте морей и океанов гравитационное и электромагнитное воздействие

Солнца оказывает влияние на их геомагнитную возмущённость. А на Каспийском море, дно которого изобилует глубоководными каньонами, которые являются тектоническими зонами напряжённости, влияние 11 летних солнечных циклов особенно заметно. Это выражается в нарушении тектонической стабильности, что приводит к различным тектоническим процессам в Каспийском море, таким как изменение рельефа дна, грязевой вулканизм. Эти процессы протекают достаточно быстро, при интенсивной солнечной активности и влияют на подземные стоки моря, что выражается в изменении его уровня. Так же колебания солнечной активности и усиление этой активности ведёт к оживлению общей циркуляции атмосферы и наоборот (рисунок 4).

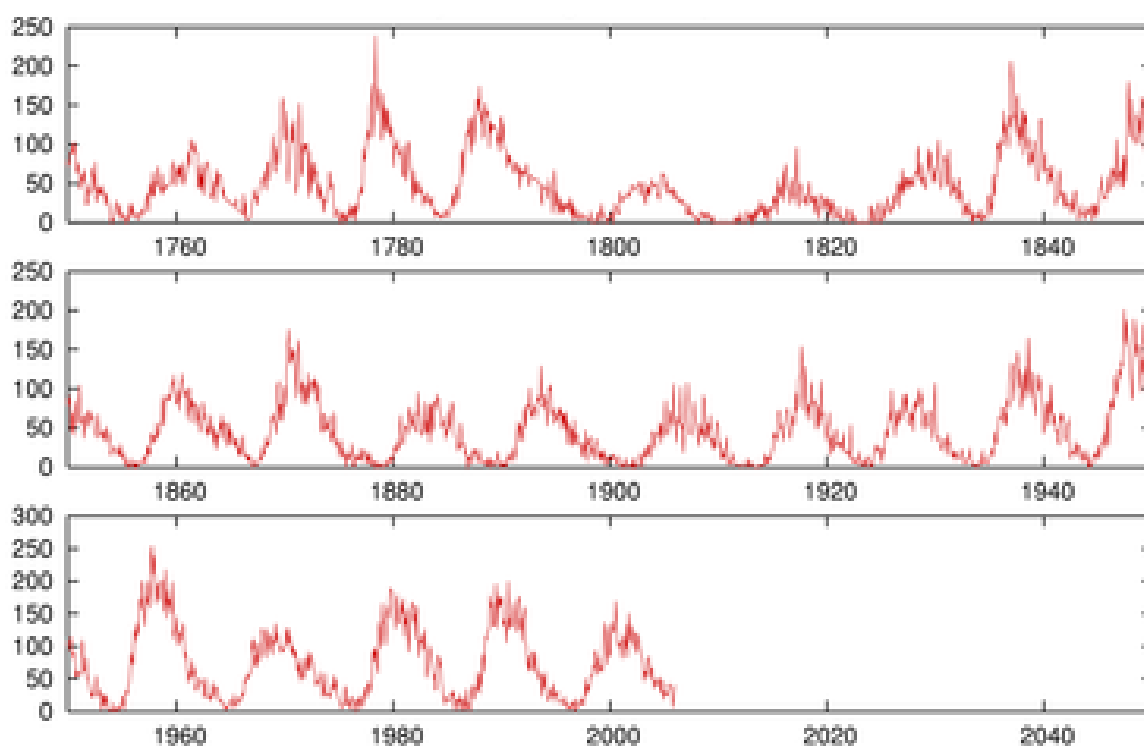


Рисунок 4 - 11-летние циклы солнечной активности [14].

Для нас важно понять, прогнозирование усиления и ослабления солнечной активности и в связи с этим изменения уровней морей и океанов, строится на учёте солнечных пятен, на графике выше можно видеть отображение количества этих пятен в определённый период времени.

При сравнении графика солнечной активности и графиков изменения уровня Каспийского моря можно заметить их корреляцию, что показывает значительное

влияние солнечной активности на уровень моря. Но важно подчеркнуть, что солнечная активность влияет именно на тектонические и климатические процессы Каспийского региона, а через это оказывается влияние и на уровень каспийского моря.

1.3. Геодинамические факторы, вызывающие колебания уровней морей и океанов.

Проблема изменения уровня моря и океанических вод связано не только с выживанием человека, но и с необходимостью решения научных, технологических и инженерных задач. Высота многих стран коррелирует с уровнем моря. В Республике Беларусь и России созданы сети нивелирования по нулю Кронштадтского футштока, который устанавливается на основе многолетних наблюдений за уровнем моря в Балтийском море. Европейские страны используют в качестве исходной точки отсчета высот Амстердамский футшток, связанный с Северным морем через Персидский залив. Карты скоростей вертикальных движений современной земной коры строятся по отношению к абсолютным значениям скоростей этих движений на равномерных станциях. Для морского флота трудно переоценить информацию об уровне моря и его колебаниях. По этой причине люди интересовались уровнем моря и океанской воды с незапамятных времен, инструментальные наблюдения были начаты с XIX века, а в настоящее время используются спутниковые технологии. Благодаря интернету и геоинформационным системам осведомленность современных ученых и заинтересованных специалистов достигла такого уровня, что при изучении изменения уровня моря можно использовать комплексный междисциплинарный подход самых разных наук, таких как геомеханика, геодезия, геология, климатология, инженерная геология и создание технологий, что имеют огромное значение.

Так как изменение уровня морей и океанов мы рассматриваем на примере Каспийского моря, стоит сказать, что оно является внутренним морем, то есть море

находиться внутри материка в его впадает множество рек, но ни одна не вытекает, основными из которых являются Волга, Терек, Урал, Кура. Единственным местом оттока воды из Каспийского моря служит залив Кара-Богаз-Гол, расположенный ниже по уровню. Каспийское море находится на стыке Скифско-Туранской и Иранской тектонических плит (рисунок 5).

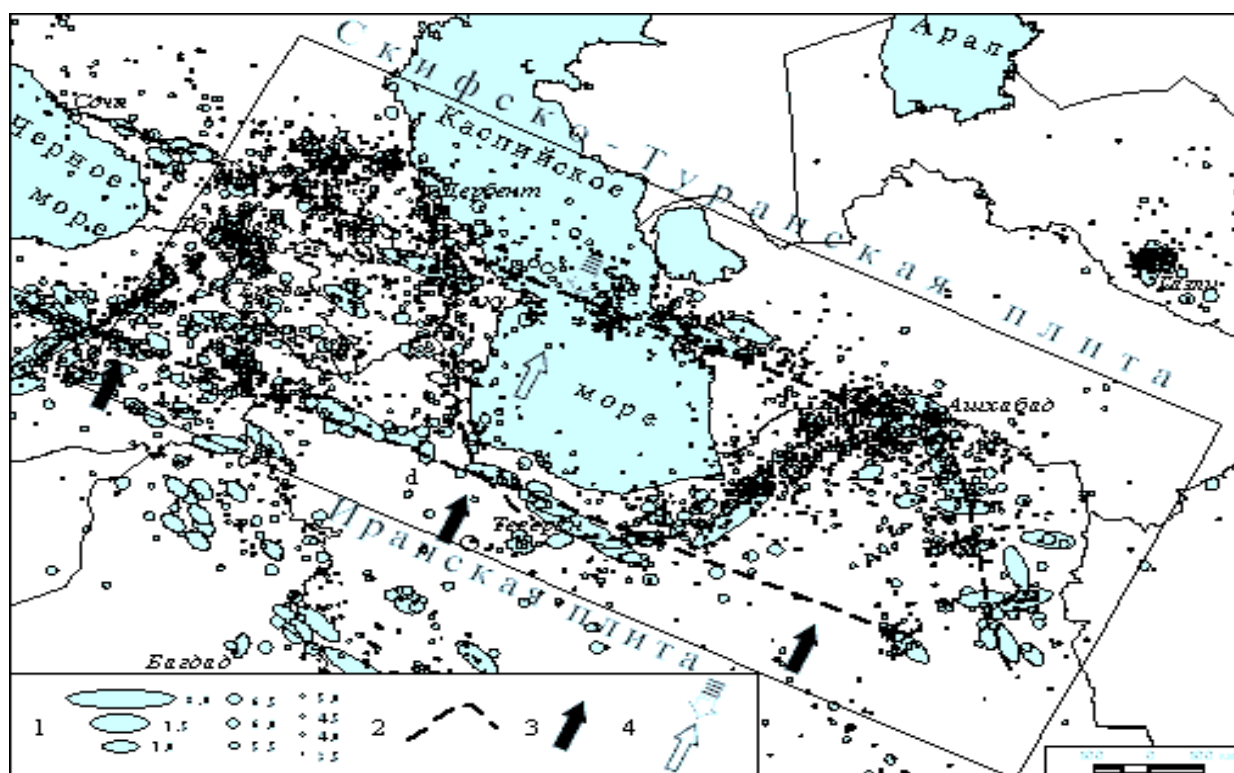


Рисунок 5 - Геологическая характеристика Каспийского региона.

Каспийское море и прилегающие к нему побережье, как можем видеть на (рисунке 5). Находиться на стыке двух тектонических плит: с юга со стороны Ирана находится Иранская тектоническая плита, с севера со стороны России и Казахстана находится Скифско-туранская тектоническая плита. Что касается движения тектонических плит, южная плита движется в сторону северной, подобное движение вызывает повышенную сейсмическую активность в районе стыка плит, район находится в южной части Каспия, при этом северная часть Каспия является менее сейсмически активной. В связи с этим дно Каспийского моря можно разделить на два условных участка, с севера равнинное дно где наблюдается малое количество низко амплитудных землетрясений, с юга горное дно где низко амплитудные землетрясения достаточно частые явления, но

глубинные землетрясения происходят по всей территории Каспия, что приводит к движению земных пород, в границах глубоководных разломов находящихся на дне Каспийского моря, по этой причине побережье Каспия никогда не было территорией с низко сейсмической активностью.

В связи с вышесказанным, согласно геологическим представлениям, существует две группы процессов, ответственных за изменение уровня моря. По мнению геологов, первая группа процессов изменяет площадь разломов и впадин при тектонической активности, разломы и впадины постоянно то уменьшаются, то увеличиваются, это приводит к изменению их объема, что влечёт за собой колебания уровне моря. Еще одной предположительной причиной изменения уровне Каспийского моря является накопления на его дне различных отходов, как от деятельности человека, так и продуктов разложения биосферы Каспийского моря. Следующий процесс, влияющий на уровень Каспийского моря, вытекает из предыдущих - напывание и выдавливание водой продуктов разложения при сейсмической активности, а также нарушение стабильности дна моря при добыче нефти и газа. Каспийский регион сейсмически активен, имеет хорошо развитую экономическую инфраструктуру и демонстрирует значительные признаки технологических инноваций.

1.4. Анализ техногенных влияний на океанический уровень.

В Каспийском море разрабатывается множество месторождений нефти и газа (рисунок 6). Помимо этого, на всей протяжённости рек, впадающих в Каспийское море установлены дамбы.

Из этого следует, что деятельность человека в близи моря может повлиять на напряжённость в земной коре, или приток воды в море. Основными техногенными факторами, происходящими в близи Каспийского моря является добыча нефти и газа, подземные ядерные взрывы, мелиорация.

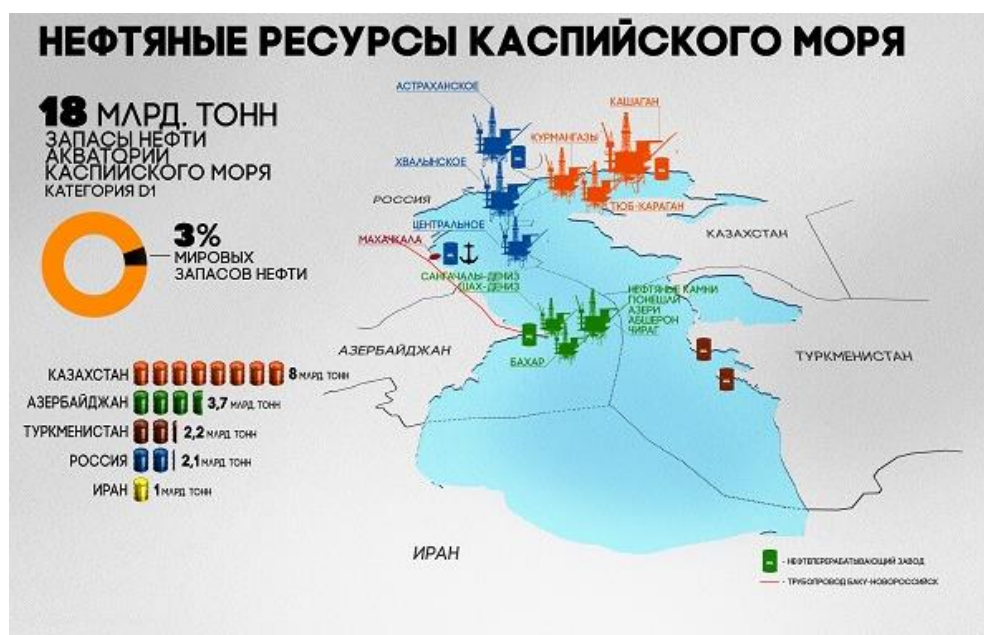


Рисунок 6 - Расположение нефтяных платформ в Каспийском море.

До середины 20 столетия приток вод в Каспийское море, из впадающих в его рек, практически не ограничивался. Единственное что в незначительных объёмах уменьшало приток воды из рек в море, являлось сельское хозяйство, но его влияние в начале 20 столетия было минимальным не превышающим среднегодовых колебаний. Но к середине 20 столетия начали более активно поводится мероприятия водохозяйственного характера, что привело к снижению притока вод из рек впадающих в Каспийское море примерно на 1%. В дальнейшем развитие промышленности привело к строительству на протяжении рек, впадающих в Каспийское море различных инженерных сооружений, таких как оросительные каналы, гидроэлектростанции и другие. И к концу 20 столетия приток рек уменьшился на 13% от нормы.

После развала СССР, отбор воды из Волги - крупнейшей реки, впадающей в Каспийское море, уменьшился больше чем в двое. А в наше время отбор воды из Волги уменьшает ее сток в Каспийское море на 5% от нормы. У остальных крупных рек таких как Урал, Терек и Сулак приток воды в море уменьшен от естественной нормы на 20-30 % [19].

Так же сильное воздействие на уровень Каспийского моря оказало строительство плотины в советское время, между самим морем и заливом Кара-

Богаз-Гол который из за солености воды в нем и связанных с этим процессов испарения жидкости, являлся местом куда происходил отток вод из Каспийского моря. Ограничение оттока воды из Каспийского моря в залив Кара-Богаз-Гол привело к повышению уровня моря на 40 см. В настоящий момент плотина между Каспийским морем и заливом Кара-Богаз-Гол разрушена, что позволило восстановить естественный отток вод.

1.5 Анализ климатических влияний на океанический уровень.

Кроме землетрясений и извержений вулканов, космической активности, на уровень морей и океанов влияют также климатические изменения. Основными факторами, оказывающими влияние, являются тепловое расширение верхних слоёв мирового океана, а также таяние ледников. Ещё к основным причинам относятся деятельность человека и вулканическая активность, что ведёт к накоплению в атмосфере углекислого газа и созданию парникового эффекта и в следствии этого потепления, но стоит заметить, что при извержении крупных вулканов наблюдается похолодание. Вклад каждого из этих факторов при сегодняшнем состоянии мониторинга вполне поддаётся подсчётам. Но если к суточным приливам и отливам морей и океанов население приспособилось, то непериодические изменения их уровней, конечно же, вызывают тревогу. Природа их влияния очень сложна, так как действуют совокупные причины, включая и хозяйственную деятельность человека. Они сложно моделируются и прогнозируются.

Ключевыми моментами в Климатической концепции являются составление уравнения водного баланса и анализ его компонентов. Смысл этого уравнения следующий: изменение объема вод в море является разницей между приходными (речной и подземный сток, атмосферные осадки на поверхность моря) и расходными (испарение с поверхности моря и отток вод в залив Кара-Богаз-Гол) составляющими водного баланса. Анализ составляющих водного баланса выявил, что наибольший вклад (до 72% дисперсии) в изменчивость уровня даёт приток

речных вод, а если конкретнее, то зона формирования стока в бассейне Волги. В конечном итоге многочисленные исследования позволили весьма определённо связать колебания уровня Каспия с крупномасштабными изменениями климата, так как (оставшиеся 28% приходного баланса) приходится на осадки и подземные стоки [18].

В наше время идея что основным фактором глобального потепления является деятельность человека, а в следствии этого она является и основным фактором изменения климата в следствии чего меняется уровень морей и океанов, поддерживается большинством учёных, общественных организаций и СМИ но это вовсе не означает её непоколебимую истинность. Скорее всего, окажется, что каждая из составляющих указанных выше вносит свой вклад в изменение уровней морей и океанов.

1.6. Обзор существующих концепций колебаний уровней на примере Каспийского моря.

Каспийское море резко изменяло свой уровень на протяжении многих веков, при повышении уровня затапливались прибрежные регионы, а при уменьшении его уровня освобождались от воды значительные участки суши, что влияло на условия жизни проживающих там людей, состояние биоразнообразия моря, нарушалось судоходство, повреждалась возведенная в прибрежных районах инфраструктура. В связи с этим люди, проживающие на побережье Каспийского моря, многие годы пытались найти причины таких резких его колебаний и поняв эти причины, научиться предсказывать подобные события.

В середине 20 века уровень Каспийского моря опять резко упал на 1,8 метров, что побудило тогдашний СССР начать изучение подобного феномена с целью выработки методики по прогнозированию таких изменений. В дальнейшем на протяжении всего 20 века уровень моря продолжал падать.

Такое сильное понижение уровня моря привело к осушению огромных

территорий, площадь таких участков суши превысила 45 тысяч км², в некоторых частях, море отступило от суши более чем на 120 км. После появления таких обширных участков суши там начала возводиться различная инфраструктура, строиться новые поселения, закладываться сельскохозяйственные угодья.

Так же понижение уровня привело к осложнению судоходства, отрицательно повлияло на возможность добычи нефти и газа. Экосистема в регионе Каспия была нарушена, произошло сильное снижение уровня грунтовых вод, повысилась соленость воды, приведшей к вымиранию огромного количества рыб и других морских организмов.

В начале 21 века Каспийское море опять проявило себя, только сейчас оно не продолжило понижать свой уровень, а резко стало его повышать. Территории, ранее заселённые людьми находятся теперь под постоянной угрозой затопления. В результате современного повышения уровня моря площадь затопленных территорий уже достигла 35000 км². В результате этого береговая линия в некоторых частях моря отодвинулась на 25-50 км. Поднялся уровень грунтовых вод, что привело к заболачиванию территории. Был нанесён огромный вред возведенной ранее инфраструктуре [19].

На данный момент достаточно точных методов прогнозирования уровня Каспийского моря нет. В настоящее время существует несколько гипотез изменения уровня Каспийского моря: климатическая, геологическая, техногенная и космическая. Нет сомнений, что все вышеперечисленные гипотезы влияют на колебания моря, по средствам различных факторов. Это и изменение климата, которое приводит к оттаиванию высокогорных ледников, что в свою очередь ведет к увеличению поступления вода в море из рек. И постоянные тектонические процессы, происходящие на территории Каспия и приводящие к изменению дна моря. Также необходимо учитывать заиливание дна в результате деятельности человека и разложения биомассы.

Вместе с тем, скорость и интенсивность геологических процессов достаточно мала, по отношению к скоростям изменения уровня моря и большинство

исследователей полагают, что геологическую концепцию стоит учитывать в среднесрочном прогнозировании.

Климатическая же теория лучше описывает изменения уровня моря в определённый период, но также не является основной причиной, так как нельзя исключать как геологическую активность, так и техногенный фактор. В связи со всем вышперечисленным можно сделать вывод, что для более точного определения причин изменения уровня Каспийского моря нужно учитывать все представленные выше факторы.

Глава 2. КОЛЕБАНИЯ УРОВНЕЙ МОРЕЙ И ОКЕАНОВ И НАЦИОНАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ВЫСОТ В ГЕОДЕЗИИ

2.1 Системы высот, существующие в мировой практике.

Система высот — это одномерная система координат, используемая для выражения расстояния (высоты) точки над опорной поверхностью (т. е. уровня нулевой высоты) вдоль четко определенного пути. Национальные системы высот — это системы геодезических высот, которые были приняты для передачи высот от нулевой точки и используются во всех видах геодезических работ.

Определение общей глобальной вертикальной системы координат в настоящее время является одним из ключевых моментов в геодезии.

Физические высоты определяются с использованием методов геодезического нивелирования, которые измеряют расстояние между двумя эквипотенциальными или равными поверхностями гравитационного поля Земли. Эти системы называются системами физических высот, поскольку определение высоты зависит от уровня поверхностей и отвеса гравитационного поля Земли. Физические высоты отнесены к геоиду — особой эквипотенциальной поверхности гравитационного поля Земли, близкой к среднему уровню моря.

Системы координат на планете Земля имеют три оси, такие как широта, долгота и высота. Высота была добавлена по той причине, что поверхность планеты земля не является одной сплошной равниной, не является уровнённой, поверхность планеты изобилует огромным количеством гор и впадин. По этой причине и создавались общеземные системы высот, которые могли бы отображать неуровенность поверхности Земли. Стоит заметить, что у каждого крупного государства, есть свои системы высот, которые называются национальными. И распространяться они не только на эти государства, но и на граничащими с ними территории.

Балтийская система высот - система высот, принятая в 20 веке в СССР на данный момент принятая во всех странах постсоветского пространства, является системой нормальных высот, отсчитывается от нуля футштока, который

находиться в Балтийском море на острове Кронштадт (рисунок 7).

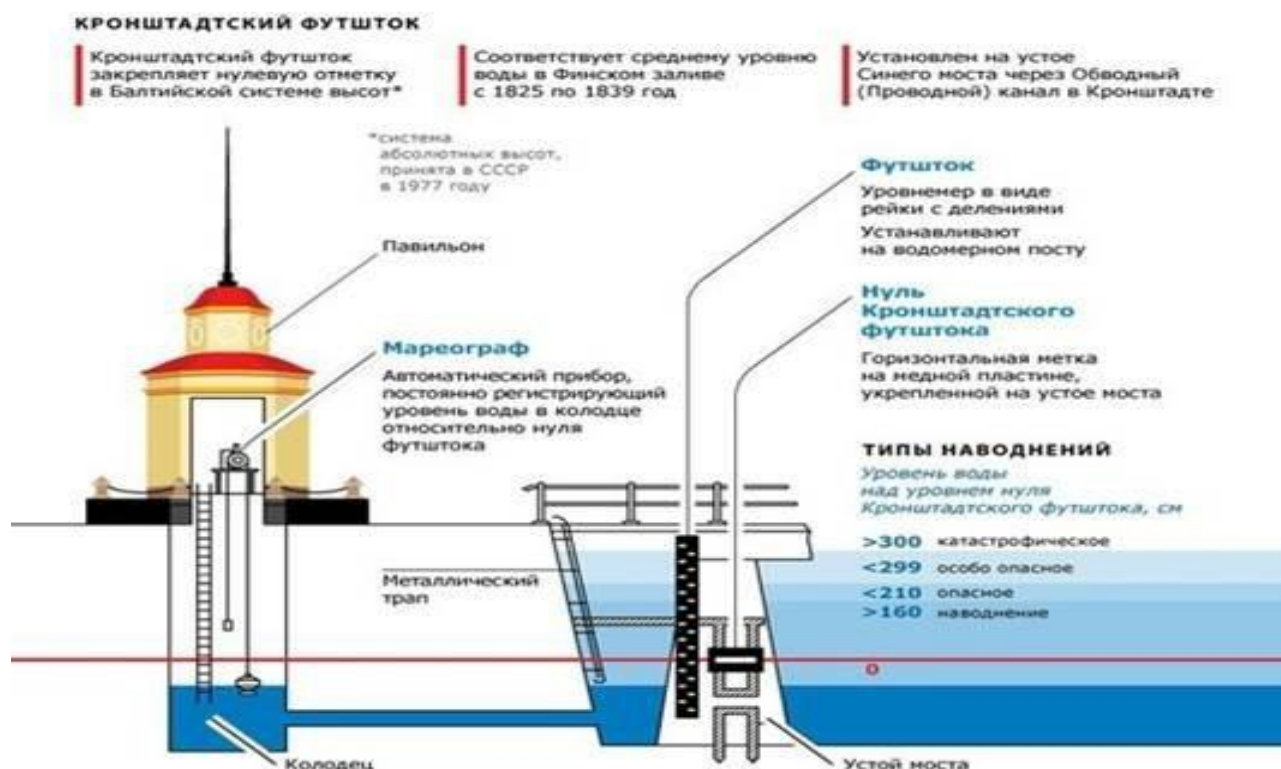


Рисунок 7 - Кронштадский футшток.

Амстердамский футшток система высот, принятая с 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 (англ. Normalnull) и используется до сих пор [25].

Североамериканская вертикальная система отсчета 1988 года (NAVD 88) — это система вертикального контроля, установленная в 1991 году путем корректировки с минимальными ограничениями наблюдений за нивелированием в Канаде, Мексике и США. Он удерживал фиксированную высоту основного отсчета приливов, привязанную к новым международным данным по Великим озерам 1985 года, местному среднему значению высоты уровня моря, в Фатер-Пойнт / Римуски, Квебек, Канада. Дополнительные отметки приливных реперов не использовались из-за продемонстрированных изменений в топографии морской поверхности, т.е. того факта, что средний уровень моря не является одной и той же эквипотенциальной поверхностью на всех приливных реперах. Североамериканская вертикальная система отсчета 1988 года (NAVD 88) представляет собой сеть нивелирования на Североамериканском континенте,

простирающуюся от Аляски, через Канаду и Соединенные Штаты, прикрепленную к единственной исходной точке на континенте.

Чтобы улучшить Национальную пространственную систему отсчёта (NSRS), NGS заменит все три североамериканских системы отсчёта 1983 года (NAD 83) и все вертикальные системы отсчёта, включая Североамериканскую вертикальную систему отсчёта 1988 года (NAVD 88), четырьмя новыми наземными системами отсчёта, и геопотенциальные данные.

В проекте новые системы отсчета будут опираться в первую очередь на глобальные навигационные спутниковые системы (GNSS), такие как система глобального позиционирования (GPS), а также на гравиметрическую модель геоида, полученную в результате нашей работы «Гравитация для переопределения американской вертикальной системы отсчета» (GRAV-D).)

По причине различных факторов, геодезистами применяются различные системы отсчета, как координат, так и высот. В геодезии есть по сути три группы систем отсчета, местные системы, государственные системы, и общеземные системы. Причин приведшими к этому, являются, неоднородность гравитационного поля, геодинамические явления, социально экономическая обстановка и невозможность на данный момент передачи высот с одного места по всей планете.

По причине слабой изученности гравитационного поля Земли и факторов, влияющих на его изменение, оно не может в данный момент применяться для уменьшения количества систем координат, хоть силовые линии и создают опору для определения положения точек, а определение точек в пространстве — это пересечение в ней силовой линии и какой-либо поверхности. Подобная натуральная система координат на данный момент на практике не реализуется по причине плохой изученности гравитационного поля Земли и плохой точностью конечных результатов.

Система координат, называемая астрономической, ближе всего по принципу похожа на натуральную систему. Астрономическая система координат состоит в плановом аспекте из астрономической широты и астрономической долготы, а

астрономической высотой является высота, отсчитанная от геоида до земной поверхности по направлению отвесной линии и называется такая высота ортометрической.

В натуральной же системе координат применяется уже физическое понятие высоты как разность потенциалов силы тяжести между исходной уровенной поверхностью (поверхностью геоида, проходящей через начало счета высот) и уровенной поверхностью нивелирного репера точки M местности, то есть $(W_0 - W_M)$, известное как геопотенциальное число C_M , определяемое по формуле (1).

$$C_M = (W_0 - W_M) = \int_0^M g dh \quad (1)$$

где 0 – начало счета высот, M – точка земной поверхности, dh - элементарное превышение на каждой нивелирной станции, g - текущее ускорение силы тяжести по нивелирной линии.

Поэтому, натуральная система координат не применяются на данном этапе развития технологий, ведь для её применения необходимо получать данные о значении ускорения силы тяжести на каждой точке остановки прибора практически, это на данный момент нереализуемо. По этой причине геодезистами и введены различные системы координат, которые относятся к различным плоскостям или эллипсоидам. Что касается системы высот то они отсчитываются от квазигеоида и такие высоты называют нормальными.

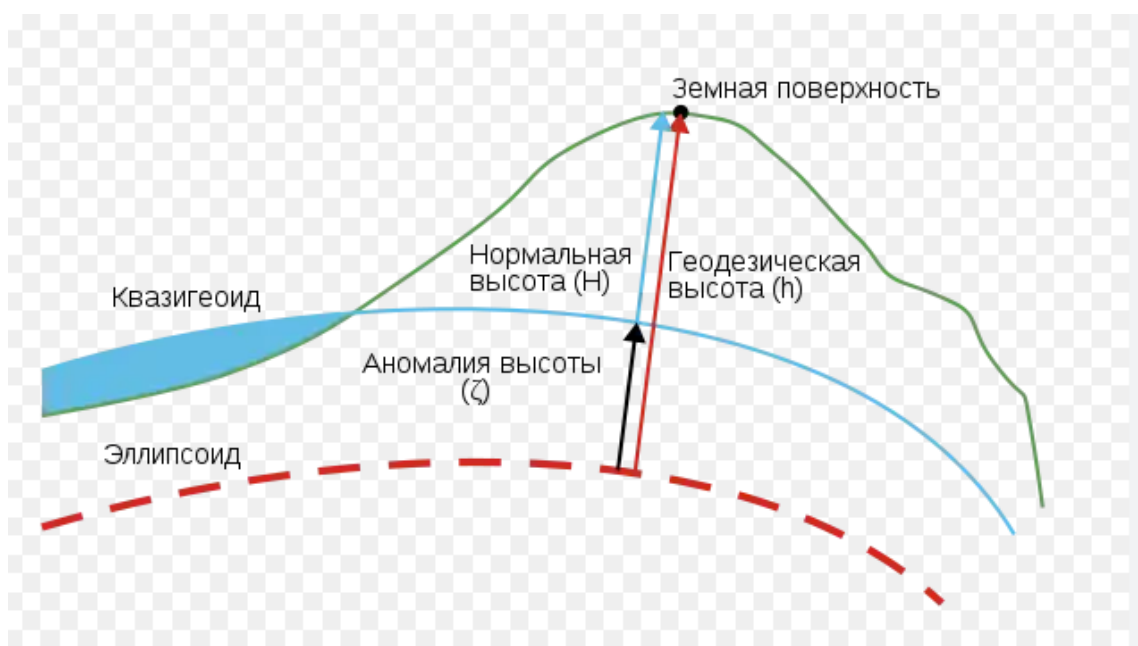


Рисунок 8 - Высоты используемые в геодезии.

Вообще говоря, на практике имеют, в основном, дело с тремя высотами: геодезической H^M -расстояние точки M местности над эллипсоидом, отсчитанное по нормали к эллипсоиду; ортометрической $H^{\text{орт.}}$ – расстояние от геоида, проходящего через начало счета высот, до точки земной поверхности, отсчитанное по отвесной линии этой точки; нормальной H_M^Y . – расстояние от точки земной поверхности до поверхности квазигеоида, отсчитанное по направлению нормальной силы тяжести, с высокой степенью приближения совпадающей с нормалью к эллипсоиду. Геодезическое сообщество России выступает за использование на практике системы нормальных высот, теоретически обоснованное Молоденским М.С., как не зависящей от пути нивелирования и позволяющей вычислить поправки для перехода к ней только по результатам измерений на поверхности Земли, то есть не требующей знания о внутренних распределениях масс.

Но при всем вышесказанном по факту многие государства на планете Земля используют отличающиеся друг от друга не только системы отсчета высот, но и различные системы координат. Страны постсоветского пространства, которые входят в блок СНГ, а также некоторые страны восточной Европы и некоторые страны ЕС применяют систему нормальных высот (Рисунок 9).

Так же в ЕС и в таких странах как США и Канада применяется ортометрическая высота по Гельмерту. Ещё в ЕС применяется нормально-ортометрическая высота, в таких странах как Австрия и Норвегия. Вид систем высот, будь то ортометрическая или нормальная, не имеет особого значения, для государств, которые могут обеспечить покрытие своей территории геодезическими сетями высокой точности. Но стоит заметить, что все эти высоты отсчитываются от уровней морей либо океанов и такие поверхности считаются уровненными, но это по факту не так, ведь разность между действительными высотами запада и востока, даже Каспийского моря площадь которого не так велика может составлять десятки сантиметров.

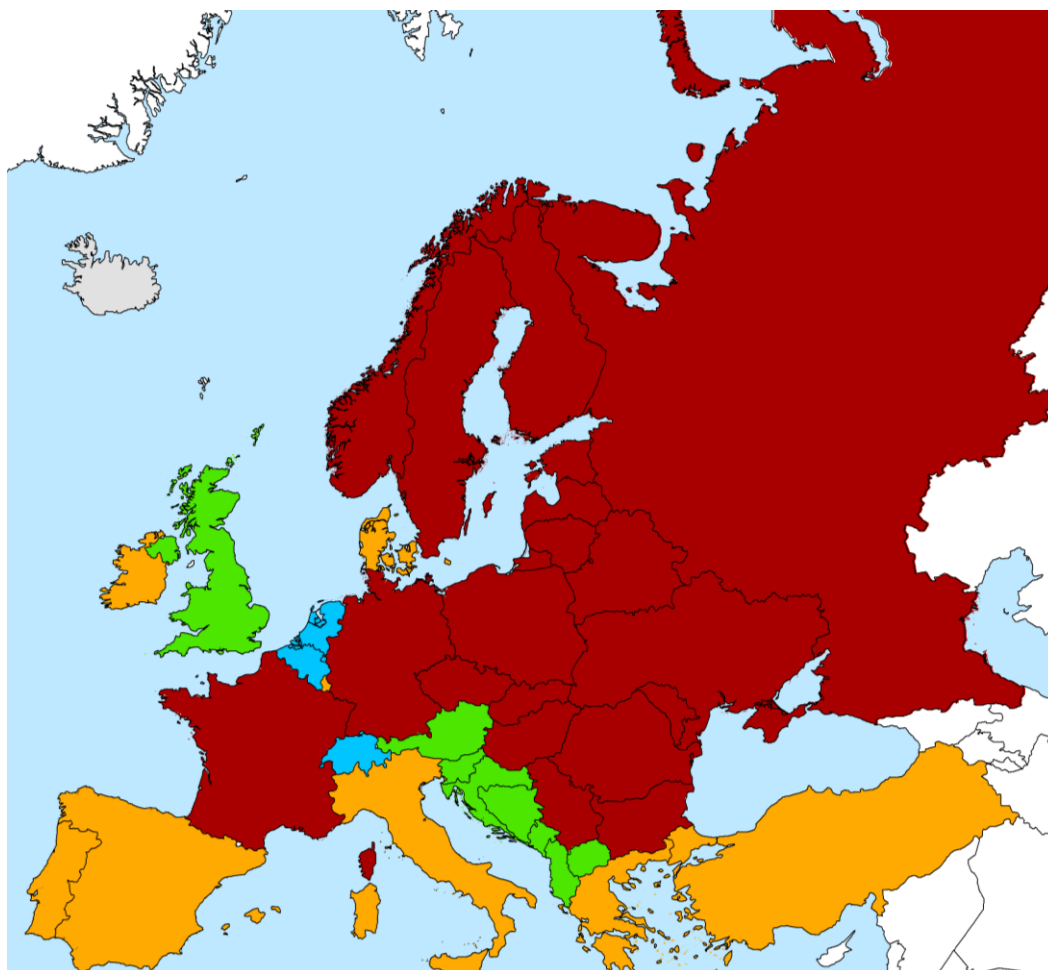


Рисунок 9 – Регионы, использующие различные системы отсчета высот, (красный- нормальные высоты, оранжевый- ортометрические высоты, зеленый- нормально- ортометрические высоты).

С геоидом тоже не все ясно, и как говорилось выше, его вынужденно заменяют квазигеоидом. Известно 2 определения геоида:

Геоид – это физическая модель Земли, поверхность которой совпадает с невозмущенной поверхностью морей и океанов, а под материками продолженная перпендикулярно к направлениям силы тяжести (отвесным линиям), проведенным через каждую точку земной поверхности.

Геоид – это физическая модель Земли, ограниченная уровенной поверхностью поля силы тяжести, проходящей через начало счета высот.

Теперь отметив особенности уровенной поверхности, стоит сказать, что за уровенную поверхность в данный момент принимают поверхность некоторых морей и океанов, к примеру, страны постсоветского пространства и некоторые

страны ЕС за уровненную поверхность принимают уровень Балтийского моря. Но, как сказано было выше, уровень морей и океанов не однороден. При применении океанографического нивелирования и спутниковой альтиметрии было выяснено, что уровни океанов в разных своих частях могут отличаться на метры. То есть моря и океаны на практике, а не в теории не являются уровненными поверхностями, по этой причине первое правило геоида указанное выше можно рассматривать только как теоретическое приближенное понимание его свойств. Суть в том, что если бы система отсчета высот по всей планете реализовывалась из одной точки, а на данный момент — это практически не осуществимо, то появилась бы единая планетарная система высот.

На данный момент каждое государство имеющее такую возможность, на свою территорию создает отдельный геоид. Безусловно, локальный геоид позволяет работать с большей точностью. Но все это осложняет единое высотное обеспечение нашей планеты.

Так же приводит к несовместимости с современными геодезическими возможностями и научно-практическими потребностями, связанными, например, с необходимостью работы с геоинформационными базами данных, выходящими за национальный уровень.

2.2 Балтийская система высот.

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. Ноль Кронштадтского футштока представляет собой многолетний средний уровень Балтийского моря. При использовании уровнемерных 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 настоящее время в России и ряде других стран СНГ используется Балтийская система высот 1977 года. Минусом Балтийской системы высот является то, что нуль на Кронштадтском футштоке не отражает изменения высоты футштока, вызванного вертикальными движениями литосферной плиты под Кронштадтом. Постановлением от 19 декабря 2022 года №883 Совет Министров постановил, что во исполнение Закона Республики Беларусь «О геодезической и картографической деятельности» в качестве Государственной системы отсчета координат определена система геодезических координат 1995 года (СК-95). Для вычисления геодезических координат – размеры референц-эллипсоида Красовского принимаются со следующими параметрами: большая полуось – 6 378 245 метров, малая полуось – 6 356 863,019 метра, сжатие – 1:298,3. Государственной системой отсчета высот является Балтийская система высот 1977 года. Государственной системой отсчета гравиметрических измерений, связанной с Глобальной абсолютной гравиметрической системой отсчета утверждена система GAGRS;

В настоящее время Балтийская система высот 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 линией 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. Основой сети являются нивелирные сети I и II классов (рисунок 10, 11).

Государственная нивелирная сеть Республики Беларусь представляет собой часть нивелирной сети дореволюционной России, а затем бывшего СССР. В 2008

году на территории Республики Беларусь линии нивелирования I класса были общей протяженностью около 4000 км (рисунок 9, 10).

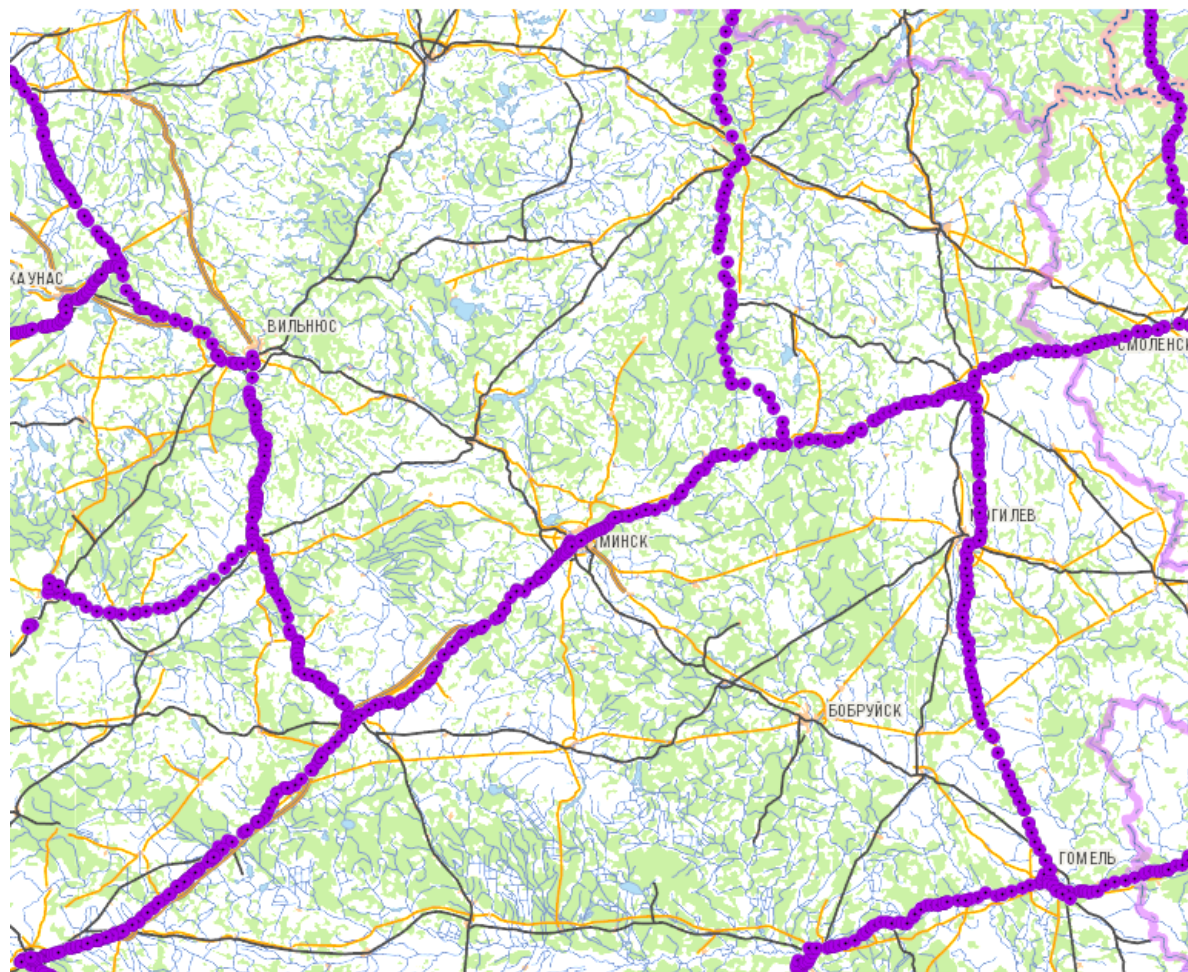


Рисунок 10 – Линии нивелирования I класса на территории Республики Беларусь.

После распада СССР, многие страны постсоветского пространства продолжили использовать имеющиеся нивелирную сеть и стали её развивать, сохранив связи между нивелирными сетями, которые теперь находятся на территории суверенных государств. В Республике Беларусь с некоторыми странами, такими как Литва, Латвия, Эстония и Украина эта связь потеряна.

Кроме установления Балтийской системы высот, нивелирные сети I и II классов 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.

Балтийская система высот, зафиксировавшая в определенный год на нулевой отметке, положение Кронштадтского футштока не отражает изменение высоты

этого Футштока в связи с опусканием или поднятием литосферной плиты под Кронштадтом.

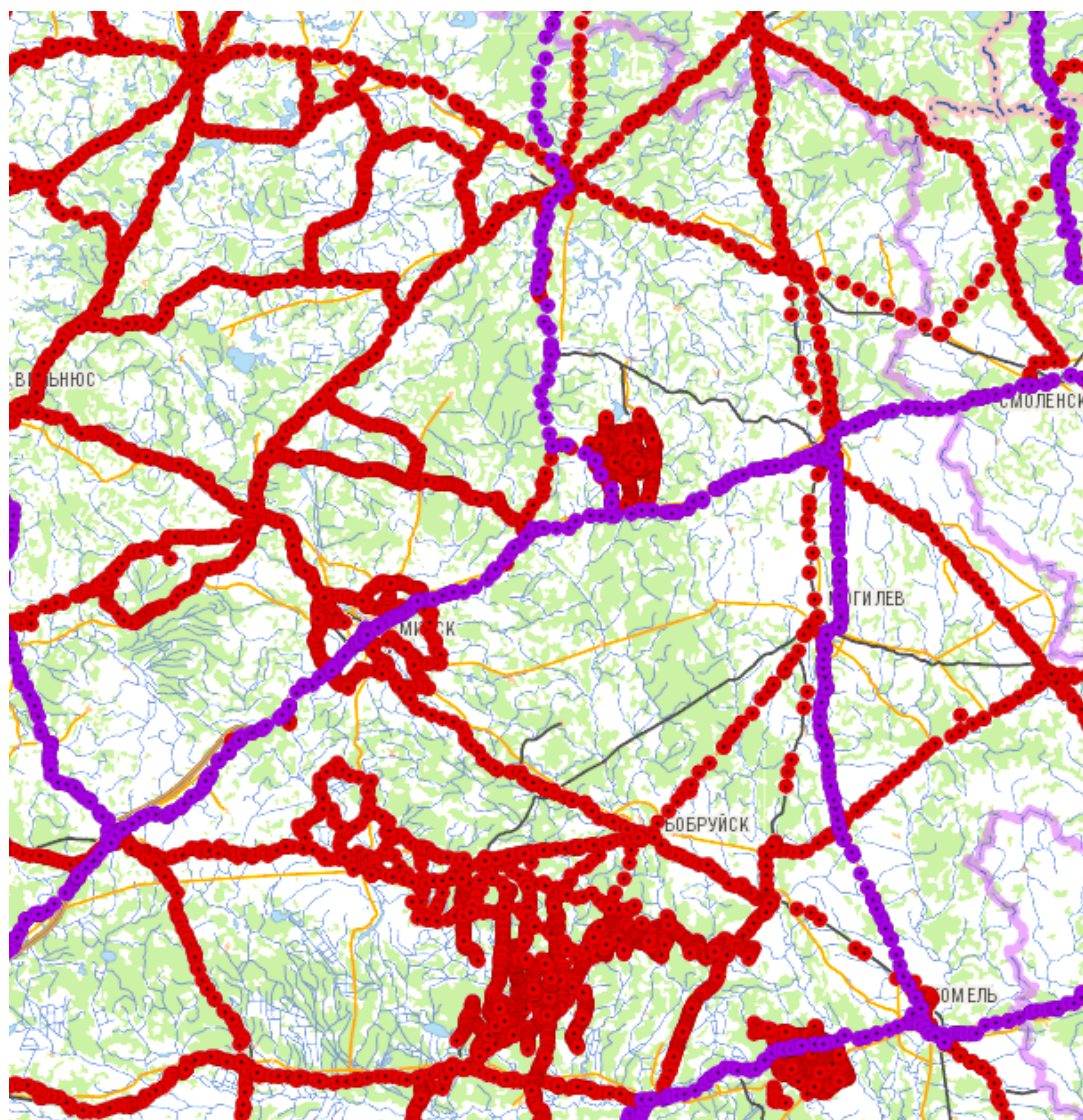


Рисунок 11 – Нивелирная сеть I и II класса на территории Республики Беларусь.

Также к недостаткам относятся и то что Балтийская система высот, зафиксирована в определённый год на нулевой отметке. Положение Кронштадтского футштока не отражает изменение высоты этого Футштока в связи с опусканием или поднятием литосферной плиты под Кронштадтом.

Глава 3. КОЛЕБАНИЯ УРОВНЕЙ МОРЕЙ И ОКЕАНОВ И ПРОБЛЕМА ВЫСОТНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В МИРОВОЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ ПРАКТИКЕ

3.1 Инструментальные наблюдения уровней морей и океанов: морские уровнемерные посты; спутниковая альтиметрия.

Развитие средств и методов наблюдения за параметрами состояния атмосферы и океана позволило выявить тенденции, свидетельствующие о происходящих глобальных изменениях в природной среде. Они связаны с изменением климата, солнечной активностью, геологическими и тектоническими условиями и антропогенными факторами. Прогнозирование изменений уровня моря и океанических вод важно для человеческой деятельности. В частности, для геодезистов уровень моря давно служит основой для определения начальных высот при создании сетей нивелирных съемок. В настоящее время существует несколько методов определения изменения уровня моря, среди которых важное место занимают геодезические методы, такие как наблюдения за уровнем моря и спутниковая альтиметрия. За долгую историю их существования накоплен значительный материал, который дает информацию о многолетних изменениях уровня воды Каспийского моря. Основной проблемой этого метода является гидростатическая подвижность литосферной плиты. Именно на гидростатическую подвижность литосферной плиты опираются прибрежные станции измерения уровня воды. Относительно новым методом наблюдения за изменением уровня моря на Каспии является метод усовершенствованных радиолокационных наблюдений. С начала использования радиовысотометров на борту спутников стало возможным наблюдать абсолютные высоты уровня моря в открытом океане. Технология измерения расстояния от космического объекта до земной поверхности начала разрабатываться в 1970-х годах и получила название спутниковой альтиметрии. Использование спутников позволило вести непрерывные

наблюдения за уровнем моря в Каспийском море. В спутниковой альтиметрии высота поверхности моря рассчитывается относительно земной поверхности. Высота уровня моря относительно поверхности геоида рассчитывается по измеренной высоте спутника над поверхностью моря и высоте орбиты спутника с учетом поправок, связанных с точностью альтиметрического оборудования, состоянием поверхности моря и прохождением сигналов через плотные слои атмосферы (рисунок 12).

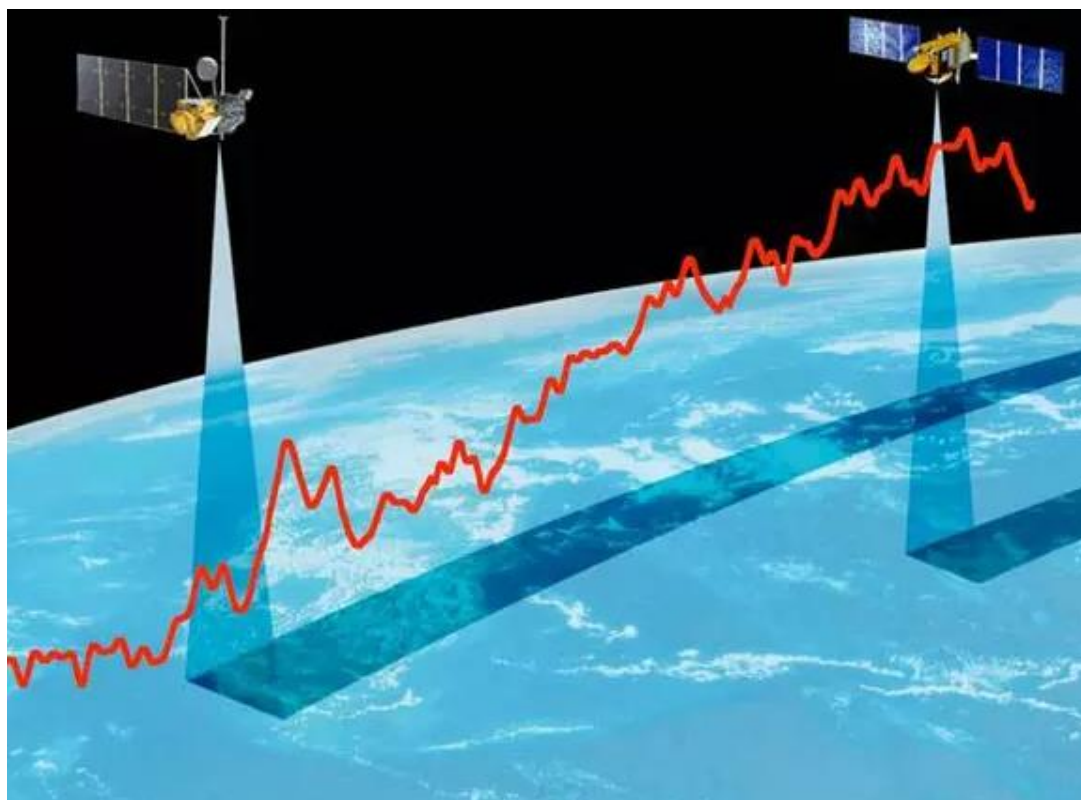


Рисунок 12- Пример спутниковой альтиметрии: измерение колебаний уровня моря.

В результате получается средняя высота над поверхностью моря. Это расчетное значение, полученное путем усреднения измерений высоты одним или несколькими спутниками и наиболее близкое к невозмущенной поверхности моря. Точность таких измерений составляет около 5 см. В частности, этот метод идеально подходит для получения уровня невозмущённых поверхностей морей и океанов, а также для построения геоидной уровневой поверхности. Ещё с помощью альтиметрии может быть получены как нормальные высоты, так и параметры гравитационного поля земли, могут обнаружиться аномалии в гравитационном поле,

что позволит к примеру, обнаруживать залежи полезных ископаемых. Сами спутники измеряют именно аномалии гравитационного поля земли. В (таблицах 1, 2, 3), показаны все миссии, которые проходили с конца 20 века и до наших дней, обозначены цели, которые ставили перед собой агентства запускающие спутники.

Таблица 1 Прошедшие миссии спутниковой альтиметрии.

Название	Агентство	Дата запуска и окончания миссии.	Высота	Наклон	Цели	Цикл
ГЕОСАТ	ВМС США	03.10.1985-31.01.1990	800 км	-	Измерение морского геоида.	-
ЭРС-1	ESA	07.17.1991-31.03.2000	785 км	98.52	Наблюдение за землёй и её окружением.	3, 57, 168 дней.
ТОПЕХ/Poseidon	Nasa/Cnes	10.08.1992-18.01.2006	1336 км	66	Измерение высоты поверхности морей и океанов.	9.9156 дней
ERS-2	ESA	21.04.1995-07.06.2011	785 км	98.52	Наблюдение за землёй и её окружением.	35 дней
GFO	ВМС США/Noaa	02.10.1998-26.11.2008	800 км	108	Измерение топографии океана.	17 дней
Джейсон-1	Nasa/Cnes	12.07.2001-07.01.2013	1336 км	66	Измерение высоты поверхности морей и океанов.	9,9156 дней
Envisat	ESA	03.01.2002-06.08.2012	782.4-799.8 км	98.55	Наблюдение за атмосферой и поверхностью Земли.	30-35 дней
Джейсон-2	Nasa/Cnes/Eumetsat/Noaa	20.06.2008-10.10.2019	1336 км	66	Измерение высоты поверхности морей и океанов.	9,9156 дней
HY-2A	Китайская академия космических технологий.	08.15.2011-09.14.2020	971 км	99.3	Наблюдение за динамикой океана.	14, 168 дней

Таблица 2. действующие миссии спутниковой альтиметрии.

Название	Агентство	Дата запуска и окончания миссии.	Высота	Наклон	Цели	Цикл
Cryosat-2	ESA	04.08.2010	717 км	92	Полярные наблюдения.	369 дней
Saral	Irso/Cnes	25.02.2013	800 км	98.55	Наблюдение за океаном.	35 дней
Джейсон-3	Nasa/Cnes/Eumetsat/Noaa	01.17.2016	1336 км	66	Измерение высоты поверхности морей и океанов.	10 дней
Sentinel-3A	Esa/EU	02.16.2016	814.5 км	98.65	Наблюдение мониторинг земли.	27 дней
Sentinel-3B	Esa/EU	25.04.2018	814.5 км	98.65	Наблюдение мониторинг земли.	27 дней
HY-2B	Китайская академия космических технологий.	25.10.2018	973 км	99.3	Наблюдение за динамикой океана.	14, 168 дней
CFOSAT	CNSA/Cnes	29.10.2018	500 км	97	Измерение состояния моря.	-
HY-2C	Китайская академия космических технологий.	21.09.2020	957.583 км	66	Наблюдение за динамикой океана.	10 дней
Джейсон-CS	ESA/Eumetsat/EU/Cnes/Noaa/Nasa	21.11.2020	1336 км	66	Измерение высоты поверхности моря.	10 дней
HY-2D	Китайская академия космических технологий.	19.05.2021	971 км	66	Наблюдение за динамикой океана.	10 дней
SVOT	Cnes/Nasa/CSA/UKSA	16.12.2022	890 км	77.6	Наблюдение мониторинг земли.	21 дней

Таблица 3. Будущие миссии спутниковой альтиметрии.

Название	Агентство	Дата запуска и окончания миссии.	Высота	Наклон	Цели	Цикл
Sentinel-3C	Esa/EU	30.10.2024	814.5 км	98.65	Наблюдение мониторинг земли.	27 дней
Страж-6Б	ESA/Eumetsat/EU/Cnes/Nasa	30.11.2025	1336 км	66	Измерение высот морей и океанов.	10 дней
Sentinel-3D	Esa/EU	2027	814.5 км	98.65	Наблюдение мониторинг земли.	27 дней
Кристалл-А	Esa/EU	2027	683.62 км	92	Мониторинг морского льда и океанов.	367 дней

В процессе работы альтиметрических спутников, которые выполняли различные задачи, поставленные агентствами, были составлены карты гравитационных аномалий планеты, благодаря этим данным смогли построить достаточно точную гравитационную модель земли. Наибольшую точность имеет модель EGM2008, основанная на данных со спутников GRACE и CHAMP. Спутниковая альтиметрия - один из активных методов дистанционного зондирования земной поверхности со спутников наблюдения Земли. Спутниковая альтиметрия относится к одному из активных методов дистанционного зондирования земной поверхности с космических аппаратов. По времени возвращения зондирующих радиоимпульсов можно рассчитать расстояние от спутника до поверхности Земли и определить высоту над уровнем моря. Подобный метод позволяет значительно уменьшить стоимость гравиметрических съёмок, так же данные спутниковой альтиметрии имеют высокую точность. Одним из главных недостатков этого метода является невозможность определения высот геоида над сушей и ледяным покровом. В таких случаях требуется сочетание спутниковых и

наземных наблюдений. Однако, поскольку гравитационные измерения должны проводиться на поверхности геоида, наземные измерения оказались неспособны исследовать поверхность геоида с высокой точностью. Еще одним существенным недостатком метода спутниковой альтиметрии является узкий диапазон наблюдений. Помимо описанных выше методов наблюдений, существуют также косвенные методы, а именно вычислительные, которые изучают изменения температуры и солености водной толщи за определенный период времени и оценивают соответствующие изменения уровня моря. Одним из наиболее доступных методов изучения этих изменений являются многократные исследования океанических разрезов, которые могут быть использованы для определения тенденций потепления (похолодания) и засоления (пресной воды) в определенных районах океана или морей. Северная Атлантика является наиболее изученным регионом в этом отношении и имеет наиболее четкие свидетельства потепления в глубоководной части океана.

3.2 Влияние гравитационного поля на высотное обеспечение.

При изучении естественных и антропогенных современных деформационных процессов в виде деформации земной коры путем многократных геодезических наблюдений на геодинамических полигонах необходимым условием является строгий учет и исключение факторов, искажающих реальную картину деформаций. Поскольку геодезические измерения выполняются в реальном гравитационном поле и зависят от его состояния, к таким факторам следует отнести и вариации гравитационного поля. Вариации гравитационного поля во времени, в результате которых сравниваемые циклы геодезических измерений на геодинамических полигонах окажутся выполненными при различных состояниях этого поля.

Чтобы увидеть влияние гравитационного поля наиболее ярко необходимо сравнить результаты нивелирования произведенных в различный период времени. При выполнении повторного геометрического нивелирования необходимо учитывать возможные влияния гравитационного поля. Так, изменение направления отвеса Θ относительно земной поверхности в направлении хода геометрического

нивелирования может быть ошибочно интерпретировано как δh вертикальное перемещение точек земной поверхности – эффект Фоглера [51]. Эффект Фоглера это по сути изменение положения уровенной поверхности на что влияет изменение центра масс на станции, что при работе с нивелиром будет влиять на положение пузырька уровня на какой то угол Θ (рисунок 13).

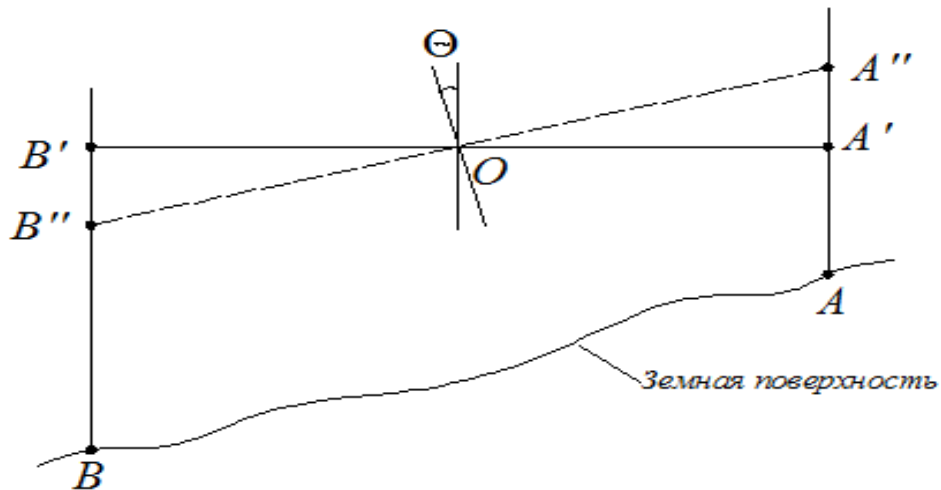


Рисунок 13 – Изменение разности высот на участке $l \approx A'B'$, обусловленное изменением Θ направления отвеса (точка O – положение нивелира).

Влияние наклона отвесной линии приводит к изменению положения уровня на одной и той же точке с течением времени и это влияние с недавнего времени стало возможно вычислить на основании производства повторных гравиметрических съемок и появления карт вариаций ускорения силы тяжести

Подобные расчеты для количественной оценки связи современных вертикальных движений земной коры (СВДЗК) и изменений ускорения силы тяжести выполнены В.Ф. Еремеевым, М.И. Юркиной, А.Ш. Файтельсоном, Э.Э. Фотиади, Г.И. Каратаевым, В.Г. Коломогоровым, В.Г. Черемисиным, В.И. Щегловым, Ю.В. Антоновым, Д.В. Абрамовым, С.Г. Бычковым, А.В. Овчаренко, М.Н. Дробышевым, Д.В. Обраменко, В.Н. Кошеновым [52-55] и другими учеными и показали, что эти изменения могут существенно превышать влияние, которое можно отнести за счет современных вертикальных движений.

Далее в работе будет показано влияние вышеперечисленных факторов на примере территории Беларуси.

В работе выбран Белорусский геодинимический полигон по причине того, что он проходит по всей территории Беларуси и пересекает все тектонические разломы страны (рисунок 14). Данный полигон проложен по линии Лида-Россоны-Борисов-Калинковичи-Лида и состоит из 29 пунктов (шаг 30-50 км), расположенных как на стабильных блоках земной коры, так и в зонах глубинных разломов.



Рисунок 14 – Схема геодинимического гравиметрического полигона Беларуси.

Вариации гравитационного поля на Белорусском геодинимическом гравиметрическом полигоне определялись на основании результатов гравиметрических измерений, выполненных в 1996г. и 1998г. «Институтом геологических наук НАН Беларуси». В 1996г. приращения ускорения силы тяжести между пунктами полигона определены двумя гравиметрами ГНУКС со средней ошибкой $\pm 0,039$ мГал, а в 1998г. – двумя гравиметрами ГНУКС и одним гравиметром ГНУКВ со средней ошибкой $\pm 0,020$ мГал [56].

Для обеспечения высокой точности измерений использовался относительный метод с быстрым возвращением на исходный пункт по схеме $A(t'_A) \rightarrow A(t_B) \rightarrow A(t''_A)$. Согласно [56], если $t''_A - t'_A$ менее 3-х часов, то лунно-солнечные

возмущения и дрейф нуля отечественных гравиметров изменяются линейно на отрезке АВ. Постулировалось положение, что приращение поля $g(A, t''_A) - g(A, t'_A)$ за столь малый промежуток времени практически равно нулю (или изменяется линейно). Такая схема наблюдений исключала влияние указанных факторов на измеряемое между пунктами А и В приращение поля силы тяжести, которое можно отнести к моменту времени t'_A .

Для получения фактического ускорения силы тяжести g на опорных пунктах был использован сайт [60]. Для исследований в работе была выбрана глобальная модель поля силы тяжести Земли GECO, оценка точности которой для территории Беларуси показывает хорошую сходимость [57].

На сайте необходимо выбрать глобальную модель поля силы тяжести Земли, в нашем случае это GECO, затем используя граничные координаты необходимой зоны на местности, вводим их в соответствующие поля HTML-страницы сайта (рисунок 15), выполняется расчёт, и мы получаем текстовый файл с действительными значениями ускорения силы тяжести с заданным шагом по сетке. На (рисунке 16) приведена модель ускорения силы тяжести, построенная по данным полученного текстового файла, на которую нанесены пункты геодинамического гравиметрического полигона Беларуси.

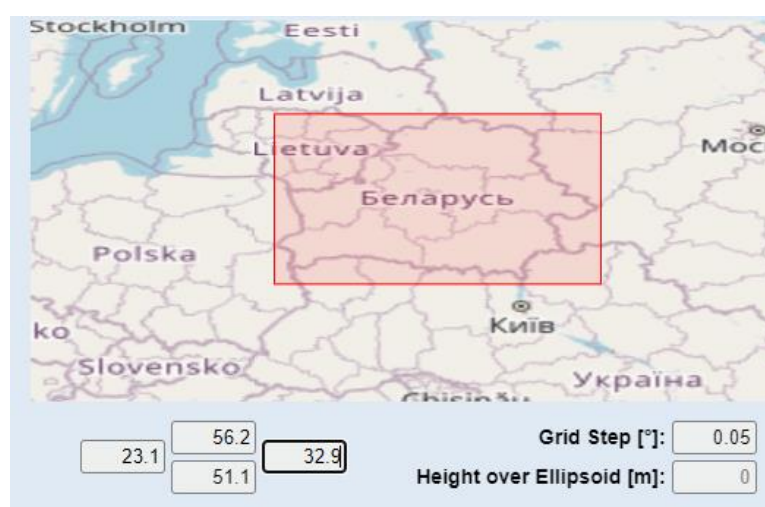


Рисунок 15 - Задание широты, долготы и шага сетки.

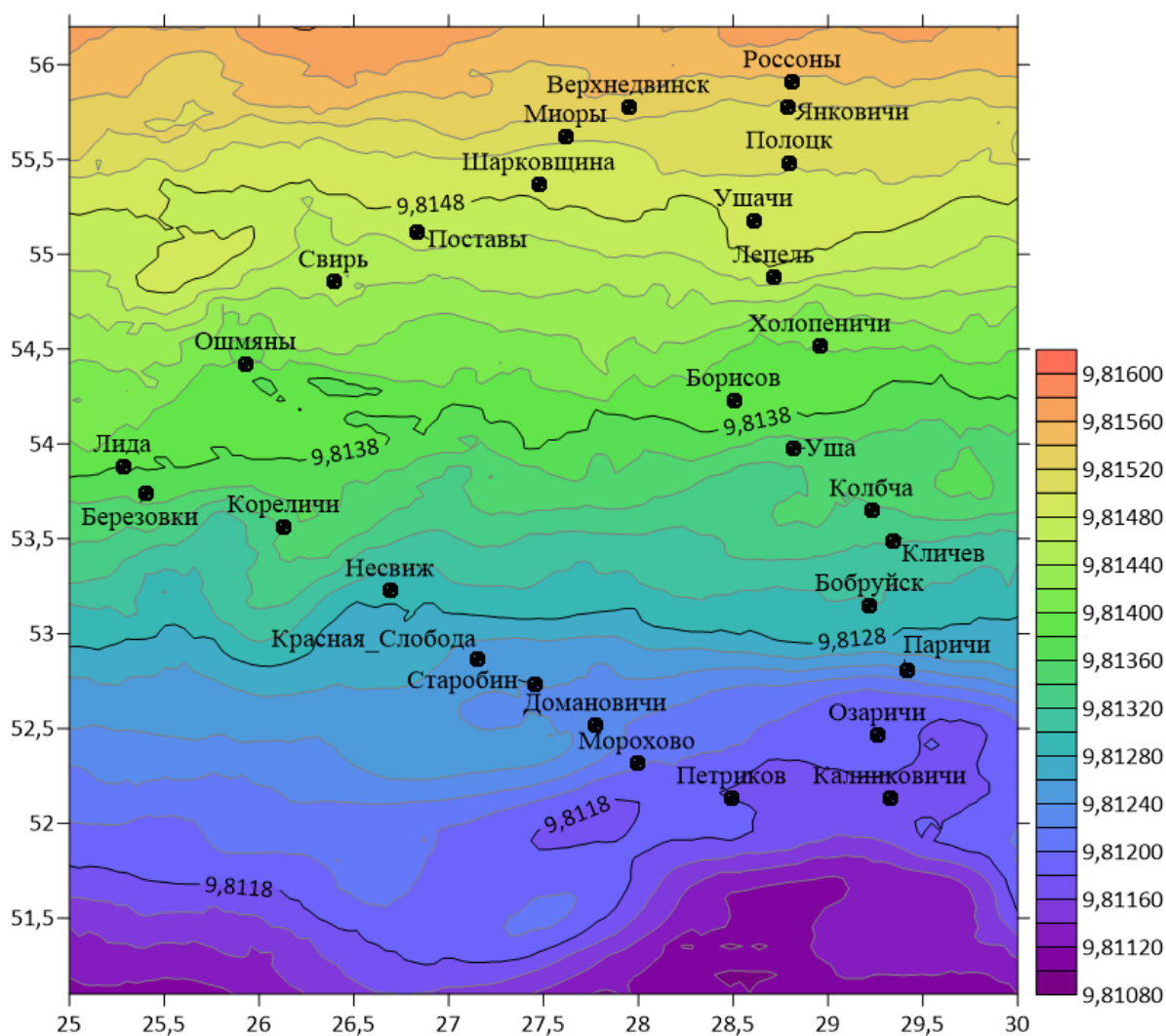


Рисунок 16 - Модель ускорения силы тяжести.

В таблице 4 представлены приращения ускорения силы тяжести, а так же значения действительной силы тяжести на гравиметрических пунктах, один из которых опорный (гравиметрический пункт «Лиды», расположенный на стабильном Вильнюсском блоке земной коры).

Вариации гравитационного поля на Белорусском геодинатическом гравиметрическом полигоне определялись на основании результатов гравиметрических измерений, выполненных в 1996г. и 1998г «Институтом геологических наук НАН Беларуси» [56].

Таблица 4 – Неприливные вариации поля силы тяжести на Белорусском геодинамическом гравиметрическом полигоне [63].

№ п/п	Название гравиметрических пунктов	Тип пункта: на блоке, в зоне разлома	Приращение Δg между пунктами, мГал		Вариации поля по приращениям, мГал	Вариации поля, мГал	g , m/c^2
			1996	1998			
1	Лида	Блок	0	0	0	0	9,81384
2	Ошмяны	Блок	10,786	10,844	0,058	0,058	9,81402
3	Свирь	Блок	49,586	49,488	-0,098	-0,040	9,81449
4	Поставы	Блок	21,521	21,465	-0,056	-0,096	9,81470
5	Шарковщина	Блок	14,258	14,122	-0,136	-0,232	9,81484
6	Миоры	Разлом	16,817	17,016	0,199	-0,033	9,81505
7	Верхнедвинск	Блок	38,263	38,354	0,091	0,058	9,81535
8	Россоны	Блок	-7,274	-7,488	-0,214	-0,156	9,81538
9	Янковичи	Блок	-9,401	-9,322	0,079	-0,077	9,81508
10	Полоцк	Разлом	-12,776	-13,040	-0,264	-0,341	9,81509
11	Ушачи	Блок	-28,256	-28,326	-0,070	-0,411	9,81485
12	Лепель	Блок	-13,142	-13,149	-0,007	-0,418	9,81467
13	Холопеничи	Разлом	-67,646	-67,458	0,188	-0,230	9,81401
14	Борисов	Разлом	-5,412	-5,323	0,089	-0,141	9,81393
15	Уша	Блок	-37,982	-37,975	0,007	-0,134	9,81353
16	Колбча	Блок	-18,885	-18,833	0,052	-0,082	9,81336
17	Кличев	Блок	-14,567	-14,345	0,222	0,140	9,81323
18	Бобруйск	Блок	-27,368	-27,481	-0,113	0,027	9,81296
19	Паричи	Блок	-50,499	-50,281	0,218	0,195	9,81238
20	Озаричи	Блок	-53,442	-53,712	-0,270	-0,075	9,81193
21	Калинковичи	Блок	-14,595	-14,567	0,028	-0,047	9,81172
22	Петриков	Блок	0,220	0,110	-0,110	-0,157	9,81179
23	Морохово	Блок	29,860	29,741	-0,119	-0,276	9,81204
24	Домановичи	Блок	25,779	26,195	0,416	0,140	9,81233
25	Старобин	Блок	6,628	6,193	-0,435	-0,295	9,81240
26	Красная Слобода	Блок	7,904	7,997	0,093	-0,202	9,81248
27	Несвиж	Блок	43,158	43,020	-0,138	-0,340	9,81287
28	Кореличи	Разлом	56,496	56,656	0,160	-0,180	9,81351
29	Березовки	Блок	21,022	21,262	0,240	0,060	9,81365
30	Лида	Блок	18,897	18,837	-0,060	0	9,81384

Далее выполним расчет, влияния данных вариаций ускорения силы тяжести на результаты повторного геометрического нивелирования. Для этого были определены величины изменения направления отвеса Θ по формуле (2) на исследуемой территории за представленный временной период T 1996-1998гг. при условии равно вероятности возмущения силы тяжести по каждой из трех осей

декартовых координат, что вполне оправдано для равнинной территории Беларуси [51].

$$\Theta'' = 2 \frac{\delta g_t}{g} \quad (2)$$

где g - значения силы тяжести

Связь δg_t изменения силы тяжести с углом Θ согласно формуле (2) вполне соответствуют выводам для равновероятного изменения горизонтальных и вертикальных составляющих силы тяжести: изменениям направления отвеса 0,1"-0,2" соответствуют изменения силы тяжести 0,5-1 мГал. Модель изменения направления отвеса Θ согласно формуле (2) представлена на (рисунке 17). Ускорение силы тяжести получено по данным глобальной модели поля силы тяжести Земли GECO.

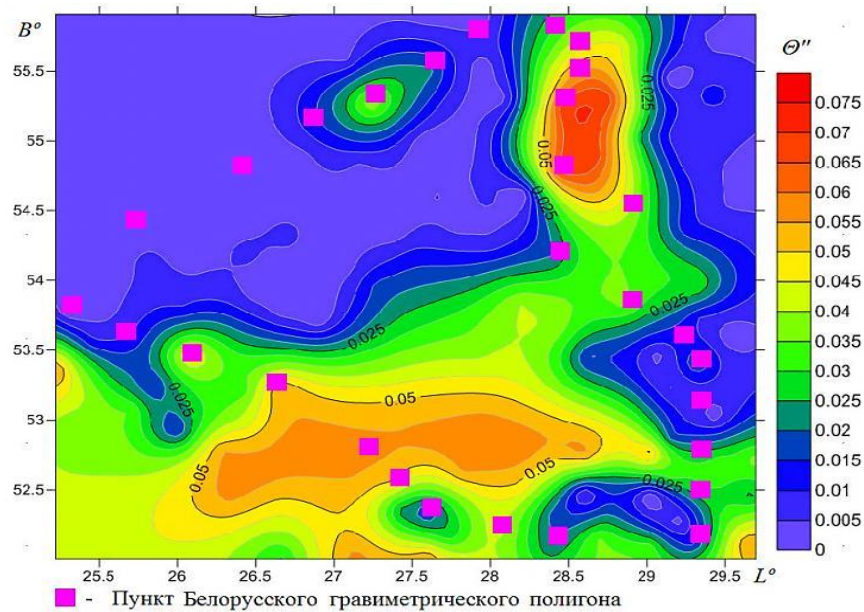


Рисунок 17 – Модельная карта изменения направления отвеса на территорию Белорусского геодинимического гравиметрического полигона.

Расчет влияния изменения направления отвеса Θ за представленный период на результаты геометрического нивелирования, проложенного по некоторым линиям Белорусского геодинимического гравиметрического полигона, представлен в таблице (4). Влияние на превышение между точками i и $i+1$ составит [51]:

$$\delta h = L \cdot \text{tg}\left(\frac{\theta_i + \theta_{i+1}}{2}\right) \quad (3)$$

Представленное в таблице (4) изменение высот получено при абсолютной неподвижности исследуемых точек. Рассчитанная величина δh больше ошибок высокоточного нивелирования.

$$m = \pm \sqrt{0,8^2 L + 0,08^2 L^2}, \text{ мм} \quad (4)$$

Таблица 5 – Влияние изменения направления отвеса Θ за период 1996-1998гг. на результаты геометрического нивелирования.

Нивелирный ход	L , км	Θ_i , "	Θ_{i+1} , "	Θ_{cp} , "	δh , мм	m , мм
1	2	3	4	5	6	7
Лида- Ошмяны	74	0	0.012	0.006	2.15	$\pm 9,1$
Ошмяны- Свирь	56	0.012	0.009	0.011	2.98	$\pm 7,5$
Свирь- Поставы	41	0.009	0.020	0.015	2.97	$\pm 6,1$
Поставы- Шарковщина	50	0.020	0.047	0.034	8.24	$\pm 6,9$
Шарковщина- Миоры	30	0.047	0.007	0.027	3.92	$\pm 5,0$
Миоры- Верхнедвинск	27	0.007	0.012	0.01	1.31	$\pm 4,7$
Верхнедвинск- Россоны	57	0.012	0.032	0.022	6.08	$\pm 7,6$
Россоны- Янковичи	16	0.032	0.016	0.024	1.86	$\pm 3,4$
Янковичи- Полоцк	35	0.016	0.069	0.043	7.29	$\pm 5,5$
Полоцк- Ушачи	37	0.069	0.084	0.077	13.81	$\pm 5,7$
Ушачи- Лепель	40	0.084	0.085	0.085	16.48	$\pm 6,0$
Лепель- Холопеничи	47	0.085	0.047	0.066	15.04	$\pm 6,6$
Холопеничи- Борисов	45	0.047	0.029	0.038	8.29	$\pm 6,5$
Борисов- Уша	37	0.029	0.027	0.028	5.02	$\pm 5,7$
Уша- Колобча	47	0.027	0.017	0.022	5.01	$\pm 6,6$
Колобча- Кличев	20	0.017	0.029	0.023	2.23	$\pm 3,9$
Кличев- Бобруйск	45	0.029	0.006	0.018	3.92	$\pm 6,5$
Бобруйск- Паричи	41	0.006	0.040	0.023	4.57	$\pm 6,1$
Паричи- Озаричи	42	0.040	0.015	0.028	5.70	$\pm 6,2$
Озаричи- Калинковичи	40	0.015	0.010	0.013	2.52	$\pm 6,0$
Калинковичи- Петриков	60	0.010	0.032	0.021	6.11	$\pm 7,8$
Петриков- Морохово	40	0.032	0.056	0.044	8.53	$\pm 6,0$

Продолжение таблицы 5

1	2	3	4	5	6	7
Морохово- Домановичи	29	0.056	0.029	0.043	6.04	$\pm 4,9$
Домановичи- Старобин	34	0.029	0.060	0.045	7.42	$\pm 5,4$
Старобин- Красная Слобода	25	0.060	0.041	0.051	6.18	$\pm 4,5$
Красная Слобода- Несвиж	53	0.041	0.069	0.055	14.14	$\pm 7,2$
Несвиж- Кореличи	55	0.069	0.037	0.053	14.13	$\pm 7,4$
Кореличи- Березовки	46	0.037	0.012	0.025	5.57	$\pm 6,6$
Березовки- Лида	25	0.012	0.000	0.006	0.73	$\pm 4,5$

По полученным результатам из (таблицы 5) видно, что даже на сейсмически неактивной территории Беларуси присутствуют достаточно большие вариации ускорения силы тяжести. Наибольшие значения колебаний ускорения тяжести присутствуют около г. Полоцка, г. Ушачи, г. Лепель, г. Холопеничи, г. Красная Слобода, г. Несвиж, г. Кореличи. В некоторых случаях, как можно видеть из таблицы, ошибка за уклонение отвеса в двое превосходит точность высокоточного нивелирования.

Далее в работе был выполнен расчет вариаций ускорения силы тяжести и результаты гравиметрических наблюдений на Краснослободском полигоне за период 2005-2007 гг. Результаты измерений были взяты из источника под названием геофизический мониторинг [61]

Краснослободский локальный полигон был создан с целью установления аномальности поведения вариаций во времени гравитационного и магнитного полей в зоне пересечения полигоном Краснослободского глубинного разлома. В 2004 г. был спроектирован первый локальный полигон по линии Новые Рачковичи, Чаплицкий Двор, Сад 3, Сад 2, Сад 1, Танежицы, Замошье, секущий Краснослободский разлом. В 2005 и 2006 гг. на этом полигоне выполнены гравиметрические и магнитометрические измерения. В 2007 г. в результате визуальной и инструментальной рекогносцировки, изучения материалов повторных геофизических наблюдений и детальных карт гравитационных и магнитных аномалий было решено Краснослободский локальный

геодинамический полигон, заложить западнее г. Слуцк в 20 км по линии Лядно-Новые Рачковичи-Замощье-Большие Завшицы, общей длиной около 22 км.

Для расчета вариаций ускорения силы тяжести, используем те же формулы что указаны выше. Расчёты представлены в таблицах (6 и 7). Так же на (рисунке 18) представлена схема расположения Краснослободского локального полигона. В таблице (6) представлены приращения ускорения силы тяжести, а также действительная сила тяжести на гравиметрических пунктах.

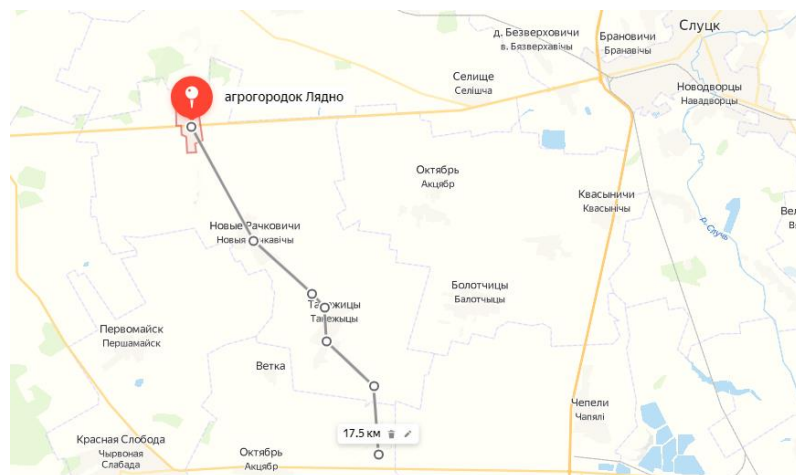


Рисунок 18. – Схема расположения Краснослободского локального полигона.

Таблица 6 – Непривлинные вариации поля силы тяжести на Краснослободском полигоне за период 2005-2007 гг.

Пункты полигона	Приращение Δg между пунктами, мГал			Вариации поля по приращениям, мГал	Вариации поля, мГал	$g, м/с^2$
	2005	2006	2007			
Лядно	0,000	0,000	0,000	0	0,000	9,81262
Н. Рачковичи	-	-	-8,710	0	0,000	9,81257
Чаплицкий Двор	-14,020	-13,902	-13,835	0,185	0,185	9,81252
Сквер	-3,990	-3,886	-3,959	0,031	0,216	9,81250
Танежицы	-1,085	-1,128	-1,365	-0,280	-0,064	9,81248
Замощье	-1,150	-1,260	-1,328	-0,178	-0,242	9,81246
Взгорье	-	-	-2,123	0	0	9,81244

Таблица 7 – Влияние изменения направления отвеса Θ за период 2005-2007 гг. на результаты геометрического нивелирования.

Нивелирный ход	L , км	Θ_i , "	Θ_{i+1} , "	Θ_{cp} , "	δh , мм	m , мм
Лядно- Н.Рачковичи	5.7	0	0	0	0	$\pm 2,0$
Н.Рачковичи-Чаплицкий Двор	3.8	0	0,038	0,038	0,7	$\pm 1,6$
Чаплицкий Двор- Сквер	1.5	0,038	0,044	0,041	0,3	$\pm 1,0$
Сквер- Танежицы	1.3	0,044	0,009	0,016	0,3	$\pm 0,9$
Танежицы- Замошье	3.4	0,009	0,05	0,029	0,5	$\pm 1,5$
Замошье- Взгорье	3.2	0,05	0	0,025	0,4	$\pm 1,5$

Как можно видеть по данным таблицы 7, на территории полигона присутствуют незначительные вариации ускорения силы тяжести. Предположительно их малые величины вызваны короткими длинами секций нивелирования.

Далее рассмотрим Полоцкий локальный геодинамический полигон (рисунок 19). Полоцкий локальный полигон, созданный для изучения геодинамических особенностей Полоцко-Курземского пояса разломов, состоит из десяти геофизических реперов: Ущелепки, Селявщина, Янковичи, Полоцкого геодинамического полигона Козьи Горки, Булавки, Репер 59, Заозерье, Яново, Гозберг, Завыдрино. Для детального изучения внутреннего строения Полоцкой зоны разломов и наблюдения за ее динамическим состоянием в пределах внутренней части Полоцкой зоны разломов был построен Полоцкий микрополигон геодинамического мониторинга.

Данные представлены в таблице 8 за 2007-2010 года. Они взяты в работе Национальная система мониторинга окружающей среды Республики Беларусь: результаты наблюдений, 2012 [62]. Для данной территории была построена модель ускорения силы тяжести, которая приведена на (рисунке 20).

Согласно данных (таблицы 9) можно отметить, что присутствуют значимые вариации ускорения силы тяжести. Например, на участке 59 - Заозерье поправка за уклонения отвеса превышает точность высокоточного нивелирования более чем в 5 раз.

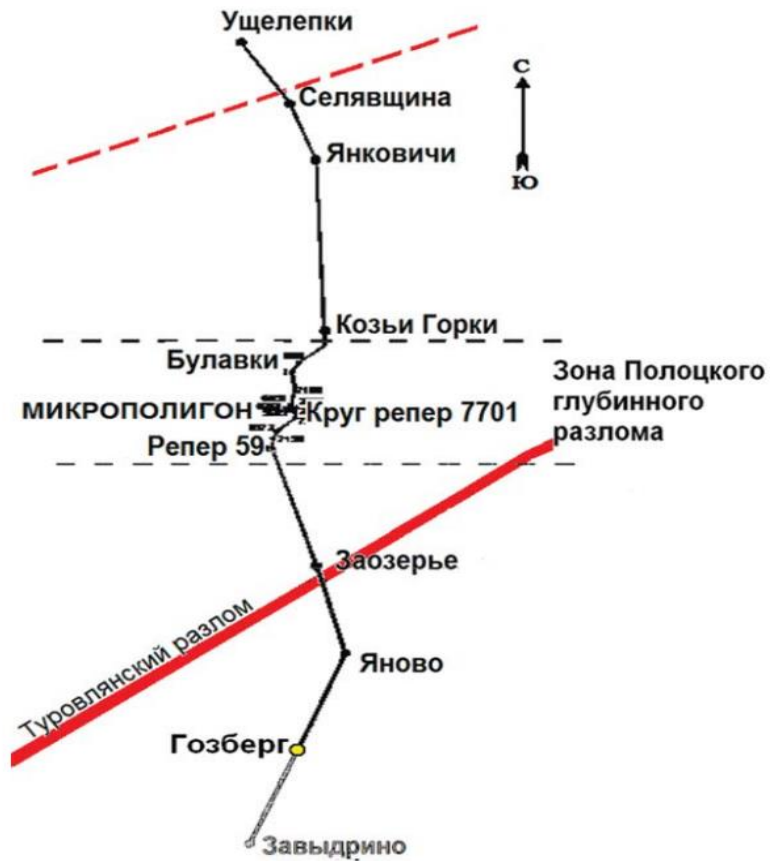


Рисунок 19. – Схема расположения пунктов Полоцкого локального геодинимического полигона.

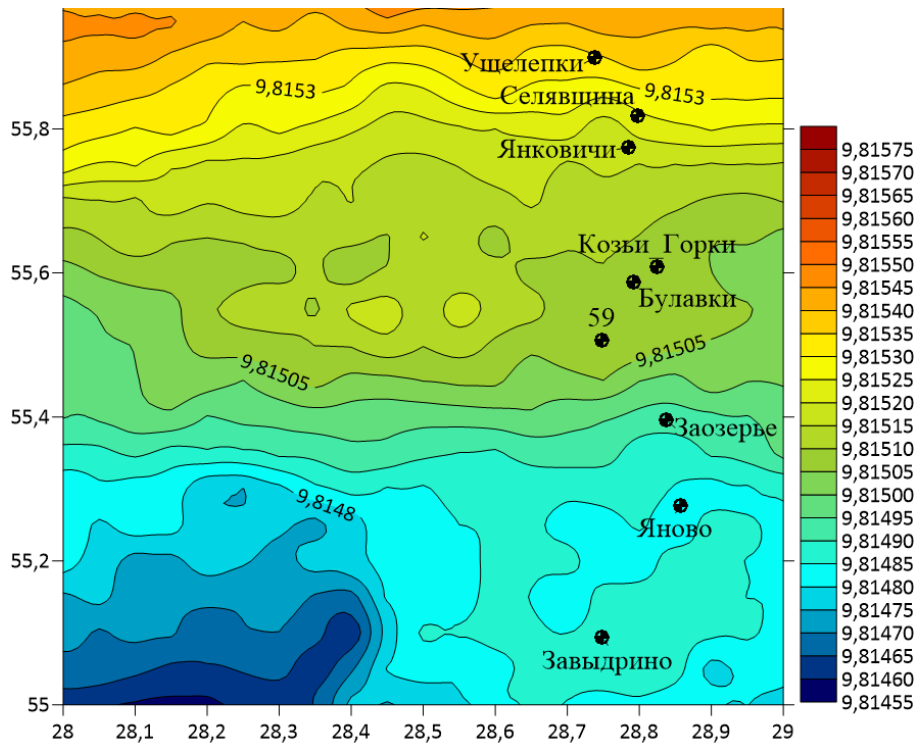


Рисунок 20 - Модель ускорения силы тяжести на Полоцкий локальный геодинимический полигон.

Таблица 8 – Неприливные вариации поля силы тяжести на Полоцком локальном геодинамическом полигоне.

Названия пунктов	Приращение гравитационного поля между пунктами, мГал				Вариации поля по приращениям, мГал 2007 г.-2010 г.	Вариации поля, мГал	$g, м/с^2$
	2007 г.	2008 г.	2009 г.	2010 г.			
Ущелепки	0	0	0	0	0	0	9,81533
Селявщина	-8,089	-9,689	-9,712	-8,231	-0,142	-0,142	9,81525
Янковичи	4,342	4,620	4,377	4,122	-0,220	-0,362	9,81519
Козьи Горки	-20,109	-23,003	-23,011	-20,204	-0,095	-0,457	9,81508
Булавки	2,860	3,215	3,383	2,932	0,072	-0,385	9,81509
59	5,911	5,475	5,900	5,354	-0,557	-0,942	9,81505
Заозерье	-21,375	-24,122	-24,403	-21,512	-0,137	-1,079	9,81491
Яново	-6,353	-7,234	-7,126	-6,533	-0,180	-1,259	9,81485
Завыдрино	-1,768	-1,89	-2,394	-1,931	-0,163	-1,422	9,81487

Таблица 9 – Влияние изменения направления отвеса Θ за период 2007-2010 гг. на результаты геометрического нивелирования.

Нивелирный ход	$L, км$	$\Theta_i, ''$	$\Theta_{i+1}, ''$	$\Theta_{cp}, ''$	$\delta h, мм$	$m, мм$
Ущелепки-Селявщина	9,5	0	0,029	0,015	0,69	$\pm 2,6$
Селявщина-Янковичи	6,1	0,029	0,074	0,052	1,54	$\pm 2,0$
Янковичи-Козьи Горки	18,7	0,074	0,093	0,084	7,52	$\pm 3,8$
Козьи Горки-Булавки	3,6	0,084	0,078	0,086	1,48	$\pm 1,6$
Булавки-59	6,5	0,078	0,191	0,135	4,26	$\pm 2,1$
59- Заозерье	22,2	0,191	0,220	0,206	22,18	$\pm 4,2$
Заозерье-Яново	10,1	0,220	0,256	0,238	11,66	$\pm 2,7$
Яново-Завыдрино	22,5	0,256	0,289	0,273	29,79	$\pm 4,2$

Результаты вычислений, представленные в (таблицах 5, 7 и 9) позволяют поставить под сомнение выводы, сделанные в [58] об отсутствии необходимости учета влияния вариаций гравитационного поля, на результаты повторного геометрического нивелирования, проложенного на равнинных и спокойных в

геологическом отношении территориях. Вывод о существовании вертикальных движений даже на равнинных и спокойных в геологическом отношении территориях, если он основан лишь на результатах измерений, можно сделать только на основании совместной обработки результатов повторного нивелирования и данных по изучению вариаций поля силы тяжести во времени. Что показывает необходимость учёта влияния силы тяжести особенно при высокоточном нивелировании, ведь в некоторых случаях эти ошибки больше необходимой точности.

3.3. Выбор оптимальной системы высот.

Выполняя геодезические работы, геодезисты в зависимости от поставленных задач, действуют в различных системах координат и системах высот. Причина здесь в том, что на территории государства существуют системы координат местного характера, государственная система координат и есть еще общеземные системы отсчета.

Несмотря на то, что выбор системы высот считается самым простым в трехмерном позиционировании точек, особенно в районах с обширной территорией, это довольно сложный выбор.

Основные требования к системе высот, в которой должны быть представлены результаты нивелирных съемок для решения широкого круга научных и практических задач, были сформулированы Пеллиненом [31] следующим образом:

- Высоты пунктов должны быть однозначны независимо от маршрута съемки.
- Высоты должны определяться исключительно по измерениям на поверхности Земли без привлечения каких-либо гипотетических данных о ее внутреннем строении Земли.
- Поправки в измеренные превышения за переход к принятой системе высот должны быть достаточно малы, чтобы ими можно было игнорировать в процессе съемки и при нивелировке низших классов.

- Принятой системе высот должен соответствовать достаточно строгий и удобный способ определения геоидальной части геодезической высоты H .
- Высоты должны быть по возможности постоянными для точек на одной уровнённой поверхности.

Нормальные и ортометрические высоты (рисунок 21) подходят к большинству требований, и по этой причине, эти высоты приняты за основу большинством стран, при высотном обеспечении территорий.

Ортометрические высоты естественно и полностью привязаны к фактическому гравитационному полю Земли, но их трудоёмко вычислять, учитывая необходимые аппроксимации изменения силы тяжести вдоль отвесной линии от поверхности к геоиду. С другой стороны, нормальные высоты вычисляются менее трудоёмко и не требуют реальных гравитационных наблюдений.

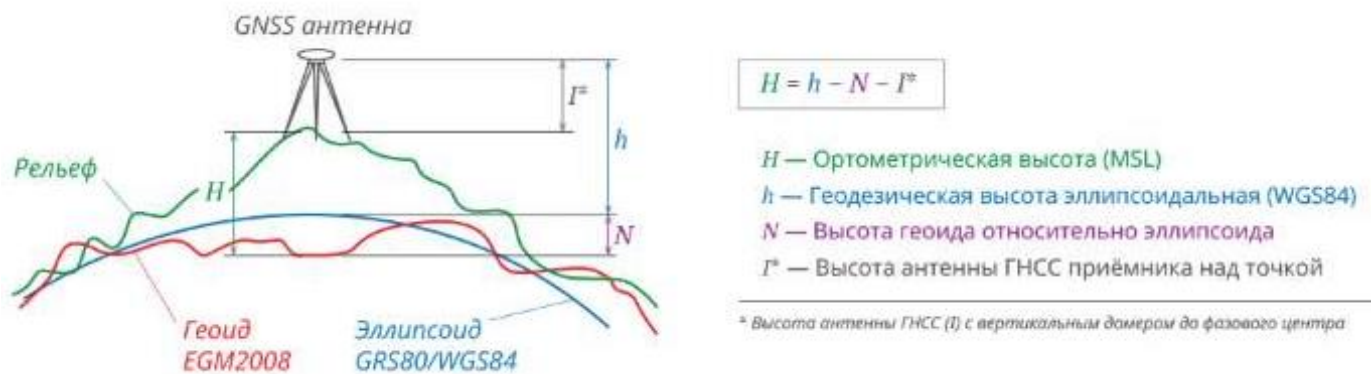


Рисунок 21. – Схема получения ортометрической высоты.

Современные принципы, устанавливающие начала отсчета высот также модифицируются. Они базируются на нормальных системах высот, развиты с учетом современных возможностей спутниковых технологий и инструментальной гравиметрии в работах и максимально свободен от противоречий традиционного подхода.

3.4. Современный подход к организации геодезического высотного обеспечения.

На данный момент важность создания единой системы отсчета высот для всей планеты невозможно переоценить. Учитывая это ГВО в мире и в отдельных странах на современном этапе развития геодезии и гравиметрии, могут быть реализованы, приведем выдержки из работы Г.В. Демьянова, автора данного подхода и активного участника его практической реализации.

Основная идея нового принципа создания единой системы мировых нормальных высот заключается в том, что единая система отсчета высот определяется поверхностью общего земного эллипсоида и потенциалом на поверхности этого эллипсоида, который считается нормальным. Понятие геоида в этом случае формулируется как эквипотенциальная поверхность с потенциалом, равным нормали на поверхности общего земного эллипсоида.

В таком этом случае нормальная высота равна нулю в тех точках земной поверхности, где реальный потенциал равен нормали к поверхности общего земного эллипсоида. Исходя из новых принципов построения разработанной системы нормальных высот, необходимо соблюдать два основных условия.

Первое условие - создание оптимальных условий для применения в системах высотного обеспечения современных и высокоэффективных спутниковых методов GNSS - измерений.

Второе условие - сохранение и реализация научного и экономического потенциала традиционных методов геометрического нивелирования.

Создаваемая система высотного обеспечения не снизит роль существующих основных национальных ГВО - высокоточных геометрических нивелирных съёмки I и II классов.

Причина в том, что ГВО будет строиться на основе высокоточного нивелирования являющемся таким же необходимым компонентом общего комплекса данных на пунктах ФАГС и ВГС, как геодезические высоты и субвысоты. С этой целью каждый пункт ФАГС и ВГС включает два пункта ГВО, для которых определяются высокоточные спутниковые геодезические высоты. Во-вторых, существующая сеть нивелирных съемок остается средством распространения нормальной системы высот по всей стране, но уже не от одной опорной точки (нивелирной станции), а относительно пунктов ФАГС и ВГС в целом.

Принцип создания такой системы нормальных высот оптимально соответствует всей системе геодезического обеспечения, основанной на современных спутниковых технологиях. Высота которых определяется не только по высокоточным спутниковым наблюдениям, но и по гравитационным измерениям, а также по высокоточному геометрическому нивелированию. Такой подход к созданию ГВО, когда за основу берётся набор пунктов ФАГС, реализован в России [40], Вьетнаме [41] и других странах.

В России, например, согласно новым принципам, высотная опорная система определяется 64 пунктами ФАГС, а в перспективе-343 пунктами ВГС, на которых выполняются высокоточные спутниковые измерения. Абсолютные гравитационные измерения и высокоточное геометрическое нивелирование для определения высотных аномалий, геодезических высот и нормальных высот с высокой точностью Аномалии высоты, геодезические высоты и нормальные высоты могут быть определены с высокой точностью. Нормальные высоты, определённые в этих точках, точно обеспечивают исходную систему отсчёта высоты

$$H_i^y = \bar{H}_i + \bar{\zeta}_i \quad (5)$$

Знак(i) в уравнении формула (5) подчеркивает, что исходная база страны устанавливается не на одну точку ("ноль" Кронштадтского футштока), а на совокупность пунктов точнейшей спутниковой геодезической сети, оснащенной гравиметрическими высокоточным геометрическим нивелированием.

Очевидно, что на данном этапе реализации новых принципов перехода к глобальной системе отсчета высот, с учетом того, что в качестве национальной системы высот России функционирует система нормальных высот Балтийского моря 1977г., названная "нулем" Кронштадтского футштока, будет использоваться региональный геоид, проходящий через "ноль" Кронштадтского футштока, от которого в дальнейшем будет осуществляться переход к глобальной системе отсчета высот. Этот же принцип будет реализован в Беларуси после строительства ГВО и создания современной гравиметрической сети.

В 2015 году специалистами УП "Белаэрокосмогеодезия" были проведены работы по разработке и апробации методики и технических схем создания локальных моделей квазигеоида высот геометрическим и методами при построении точных локальных моделей квазигеоида в городе Минске и прилегающих к нему районах. В ходе работы было установлено, что для создания модели квазигеоида высот геометрическим методом для всей территории Республики Беларусь среднее кратчайшее расстояние между центральными пунктами не должно превышать 4-5 км, что может быть обеспечено плотностью 1 пункт на 20-25 км² сети съемки уровня СГС-1. Было подтверждено, что это можно обеспечить. На практике это требование затратное и трудновыполнимо по ряду причин. Поэтому для создания высокоточной модели квазигеоида высоты в масштабах страны необходимо собрать подробные данные о реальном гравитационном поле Земли.

Изучение международного опыта решения подобных задач на национальном уровне показывает, что такие модели могут быть получены либо гравиметрией в чистом виде, либо на основе сочетания гравиметрических данных, данных съемок

I и II классов и данных высокоточных спутниковых измерений. Особенности спутниковых методов наблюдения по сравнению с традиционными геодезическими методами (высокая точность, оперативность, всепогодность) заключаются в возможности одновременного определения как плановых координат, так и высотной составляющей, в том числе в режиме реального времени, с высокой точностью. Однако результатом определения спутниковых координат является геодезическая (эллипсоидная) высота, которая является геометрическим параметром, не связанным в явном виде с гравитационным потенциалом Земли (геопотенциалом) и представляет собой расстояние точки на физической поверхности Земли от условной математической поверхности (эллипсоида) в принятой системе отсчета координат.

В тоже время используемая на практике нормальная высота - это физический параметр, который по своей сути связан с геопотенциалом, но не с конкретной системой отсчета пространственных координат. Геометрическое нивелирование уступает спутниковым методам определения геодезических высот по стоимости и производительности, а также не позволяет осуществлять высокоточное перемещение высот на большие расстояния, что необходимо для создания глобальной системы отсчета высот. Геодезические высоты (в признанных системах отсчета геодезических координат) и нормальные высоты (в признанных системах отсчета высот) связаны между собой через квазигеоида высоты (аномалии высот). На данном этапе наличие национальных высокоточных моделей квазигеоида высот в качестве компонента национальной геодезической инфраструктуры является международным стандартом для высокоразвитых стран, позволяющим связать национальные (и глобальные) системы координат и высот в единое целое.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения магистерской диссертации получены следующие основные выводы и результаты:

1. На современном этапе, с развитием спутниковых технологий, неоспоримо доказано что морские и океанические поверхности не являются уровенными. Следовательно, объединить высотные государственные основы, развитые нивелирными сетями от морских футштоков, не представляется возможным.

2. Благодаря развитию спутниковых технологий, появляется возможность отказаться от использования уровней морей и океанов при высотном обеспечении планеты, а использовать для этого спутниковые построения (IGS, ФАГС, ВГС) в которых будут определены нормальные высоты и проведены гравиметрические наблюдения. Временные ряды мареографов и GNSS измерения стали стандартными наборами данных для различных научных и практических приложений. Однако эти данные деформируются из-за вертикального движения земной коры, основной причиной которого является ледниковая изостатическая корректировка. Следовательно, для обеспечения совместимости различных источников данных необходимо применять поправку за вертикальные движения земной коры, полученную либо на основе подходящей модели, либо с использованием методов спутниковой геодезии.

3. По результатам выполненных исследований, заключающихся в обработке открытых данных гравиметрических измерений на различных геодинамических полигонах Белоруссии, сделан вывод, что поправки за уклонение отвеса должны учитываться при высокоточном нивелировании, так как некоторые ошибки за уклонения отвеса превышают точность высокоточного нивелирования в двое.

4. При данном уровне развития геодезии в Белоруссии уже создана высокоточная гравиметрическая сеть 1-го класса и 2-го класса. Наличие гравиметрических данных, цифровой модели рельефа, данных главной высотной основы и GNSS измерений позволит создать национальную модель высот квазигеоида на территорию Республики Беларусь.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Вернадский В. И. Биосфера и ноосфера. — М.: Айрис-пресс, 2012. — 576 с. — (Библиотека истории и культуры). — 3000 экз. — ISBN 978-5-8112-4512-3.
2. Чижевский А. Л. Земное эхо солнечных бурь. — М., 1976.
3. Хаин В.Е., Халилов Э.Н. Пространственно-временные закономерности сейсмической и вулканической активности / Burgas. SWB, 2008. ISBN 978- 9952-451-00-9/. 304 С.,
4. E.N. Khalilov. Geochange: Problems of Global Changes of the geological Environment. Vol 1, London, 2010.
5. Мельников В.П., Костантиновская Л.В. Космопланетарная безопасность человечества (Космогонический аспект)/ научная монография, ООО «Буки Веди», Москва, 2014, 430 С.
6. Приходовский М.А. Анализ возможных причин влияния Юпитера на формирование солнечного цикла // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. — 2016. — № 7-4. — С. 547-552.
7. Usoskin, I. G., M. Schuessler, S. K. Solanki, and K. Mursula (2005), Solar activity, cosmic rays, and Earth's temperature: A millennium-scale comparison, J. Geophys. Res., 110, A10102, doi:10.1029/2004JA010946, 2005, С. 2-10.
8. В.А. Коваленко, Г.А. Жеребцов. Влияние солнечной активности на изменение климата // Оптика атмосферы и океана.- 2014.- 27 - №2. -- С. 134- 138.
9. В.Н. Калинин. Колебания уровня Каспия в инструментальный период // С-Петербург, 1994, 160 С.
10. В.В. Хаустов. О влиянии геодинамического фактора на водный баланс Каспия // Вестник СПбГУ, сер. 7, 2006, вып. 4, С. 20-36.
11. Соловьева С.Н. Исследование зависимости колебания уровня Каспийского моря от солнечной активности // СП 6., изд. РГГМУ, 2004, 70 С.
12. Кафтан В.И. Временной анализ геопространственных данных: кинематические модели / диссертация на соискание ученой степени д.т.н., 2004, Москва, 259 С.

13. Карта современных вертикальных движений земной коры по геодезическим данным на территорию СССР. М 1:5000000 // *Гл. редактор Кашин Л.А.* Главное управление геодезии и картографии при СМ СССР. - М., 1989.
14. Одиннадцатилетний цикл солнечной активности [Электронный ресурс] - Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Одиннадцатилетний_цикл_солнечной_активности - Дата доступа: 16.10.2023.
15. Тектоника и история геологического развития Средне-Каспийской и Южно-Каспийской впадин Диссертации о Земле [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://earthpapers.net/tektonika-i-istoriya-geologicheskogo-razvitiya-sredne-i-yuzhno-kaspiyskoj-vpadin#ixzz62z9CCaVY> - Дата доступа: 16.10.2023.
16. Объемная сейсмогеодинамическая модель Каспийского региона. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://seismos- u.ifz.ru/personal/caspiy.htm> - Дата доступа: 18.10.2023.
17. Инженерно-геологические особенности освоения акватории Каспийского моря (Северный и Средний Каспий) [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://naukarus.com/inzhenerno-geologicheskie-osobennosti-osvoeniya-akvatorii-kaspiyskogo-morya-severnyu-i-sredniy-kaspiy> - Дата доступа: 14.10.2023.
18. Загадки Каспийского моря (Михайлов В.Н. , 2000), НАУКИ О ЗЕМЛЕ [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://www.pereplet.ru/obrazovanie/stsoros/980.html> - Дата доступа: 21.10.2023.
19. ПРИЧИНЫ И ПОСЛЕДСТВИЯ КОЛЕБАНИЯ УРОВНЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://sibac.info/studconf/natur/liii/78288> - Дата доступа: 19.10.2023.
20. КАСПИЙСКОЕ МОРЕ [Электронный ресурс] - Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Каспийское_море - Дата доступа: 12.10.2023.
21. Высохнет ли Каспийское море [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://www.popmech.ru/science/384692-vysohnet-li-kaspiyskoe-more/> - Дата доступа: 18.10.2023.
22. Каспийское море (крупнейшее озеро) [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://сезоны-года.рф/Каспийское%20море.html> - Дата доступа: 20.10.2023.

23. Реконструкция колебаний уровня Каспия в исторический период А.М. Тюрин
24. Основные национальные системы высот в мировой практике [Электронный ресурс]- Режим доступа: https://studbooks.net/1815713/geografiya/osnovnye_natsionalnye_sistemy_vysvy- Дата доступа: 26.10.2023
25. Василий Аркадьевич Тимирязев [Электронный ресурс]- Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/> - Дата доступа: 26.10.2023.
26. История Кронштадтского футштока [Электронный ресурс] – Режим доступа : <http://www.meteo.nw.ru/articles/index.php?id=590> – Дата доступа: 26.10.2023.
27. Кронштадтский футшток: нуль метров над уровнем моря [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://anashina.com/kronshtadtskij-futshtok/> - Дата доступа: 26.10.2023.
28. Прокопович А. В. Анализ существующих концепций изменения уровня Каспийского моря / Сборник научных работ студентов Республики Беларусь «НИРС 2019» Минск : Изд. центр БГУ, 2020. - С. 158.
29. Л.А.Борисова . От чего ведется отсчет высот / Человек и стихия, Л., Гидрометеиздат, 1975.
30. Лакомб А. Физическая океанография / М., Мир, 1974, 498 с.
31. Пеллинен Л.П. Высшая геодезия (теоретическая геодезия) / М., Недра, 1978, 264 с.
32. Демьянов Г.В. Разработка принципов развития системы нормальных высот на основе современных спутниковых технологий / Диссертация на соискание д.т.н., М., МИИГАиК, 2004.
33. Г.В.Демьянов, А.В.Майоров. Об установлении единой общеземной системы нормальных высот / «Гравиметрия и геодезия», С.301-305.
34. Г.А. Шароглазова, В.Н. Коровкин, Д.Н. Новокрещенова. Проблема высотного обеспечения в мировой геодезической практике // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2020. – № 8. – С. 2–8.

35. Огородова Л.В. Высшая геодезия. Часть III. Теоретическая геодезия: Учебник для вузов. — М.: Геодезкартиздат, 2006. — 384 с.: ил.
36. Еремеев В.Ф., Юркина М.С. Теория высот в гравитационном поле Земли / М., Недра, 1971, 144 с.
37. Молоденский М.С. Основные вопросы геодезической гравиметрии / Труды ЦНИИГАиК, 1945, вып. 42. 106 с.
38. В.Ф.Еремеев. Теория динамических, ортометрических и нормальных высот / Труды ЦНИИГАиК, 1951, вып. 86, С. 11-51.79
39. Молоденский М.С., Еремеев В.Ф., Юркина М.И. Методы изучения внешнего гравитационного поля и фигуры Земли / Труды ЦНИИГАиК, 1960, вып. 131. 251 с.
40. Бровар Б.В., Гусев Н.А., Юркина М.И. О развитии гравиметрических работ в интересах геодезии / Кн. «Гравиметрия и геодезия», С.461-468.
41. Побединский Г.Г., Столяров И.А. Современное состояние государственной системы геодезического обеспечения Российской Федерации и основные направления ее развития / Международная научно-практическая конференция «Геодезия, картография и навигация – современные подходы к формированию и использованию геопространственных данных», Минск, «Белгеодезия», 2017, С.14-27.
42. Ха Минь Хоа. Развитие государственной высотной системы Вьетнама на основе использования локальной системы геоида / Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. №2. 2015. С.10-13.
43. Шароглазова Г.А. , Кирпичев А.Ю. , Прокопович А.В. Земные катаклизмы и их связь с космическими процессами / Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. F, Строительство. Прикладные науки. – 2019. - № 8. – С. 180 – 184.
44. Антонович, К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии [Текст]. В 2 т. Т. 2. Монография / К.М. Антонович; ГОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия». – М.: ФГУП «Картгеоцентр», 2006. – 360 с.: ил.

45. Usoskin, I. G., M. Schuessler, S. K. Solanki, and K. Mursula (2005), Solar activity, cosmic rays, and Earth's temperature: A millennium-scale comparison, *J. Geophys. Res.*, 110, A10102, doi:10.1029/2004JA010946, 2005, С. 2-10.
46. Прокопович А.В. Влияние солнечной активности на сейсмичность Земли / электронный сборник трудов молодых специалистов полоцкого государственного университета. *Выпуск 29 (99)* – 2019. - С. 88– 89.
47. Прокопович А.В. Анализ существующих концепций изменения уровня Каспийского моря / электронный сборник трудов молодых специалистов полоцкого государственного университета. *Выпуск 29 (99)* – 2019. - С. 90 – 91.
48. Новокрещенова Д. Н., Прокопович А. В. Проблема выбора систем высот в мировой практике / электронный сборник трудов молодых специалистов полоцкого государственного университета. *Выпуск 34 (104)* – 2020. - С. 90 – 95.
49. Прокопович А. В., Новокрещенова Д. Н. Изменения уровней морей и океанов: причины и следствия / электронный сборник трудов молодых специалистов полоцкого государственного университета. *Выпуск 34 (104)* – 2020. - С. 96 – 97.
50. Прокопович А. В., Шароглазова Г. А. Анализ существующих концепций изменения уровня Каспийского моря: способы наблюдения / *Материалы республиканского научно-практического семинара студентов и молодых ученых. Минск, 18 ноября 2020 г.* - С. 148 – 151.
51. Фотиади, Э. Э. Современные движения земной коры : монография / Э. Э. Фотиади. – Новосибирск : ИГиГ СО АН СССР, 1976. – 206 с.
52. Файтельсон, А.Ш. Влияние вековых изменений силы тяжести на результаты повторного нивелирования / А. Ш. Файтельсон // *Докл. АН СССР.* – 1973. – Т 213. № 6. – С. 1274–1275.
53. Антонов, Ю.В. Всплески неприливных вариаций силы тяжести / Ю. В. Антонов // *Геофизика.* – 2017. – № 1. – С. 28–34.
54. Абрамов, Д.В. Возможная природа пульсаций гравитационного поля / Д. В. Абрамов, С. Г. Бычков // *Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей: материалы 45-й сес. Междунар. семинара им. Д.Г. Успенского. Казань: Казан. фед. ун-т.* – 2018. – С. 16–18.

55. Дробышев, М.Н. Эксперимент по изучению синхронных континентальных микросейсм в Северной Евразии методом комплексирования гравиметрических и сейсмических наблюдений / М. Н. Дробышев и др. // Геофизика. – 2019. – № 10 (2). – С. 84–95.
56. Сас-Ухрыновски, А. Структура мониторинговой геофизической сети и неприливные вариации во времени поля силы тяжести / А. Сас-Ухрыновски [и др.] // Літасфера. – 2001. -№1 – С. 120-130.
57. Маркович, К. И. Приведение результатов геометрического нивелирования в систему нормальных высот с использованием глобальных гравитационных моделей Земли / К. И. Маркович // Геодезия и картография. – 2018. – № 5. – С. 2–9.
58. Юркина, М. И. О совместном определении изменений гравитационного поля и вертикальных движений по повторным гравиметрическим и нивелирным наблюдениям / И. О. Юркина // Современные движения земной коры. – 1976. – С. 154–158.
59. Получение данных ускорения свободного падения. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://icgem.gfz-potsdam.de> -Дата доступа: 18.12.2023.
60. Высокоточное нивелирование. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://194.135.10.78:7777/> -Дата доступа: 18.12.2023.
61. Геофизический мониторинг / Центр геофизического мониторинга НАН Беларуси: // НСМОС результаты наблюдений, 2007. -№9 – С. 213.
62. Национальная система мониторинга окружающей среды Республики Беларусь: результаты наблюдений, 2012 / Под общей редакцией С. И. Кузьмина. [Электронный ресурс]. Электрон. текстовые, граф. данные. (173 Мб), – Минск, «Бел НИЦ «Экология». – 2012. С. 276-279.