

Санкт-Петербургский государственный университет

ИВАНОВА Виктория Витальевна

Выпускная квалификационная работа

***Периодики в движениях базовых референционных станций ГНСС на примере
г. Санкт-Петербург***

Уровень образования: *магистратура*

Направление *05.04.03 «Картография и геоинформатика»*

Основная образовательная программа *ВМ.5523.2021 «Геоинформационное
картографирование»*

Научный руководитель:

Тюрин Сергей Вячеславович

кандидат технических наук, доцент,

кафедра картографии и геоинформатики

Рецензент:

Флёров Даниил Геннадьевич

начальник отдела обеспечения сети

референционных станций

СПб ГКУ ЦИОГД

Санкт-Петербург

2023

Оглавление

Введение	3
Глава 1. Обзор существующей литературы и программного обеспечения.....	5
1.1. Обзор литературы	5
1.2. Обзор существующего программного обеспечения.....	12
Глава 2. Способы позиционирования	15
2.1. Абсолютный способ позиционирования	15
2.1.1. Метод PPP (Precise Point Positioning).....	16
2.2. Относительный способ позиционирования	18
Глава 3. Факторы, влияющие на точность позиционирования с применением ГНСС-технологий.....	21
Глава 4. Метод анализа временных рядов «Гусеница»-SSA	35
Глава 5. Анализ изменения положений референцных базовых станций	41
5.1. Подготовка данных для исследования	41
5.2. Обработка данных по алгоритму Precise Point Positioning	42
5.3. Обработка временных рядов. Анализ периодических движений станций	44
5.4. Сравнение результатов с предыдущими исследованиями	46
Заключение.....	52
Список литературы.....	53
Приложение А. Графики временных рядов	59
Приложение В. Анализ 12-месячных периодических компонент	65
Приложение С. Пример отчета онлайн-сервиса CSRS-PPP	67

Введение

На современном этапе развития геодезической науки ГНСС-технологии (Глобальные Навигационные Спутниковые Системы, от английского GNSS – Global Navigation Satellite System) стали неотъемлемым инструментом выполнения широкого спектра геодезических работ.

ГНСС-технологии получили широкое распространение и практическое применение во множестве отраслей промышленности, науки и строительства благодаря спектру преимуществ перед классическими методами геодезических измерений. Одним из важнейших отличий является возможность непрерывной регистрации данных, позволяющая выявлять периодики различной длительности, в отличие от классических методов, ограниченных по времени и не позволяющих проводить измерения с необходимой частотой. Кроме того, важными достоинствами являются автоматизация процесса наблюдений, сводящая к минимуму ошибки исполнителей, и значительное снижение зависимости проведения работ от погодных условий.

Целью работы является выявление, анализ и интерпретация длиннопериодических движений базовых референчных станций ГНСС города Санкт-Петербург.

Объект исследования – сеть постоянно действующих станций ГНСС.

Предмет исследования – положение постоянно действующих станций ГНСС.

Актуальность исследования: исследование периодик движений базовых референчных станций, выявление, анализ и теоретическое объяснение причин их появления актуально для задачи повышения достоверности и точности результатов геодезического мониторинга. Также актуальность исследования подтверждается федеральной целевой программой «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012-2020 годы» и разрабатываемым в настоящее время продолжением программы до 2030 г.

Поставленные задачи:

- обзор существующей литературы, посвященной исследованиям в области изменений положений базовых станций ГНСС;
- обзор существующего программного обеспечения (ПО) в сфере обработки спутниковых наблюдений и его возможностей;
- обзор методов обработки спутниковых измерений, в частности метода PPP (Precise Point Positioning);
- обзор метода обработки временных рядов «Гусеница»-SSA (Singular Spectrum Analysis);
- подготовка исходных данных с сетей базовых станций;

- обработка измерений;
- анализ временных рядов, выявление длиннопериодических движений базовых станций;
- интерпретация выделенных компонент.

Научная значимость работы заключается в важности выявления количественных значений периодических движений станций и их причин для повышения надежности результатов при проведении работ геодезического мониторинга.

Глава 1. Обзор существующей литературы и программного обеспечения

1.1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

При написании магистерской диссертации были изучены различные отечественные и зарубежные исследования и публикации в области геодезического мониторинга и ГНСС-технологий. В качестве материалов использовались научная литература, публикации из периодических изданий, монографии, учебно-методическая литература, сборники трудов конференций и другое.

При написании работы одним из основных источников стали монография Антоновича К.М. в двух томах «Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии», учебник Курошева Г.Д. «Геодезия и картография» и учебное пособие Курошева Г.Д. «Космическая геодезия и глобальные системы позиционирования». В приведенных работах авторы объясняют устройство спутниковых систем, способы наблюдений и методы обработки измерений.

При формировании теоретической части использовались публикации из различных изданий: «Geomatics and environmental engineering», «Journal of Geodesy», «Remote Sensing», «The Journal of Global Positioning System», «Геодезия и картография», «Геофизические исследования», «Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка», «Вестник СГУГиТ», «Геопрофи» и другие.

Исследованные публикации и работы можно разделить на несколько групп в зависимости от тематики.

Большое количество изученных работ было посвящено влиянию атмосферы на результаты спутниковых измерений и проблемам изучения атмосферы по данным измерений (Антонович К.М. и др.; Дударев В.И.; Куприянов А.О., Морозов Д.А.; Вшивкова О.В.; Jitka Mučková, Rostislav Dandoš, Petr Jadvíšek, Miroslav Konečný; Gu Shengfeng, Chunqi Dai, Wentao Fang, Fu Zheng; Fangzhao Zhang, Jean-Pierre Barriot, Guochang Xu, Marania Hopuare и др.). Например, в работе «Методические аспекты оценки точности спутниковых измерений» (Комаров и др., 2008) при анализе результатов дифференциальных измерений было выяснено, что вертикальные координаты обнаруживают временные вариации, которые носят периодический характер. Авторы связывают это с волновой пространственной структурой фундаментальных параметров атмосферы, наиболее важными выделяют внутренние гравитационные волны, формирующиеся в нижней атмосфере и имеющие свойства распространения до ионосферных высот.

Было изучено большое количество публикаций в сфере геодезического мониторинга и геодинамики (Горшков В.Л., Щербакова Н.В.; Серебрякова Л.И.; Гаврилов С.Г.; Войтенко А.В.; Басманов А.В.; Жуков Б.Н.; Карпик А.П., Клепиков А.Н.; Гусева Т.В. и др.; Шульц Р.В.,

Анненков А.А., Куличенко Н.В.; Мельников А.Ю.; С. Kreemer, G. Blewitt, E.C. Klein; E.Priego, J.Jones, M.J.Porres, A.Seco; Cemal Ozer Yigit, Eralp Gurlek; M.Scaioni, M.Marsella, M.Crosetto, V.Tornatore, J.Wang и др.). Мониторингом называют наблюдение за состоянием окружающей среды с целью ее контроля, прогноза и охраны (Большой энциклопедический словарь, 2000). Различают три уровня мониторинга: глобальный, региональный и локальный. Нормативное толкование системы мониторинга определяется тремя составляющими: наблюдение, оценка и прогноз. В практике под мониторингом понимаются периодические режимные наблюдения за объектом, которые сопровождаются анализом интерпретаций результатов наблюдений и вытекающей оценкой состояния объекта. Прогнозирование возможных изменений в состоянии объекта позволяет заблаговременно выбирать методы и средства упреждающих воздействий для предотвращения или ослабления неблагоприятных последствий (Хорошилова, Хорошилов, 2012).

В настоящее время основным средством мониторинга является аппаратура, работающая по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем ГНСС, ГЛОНАСС и GPS. Система геодезического мониторинга, основанная на применении ГНСС, дает возможность проводить наблюдения в режиме реального времени при всех погодных условиях, обеспечивая высокий уровень точности. В результате измерений, выполненных с помощью ГНСС, получают координаты траектории перемещения контролируемых точек, являющихся исходными данными для анализа и подготовки заключения о деформациях и перемещениях (Брынь и др., 2010).

Использование мониторинга возможно для различных систем: природных, социальных и других. Выделяют следующие виды мониторинга:

- мониторинг земной поверхности (Антонович и др., 2004): наблюдение за общеземной координатной системой ITRF (включая исследования тектонических плит, параметров ориентировки Земли и прочее), мониторинг региональных (размер 100-1000 км) и локальных (размер менее 100 км) сетей. При проведении масштабного мониторинга возможно выявление процесса сдвижения земли и предотвращение угроз обрушения (Бижанова, 2020);
- мониторинг объектов: наблюдение за состоянием и положением объектов (контроль транспортных средств, перемещение животных и прочее) (Жуков, Карпик, 2006). Проведение мониторинга опасных производственных объектов является важнейшей задачей для безопасной эксплуатации объекта, охраны труда и защиты окружающей среды (Давыдов, Гиенко, 2019), например, обеспечение безопасности железнодорожных перевозок посредством учета данных мониторинга объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта спутниковыми методами (Брынь и

др., 2010). Наиболее сложными являются геодезический мониторинг инженерных объектов и анализ деформаций, так как они требуют максимальной точности измерений, автоматизации процесса наблюдений, надежности геодезических приборов и наличия гибких инструментов обработки и анализа данных (Хорошилова, Хорошилов, 2012).

- мониторинг окружающей среды: исследование атмосферы. ГНСС-технологии используются для определения положения самой станции измерения параметров атмосферы. Кроме того, используются сигналы от спутников для исследования среды, через которую они прошли. Эти принципы легли в основу многих современных исследований (Куприянов, Морозов, 2016; Huang и др., 2019).

Основные требования, предъявляемые к геодезическому мониторингу, проводимому спутниковыми методами:

- использование достаточного числа геодезических знаков, фиксирующих текущее положение исследуемого объекта и его составных частей в пространстве;
- использование для определения положения марок единой, устойчивой во времени системы пространственных прямоугольных координат, закрепленной на местности опорной геодезической сетью. Закрепленные точки должны быть легко опознаваемы и удобны для центрировки приборов, используемых при проведении работ различными методами (Жуков, 2003). Для получения наилучших результатов важно закреплять точки в местах, где будут минимизированы помехи, создаваемые внешней средой;
- использование специальных программ наблюдений, предусматривающих проведение достаточного числа циклов измерений требуемой продолжительности;
- осуществление периодического, в каждом цикле наблюдений, контроля стабильности положения пунктов опорной сети в государственной геоцентрической системе координат с использованием технологий высокоточного спутникового позиционирования ГЛОНАСС/GPS (ГОСТ Р 55535-2013).

В работе «Geodetic monitoring of the variable surface deformation in Latin America» (Sanchez, Drewes, 2020) рассматриваются модели деформации земной коры, основанные на 24-летнем анализе данных ГНСС. Модели выводились из горизонтальных скоростей станций ГНСС с использованием метода наименьших квадратов и эмпирически определенных ковариационных функций. Авторы приходят к выводу, что несколько щитов в Латинской Америке являются стабильными, а другие тектонические образования деформируются вследствие продолжительного воздействия семи крупных землетрясений. До землетрясений векторы деформаций были примерно в направлении субдукций плит, после векторы

деформаций стали описывать вращения против часовой стрелки к югу от эпицентров и по часовой стрелке к северу.

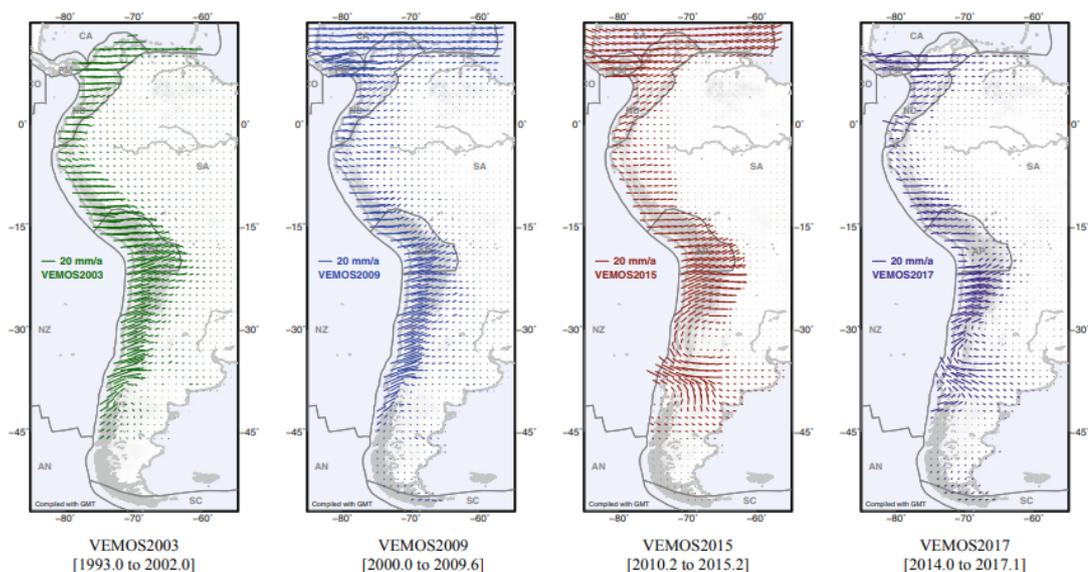


Рис. 1. Серия моделей деформации земной коры в Латинской Америке (Sanchez, Drewes, 2020)

Также были изучены работы Горшкова В.Л. и Щербаковой Н.В., в которых описываются результаты исследований на территории бассейна Финского залива Балтийского моря (Горшков и др., 2015). Для исследований были использованы наблюдения за период с 1993 по 2014 год на 27 станциях. Ряды положений вычислялись с помощью пакета GIPSY с использованием метода PPP и исправлялись за нагрузочные эффекты атмосферы. Полученные векторы скоростей показали локальный поворот Балтийского щита в направлении против часовой стрелки относительно Восточно-Европейской платформы.

С помощью спутниковых наблюдений также изучают геодинамику Восточной и Северной Европы. В частности, в работах Горшкова В.Л. изучаются движения Восточно-Европейской платформы (Балтийского щита и Русской плиты). В работе «База скоростей ГНСС Восточно-Европейской платформы для решения научных и прикладных задач» (Горшков и др., 2021) описывается процесс построения базы скоростей почти 500 станций с длительностью наблюдений более двух лет. Исходные данные формировались в суточные файлы с помощью пакета GIPSY с использованием метода PPP. При обработке учитывались модельные параметры (океанические приливные нагрузки, приливы в твердом теле Земли, параметры ориентации Земли и др.). Оценка вектора скорости по трем направлениям проводилась с помощью взвешенного метода наименьших квадратов по модели с весами, обратными дисперсиям суточных положений, из решений GIPSY. Первый этап предполагал удаление ошибочных и грубых наблюдений и оценку изменения по причине смены оборудования. Второй этап – оценка смещений, вызванных неизвестными факторами. Такая база скоростей позволяет оценить кинематические характеристики платформы и построить

карту деформаций для сети станций. На сайте Пулковской обсерватории доступна также интерактивная карты с графиками, содержащими ряды положений после учета влияния вращения Евразийской плиты со скоростями станций и остаточные ряды положений после учета сезонных компонент и фильтрации ошибочных измерений.

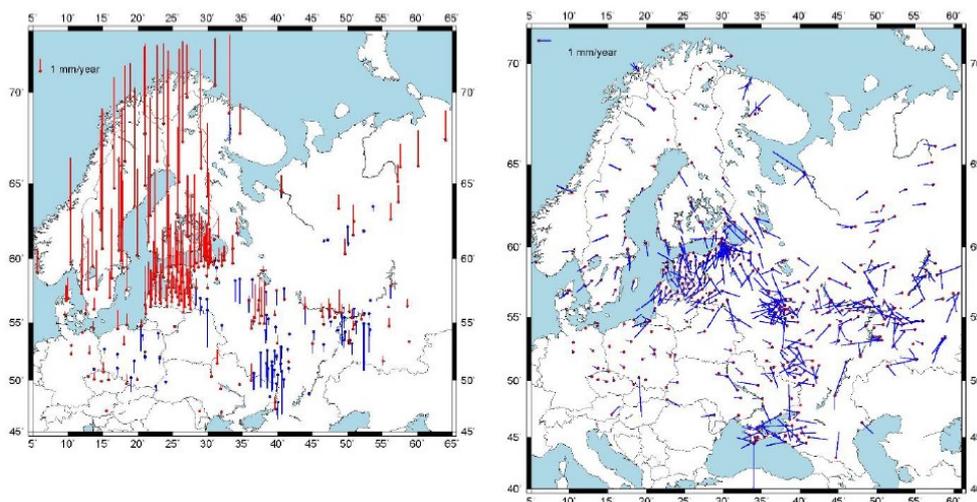


Рис. 2. Карта скоростей станций Восточно-Европейской плиты: вертикальные скорости (слева) и остаточные горизонтальные скорости (справа) (Гориков и др., 2021)

Ряд работ посвящен обработке спутниковых измерений (Войтенко А.В. Быков В.Л.; Фялковский А.Л.; Косарев Н.С., Щербаков А.С.; Шендрик Н.К.; Бондаренко С.С.; Xing Wang, Wen Xiang Liu и др.). В частности, в работе «Перспективы развития методов обработки результатов спутниковых измерений в геодезии» (Малинников и др., 2011) авторы обосновывают необходимость создания единого научного центра анализа и сертификации алгоритмов и программ обработки спутниковых измерений.

Также внимание было уделено вопросу использования референчных станций (Антонович К.М.; Богданец Е.С.; Черемухина О.О.; A. Mémin, C. Watson и др.; Yanming Feng, Shengfeng Gu и др.). В работе «Сети постоянно действующих дифференциальных геодезических станций как часть общей информационной системы для малонаселенных территорий, создаваемой с целью уменьшения хозяйственных издержек и рисков» (Кавешников и др., 2021) рассматривается подход к созданию сетей станций на территории с низкой плотностью населения и экономической активностью.

Блок публикаций, посвященных исследованию и применению метода точного позиционирования PPP, был одним из самых важных при изучении теоретической части. Данной тематике посвящено большое количество работ и публикаций (Антонович К.М. и др.; Липатников Л.А.; Куприянов А.О. и др.; Шевчук С.О., Мелеск А.Х, Косарев Н.С.; Мельников А.Ю.; Garrett Seepersad, Sunil Bisnath; Georgia Katsigianni, Sylvain Loyer, Felix Perosanz; Peiliang Xu, Chuang Shi и др.). В публикации «Влияние атмосферных нагрузок на результаты

спутникового мониторинга здания стационарного узла Загорской ГАЭС-2 методом PPP» (Калинников и др., 2020) представлены результаты комплексного мониторинга гидротехнических сооружений. Авторы замечают, что абсолютные значения координат точек, определенные методом PPP, сильно подвергаются влиянию атмосферных нагрузок, вертикальные смещения составляют до 25 мм, горизонтальные – до 8 мм. В работе описывается корреляция среднесуточных значений координат мониторинга и рядов деформаций земной коры (вычислялись с помощью онлайн-сервиса International Mass Loading Service), которая подтверждает необходимость применения моделей атмосферных нагрузок при использовании метода PPP.



Рис. 3. Сопоставление рядов высотной компоненты, полученных из модельных данных (GEOS-FPIT) и измеренных на станциях с помощью ГНСС (Калинников и др., 2020)



Рис. 4. Сопоставление рядов восточной компоненты, полученных из модельных данных (GEOS-FPIT) и измеренных на станциях с помощью ГНСС (Калинников и др., 2020)

Автор в работе «Preliminary analysis of the application of the GPS PPP method in geodynamic studies» (Pelc-Mieczkowska, 2020) исследует тренды девяти станций (пять на территории Польши, четыре на территории Украины). Были рассмотрены семилетние временные ряды, данные обрабатывались в программном комплексе GipsyX. Стандартное отклонение горизонтальных трендов для станций составило 0,01 мм, для вертикальных – 0,04 мм, за исключением 3-х станций, для которых ошибки достигли 0,05мм, 0,06мм и 0,07 мм.

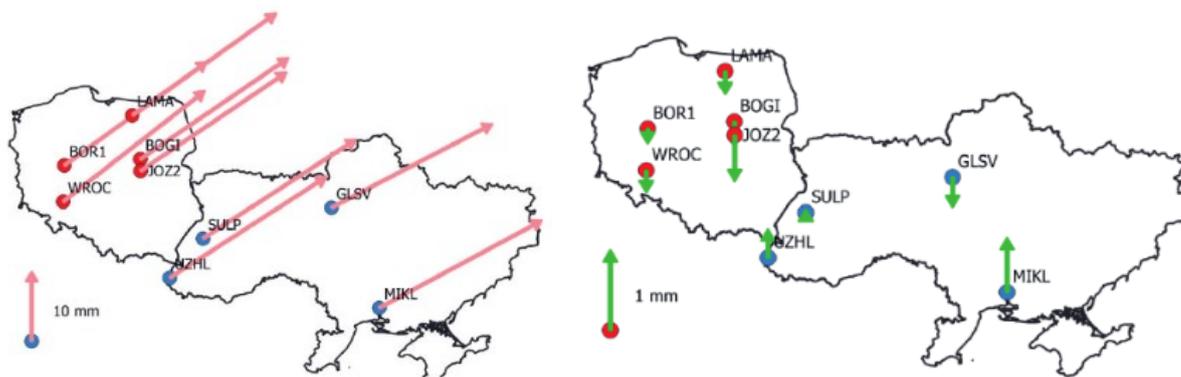


Рис. 5. Плановые и высотные компоненты перемещений станций (Pelc-Mieczkowska, 2020)

«Анализ изменений в положении постоянно действующих базовых станций ГНСС», автор А.А. Сюзюмов – исследование, проводимое на кафедре картографии и геоинформатики Санкт-Петербургского государственного университета. Работа направлена на выявление краткосрочных периодик в движениях шести референсных станций. В зависимости от сезона выявлялись различные периодики:

- В зимний период в плановом положении на всех станциях выделена 24-часовая периодика, в половине случаев – 12-часовая. В высотном положении краткосрочные составляющие не выявились;
- В весенний период в плановом положении на всех станциях обнаружены 24-часовая и 12-часовая периодики. В высотном положении на ряде станций определены 24-часовая и 12-часовая компоненты. На некоторых станциях в высотном положении выделились 8-часовые периодики;
- В летний период на всех станциях в плановом положении в направлении север-юг выделена 24-часовая периодика, в направлении запад-восток периодики практически отсутствуют. В высотном положении на всех станциях присутствует 24-часовая компонента, на части станций – 12-часовая;
- В осенний период практически на всех станциях выделена 24-часовая периодика. В высотном положении она выделена лишь на части станций.



Рис. 6. Результаты обработки временных рядов на период 01.10.2018 – 30.10.2018, направление 3-В

1.2. ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩЕГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

В настоящее время на отечественном и зарубежном рынке происходит активная разработка и усовершенствование различных программных комплексов для обработки спутниковых измерений.

Все существующее на рынке программное обеспечение в сфере обработки спутниковых измерений можно разделить на следующие категории (Малютина, Шевчук, 2017):

- коммерческие программные продукты;
- некоммерческие программные продукты;
- научные программные продукты;
- online-сервисы (локального и глобального охвата).

Сегмент коммерческого ПО представлен продуктами, создаваемыми для обработки измерений, выполняемых приемниками определенного производителя (Шевчук и др., 2018). Внутренние математические алгоритмы скрыты от пользователей и защищены авторским правом. Дальнейшая обработка в других продуктах или обработка данных с приемников других производителей проводится с использованием международного универсального формата RINEX.

Примеры программ, относящихся к данной категории:

- Leica Geo Office (Leica Geosystems, Швейцария);
- Pinnacle/Justin (Javad Inc., США);
- Topcon Magnet Tools (Topcon Inc., Япония);
- Trimble Business Center (Trimble Navigation, США);
- WayPoint Graf-Nav (NovAtel Inc., Канада).

Широкое распространение получили некоммерческие программы с открытым исходным кодом и возможностью его редактирования. Во многих случаях функционал таких ПО соответствует коммерческим продуктам или является несколько упрощенным в целях удобства использования. Данные программные комплексы реализуют функции без привязки ко внутренним форматам производителей.

Примерами некоммерческих программных продуктов могут быть:

- GPSTk или GPSToolkit (геофизическая лаборатория Техасского университета в Остине, США);
- RTKlib (Tcasu Tomoji, Япония).

Научные программные продукты зачастую могут иметь открытые математические алгоритмы, доступные для редактирования пользователям. Такие продукты разрабатываются в научных учреждениях или учебных заведениях, их распространение может быть как бесплатным, так и коммерческим. Однако научное ПО не рассчитано на неподготовленного пользователя ввиду сложного интерфейса и расширенного функционала, предназначенного для научных и исследовательских задач.

Данная категория включает в себя такие программы, как:

- Bernese (Астрономический институт Бернского университета, Швейцария);
- GAMIT/GLOBK (Массачусетский технологический институт, США);
- GEONAP (Ганноверский университет имени Лейбница, Канада);
- GIPSY-OASIS II (Калифорнийский технологический институт, лаборатория реактивного движения, США).

Online-сервисы совмещают возможности научного ПО и доступность и простоту решений коммерческих продуктов. Данные сервисы позволяют пользователям производить обработку измерений в режиме онлайн через Всемирную сеть (Терещенко, Лагутина, 2019).

Online-сервисы делятся на два типа в зависимости от способа определения координат (Терещенко, Лагутина, 2019):

- сервисы с обработкой, основанной на относительном методе. Территория работы таких сервисов ограничена зоной покрытия используемой сети;
- сервисы с обработкой, основанной на методе PPP. Определение координат происходит с применением апостериорно уточненной эфемеридно-временной информации, такая методика позволяет определить положение точки без привязки к наземной координатной основе.

Примерами online-сервисов с обработкой относительным способом являются:

- OPUS (Online Positioning User Service, Национальная геодезическая служба США);
- SOPAC SCOUT (Scripps Coordinate Update Tool of Scripps Orbit and Permanent Array Center, институт океанографии им.Скриппса, Калифорния, США).

К категории сервисов с обработкой в режиме PPP относятся:

- APPS, Automatic Precise Positioning Services (лаборатория реактивного движения Калифорнийского института технологий, США);
- AUSPOS (Geoscience Australia, Правительство Австралии);
- CSRS-PPP (Министерство природных ресурсов Канады);
- GAPS, GPS Analysis and Positioning Software (университет Нью-Браунсуика, Канада).

Преимущества online-сервисов перед классическими методами обработки (Терещенко, Лагутина, 2019):

- возможность доступа к алгоритмам научного ПО для высокоточного местоопределения благодаря возможности учета множества факторов;
- отсутствие необходимости установки специализированных программных продуктов;
- необходимо наличие лишь стандартного браузера;
- простые и понятные интерфейс и процесс работы;
- отсутствие проблемы совместимости между программами и операционной системой;
- отсутствие необходимости обновления.

Недостатком является необходимость отправлять спутниковую навигационную информацию за пределы страны, что может привести к утечке информации, особенно это актуально при проведении измерений на объектах с ограниченным доступом.

Глава 2. Способы позиционирования

В зависимости от целей проведения работ, требуемых результатов, технического оснащения и ряда других факторов возможно использование различных методов спутникового позиционирования.

Общая классификация способов позиционирования (Серапинас, 2002):

- абсолютные методы позиционирования:
 - автономные;
 - дифференциальные (по результатам наблюдений на опорном пункте вычисляются поправки в соответствующие параметры для получения координат определяемого объекта, т.е. измерения обрабатываются отдельно);
- относительные методы позиционирования:
 - статические (одновременно выполняемые измерения между двумя и более неподвижными приемниками продолжительный период времени);
 - кинематические (одно из устройств зафиксировано, второе устройство перемещается и положение определяется в произвольные эпохи).

2.1. АБСОЛЮТНЫЙ СПОСОБ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Специфика абсолютного способа позиционирования заключается в определении приемников координат по группировкам спутников (GPS, ГЛОНАСС и т.д.) вне зависимости от других устройств.

Механизм измерения при использовании абсолютного способа позиционирования: на спутнике и на приемнике формируется псевдослучайный кодовый сигнал, в заданные промежутки времени отправляющийся с разных спутников в форме электромагнитной волны на землю. В момент поступления сигнала на антенну приемника фиксируется время прихода и определяется время отправления, по этим данным по скорости прохождения сигнала рассчитывается расстояние. Главные условия, соблюдение которых необходимо для проведения измерений, - синхронизация атомных часов на спутнике и наличие поступления на антенну сигнала не менее чем от четырех спутников.

Вследствие наличия многих неблагоприятных факторов (возникновение ошибок из-за асинхронности часов, задержка движения волны, нестабильные условия приема на антенне) данный способ позиционирования не может гарантировать точность лучше 5-10 метров. Основным преимуществом метода является быстрота получения данных.

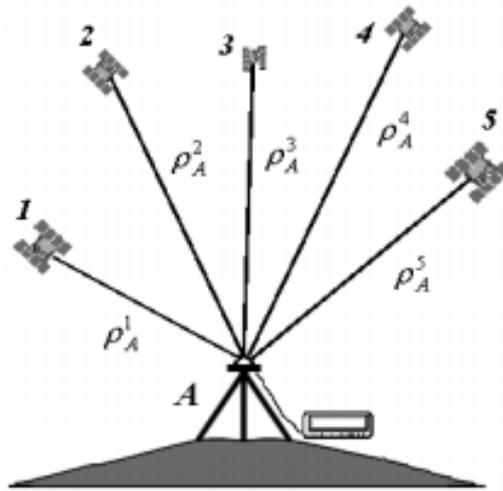


Рис 7. Абсолютный способ спутникового позиционирования (Антонович, 2006)

Основным параметром определения координат является псевдодальность P_A^i .

Уравнение псевдодальности:

$$P_A^i = \rho_A^i + cdt_A - cdt^i + I_A^i + T_A^i + d_A + d^i + dm_A^i + e_A^i \quad (1)$$

Индекс А указывает на пункт наблюдения, индекс i – на наблюдаемый спутник.

Параметры уравнения: ρ_A^i – геометрическая дальность (расстояние между навигационным космическим аппаратом ГНСС в момент выхода сигнала и навигационной аппаратурой потребителя в момент поступления сигнала), dt_A и dt^i – поправки часов приемника и спутника соответственно, I_A^i – ионосферная задержка, T_A^i – тропосферная задержка, d_A и d^i – задержки сигналов в аппаратуре приемника и спутника соответственно, dm_A^i – влияние многопутности (фактора, влияющего на точность спутниковых определений и связанного с характером распространения сигнала, при котором он попадает на антенну приемника не только непосредственно от спутника, но и отразившись от поверхности Земли или различных предметов, окружающих антенну), e_A^i – случайная ошибка измерений, c – скорость распространения радиоволн в вакууме.

На современном этапе активное развитие получили дифференциальный метод и метод PPP.

2.1.1. МЕТОД PPP (PRECISE POINT POSITIONING)

Метод PPP – точное абсолютное позиционирование – метод высокоточных координатных определений. Способ заключается в определении координат пункта по результатам спутниковых измерений в общеземной системе координат с использованием апостериорно уточненной эфемеридно-временной информации (Липатников, 2014).

Существует немало факторов, которые влияют на увеличение погрешностей в определении координат: неточность эфемеридно-временной информации, плохой учет

тропосферной и ионосферной рефракций и др. Обработка данным способом требует использования точной эфемеридно-временной информации, моделей факторов, влияющих на распространение сигналов, и учета множества дополнительных факторов (подробный обзор необходимых параметров для учета представлен в главе 3).

Повышение точности определения итоговых координат достигается двумя методами: повышение точности определения псевдодальности и повышение точностей определения координат спутников.

В целях повышения точности определения псевдодальностей необходимо использование дорогостоящих приемников, способных проводить фазовые измерения и измерения на двух частотах любой из используемых систем. Главная сложность практического применения метода PPP - трудность реализации математических алгоритмов разрешения целочисленной неоднозначности.

В целях повышения точности определения координат спутника необходимо использование точной эфемеридно-временной информации.

Псевдодальность при использовании метода PPP определяется по измерениям фазы несущего сигнала:

$$\Phi_A^i(t) + f^i dt^i(t) = \frac{1}{\lambda} \rho_A^i(t) + N_A^i + f^i dt_A(t) \quad (2)$$

Параметры данного уравнения: $\Phi_A^i(t)$ – измеренная фаза несущей, выраженная в циклах, f^i – частота сигнала спутника, $dt^i(t)$ и $dt_A(t)$ – поправки часов для спутника и приемника соответственно, λ – длина волны, $\rho_A^i(t)$ – геометрическая дальность, N_A^i – целочисленная неоднозначность фазы.

Главное преимущество метода PPP – возможность получения высокоточных плановых и высотных координат по измерениям, выполняемым одним приемником.

Однако у данного метода позиционирования существует ряд недостатков:

- отсутствие моментальной доступности точной эфемеридно-временной информации;
- длительный процесс измерения (не менее 30 минут) для разрешения неоднозначности (Vazquez-Ontiveros и др., 2023);
- чувствительность к срывам измерения фазы (Шевчук и др, 2016);
- необходимость использования дорогостоящего оборудования, поддерживающего фазовые и двухчастотные измерения.

В настоящее время с учетом высокоточной эфемеридно-временной информации и различных поправок точность определения координат по методу PPP достигает относительного способа (Мельников, 2018).

Активно разрабатываемый метод PPP-AR (PPP with ambiguity resolution) основан на улучшении методов разрешения неоднозначности. Исследования, проведенные в этой области, показали улучшение долготной составляющей на 30%, улучшение оценки стабильности часов приемника и уменьшение ошибок в атмосферных задержках. Данный метод особенно полезен при проведении полевых исследований во многих отраслях, так как разрешение неоднозначности позволяет значительно повысить точность коротких сеансов наблюдения.

В настоящее время существует немало аналитических центров IGS, производящих продукты, обеспечивающие обработку с помощью PPP-AR - CNES, NRCan, Wuhan и CODE. В отличие от стандартных продуктов, производимых IGS, продукты для PPP-AR сохраняют свою согласованность только при одновременном рассмотрении как спутниковых часов, так и поправок смещения (Seepersad, Bisnath, 2017; Katsigianni, Loyer, 2019; сайт IGS. Рабочая группа по точному позиционированию, дата обращения 12.05.2021).

2.2. ОТНОСИТЕЛЬНЫЙ СПОСОБ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Основной принцип определения координат относительным методом – использование одновременно нескольких приемников, из которых как минимум один расположен на пункте с известными координатами. В отличие от абсолютного метода, в котором по измеренным величинам вычисляются значения координат, стратегия относительного метода направлена на вычисление пространственного вектора между двумя точками – базовой линией.

На двух станциях, входящих в состав базовой линии, одновременно проводятся измерения с наблюдением одних и тех же спутников. Результаты наблюдений будут содержать практически одинаковые погрешности, разность результатов будет свободна от таких погрешностей. По результатам измерений получают координаты одной станции относительно другой, т.е. компонента базовой линии (Курошев, 1999).

Предположим, что А является известной точкой, В – точкой, координаты которой необходимо определить, тогда D_{AB} – вектор базовой линии. При введении векторов положения R_A и R_B можно составить отношение (Антонович, 2006):

$$R_B = R_A + D_{AB} \quad (3)$$

Компоненты базовой линии:

$$D_{AB} = \begin{bmatrix} X_B - X_A \\ Y_B - Y_A \\ Z_B - Z_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X_{AB} \\ \Delta Y_{AB} \\ \Delta Z_{AB} \end{bmatrix} \quad (4)$$

При проведении на обоих пунктах одновременных измерений образуются различные линейные комбинации, приводящие к одинарным, двойным и тройным разностям (Антонович, 2006):

- Одинарные разности можно образовать между измерениями, одновременно проведенными с одной станции на два спутника или с двух станций на один спутник.

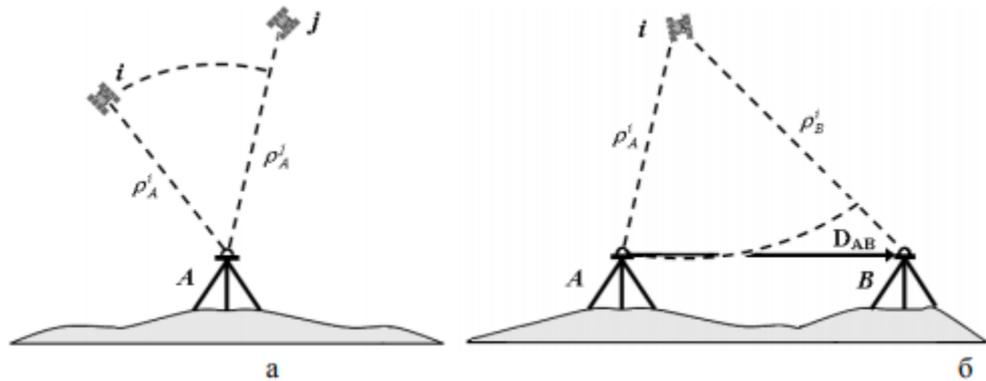


Рис 8. Одинарные разности: между спутниками (а), между станциями (б) (Антонович, 2006)

Уравнение одинарной разности из наблюдений между станциями будет выглядеть следующим образом:

$$\Phi_{AB}^i(t) = \rho_{AB}^i(t) + \lambda N_{AB}^i + c(dt_B(t) - dt_A(t)) \quad (5)$$

Таким образом, в одинарных разностях исключаются искажения, вызываемые спутниковой аппаратурой (поправки часов спутника, запаздывания в аппаратуре спутника и влияние начальной фазы генератора спутника). Ослабляется влияние тропосферы и ионосферы, а также влияние ошибок эфемерид, но возрастает шум.

- Двойные разности – разности, образующиеся между измерениями с двух приемников на два спутника.

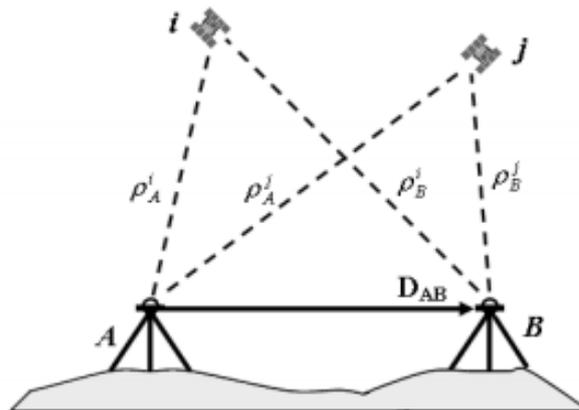


Рис 9. Двойные разности (Антонович, 2006)

Уравнение выглядит следующим образом:

$$\Phi_{AB}^{ij}(t) = \rho_{AB}^{ij}(t) + \lambda N_{AB}^{ij} \quad (6)$$

Помимо всех ошибок, исключенных в одинарных разностях, двойные разности характеризуются отсутствием ошибок часов приемника. Продолжает ослабевать влияние тропосферы и ионосферы, шум измерений растет.

- Тройные разности образуются при проведении одновременных наблюдений двух спутников с двух станций в две эпохи.

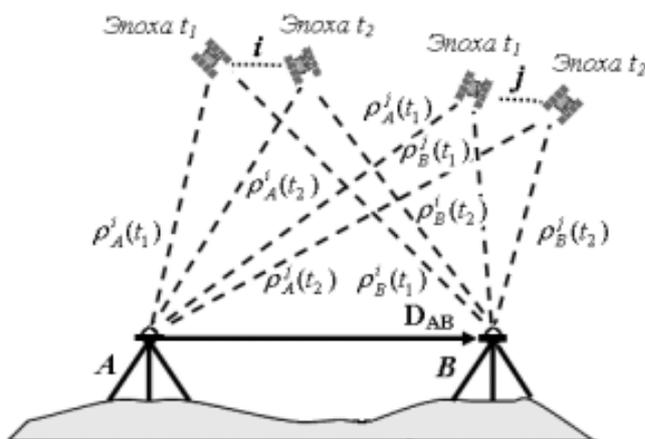


Рис 10. Тройные разности (Антонович, 2006)

Уравнение тройных разностей принимает следующий вид:

$$\Phi_{AB}^{ij}(t_{12}) = \rho_{AB}^{ij}(t_{12}) \quad (7)$$

Помимо ошибок, исключенных в одинарных и двойных разностях, в тройных исключается также целочисленная неоднозначность фаз.

Виды относительного позиционирования:

- статическое позиционирование
Антенны приемников устанавливаются на двух стационарных пунктах, на которых определяется вектор базовой линии по результатам наблюдений.
- кинематическое позиционирование
Данный вид позиционирования включает один стационарный и один мобильный приемник, на которых выполняются одновременные наблюдения.

Глава 3. Факторы, влияющие на точность позиционирования с применением ГНСС-технологий

При проведении исследований, требующих высокой точности определения координат, зачастую используют метод точного позиционирования PPP ввиду наличия у него многих преимуществ перед другими методами измерений. Однако для повышения точности необходим учет многих факторов и моделей.

1. Ошибки, связанные со спецификацией спутника
 - 1) Точная коррекция спутниковых часов

Для повышения точности определения координат спутника необходимо использование эфемерид. Использование бортовых эфемерид, дающих точность порядка 1 м, и бортовых поправок часов спутников с точностью около 2,5 нс не отвечает требованиям задачи высокоточного определения местоположения. В связи с этим для получения координат необходимо использовать высокоточные эфемериды, предоставляемые центрами обработки и Международной ГНСС службой (International GNSS Service, IGS). Итоговые эфемериды, доступные через две недели после измерений, имеют точность около 1-2 см, а точность поправок часов спутников составляет 20 пс. Файлы с эфемеридно-временной информацией могут быть получены в сети Интернет, например с сервиса IGS, который получает эту информацию по результатам обработки совместных измерений более чем с 400 базовых станций по всему миру (Шевчук и др., 2016; Kouba, Heroux, 2001).

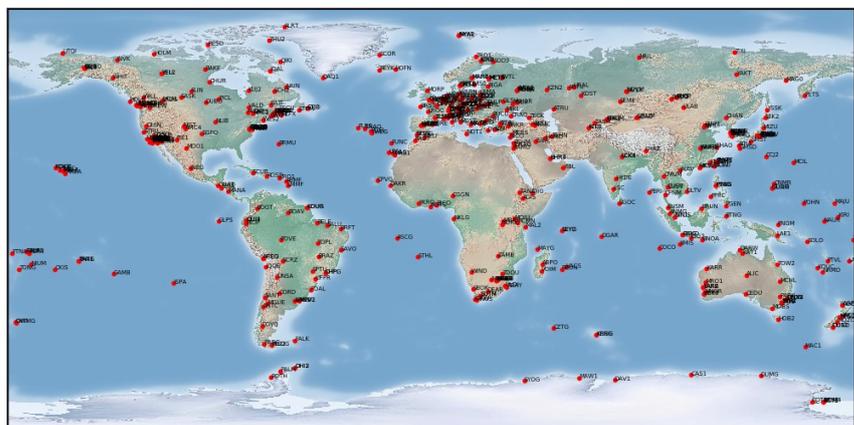


Рис.11. Расположение станций IGS

В настоящее время существует 12 аналитических центров IGS, которые вносят вклад в конечные продукты. Центры располагаются в Канаде, Китае, Чехии, Франции, Германии, Швейцарии и США (сайт IGS. Analysis Center Coordinator, дата обращения: 20.03.2022).

IGS Analysis Centers (ACs)

Institution	Abbreviation	Country/Region
Natural Resources Canada	EMR	Canada
Wuhan University	WHU	China
Geodetic Observatory Pecny	GOP-RIGTC	Czech Republic
Space geodesy team of the CNES	GRG	France
European Space Agency/ESOC	ESA/ESOC	Germany
GeoForschungsZentrum	GFZ	Germany
Center for Orbit Determination in Europe	CODE	Switzerland
Jet Propulsion Laboratory	JPL	USA
Massachusetts Institute of Technology	MIT	USA
NOAA/National Geodetic Survey	NGS	USA
Scripps Institution of Oceanography	SIO	USA
U.S. Naval Observatory	USNO	USA

Рис.12. Аналитические центры IGS (сайт IGS. Analysis Center Coordinator, дата обращения: 20.03.2022)

IGS предлагает по меньшей мере четыре каталога файлов коррекции спутниковых часов.

Однако недостатком использование таких поправок является отсутствие мгновенной доступности. Вычисленные уточненные эфемериды разделяются на три типа по скорости их обновления на серверах – Ultra-Rapid, Rapid и Final (сайт Trimble. Использование точных GPS/ГЛОНАСС орбит при постобработке, дата обращения 15.03.2022).

Таблица 1. Типы уточненных эфемерид

Типы уточненных эфемерид		Задержка выдачи	Обновление	Точность орбиты	Точность поправок часов
Ultra-Rapid	Оперативно уточненные, сверхсрочные	от 3 до 9 часов	4 раза в сутки в 3, 9, 15 и 21 UTC	3-5 см	50 пс
Rapid	Уточненные, срочные	от 17 до 41 часа	ежедневно в 17 UTC с задержкой в сутки	2,5 см	25 пс
Final	Сверхточные, финальные	от 12 до 18 суток	еженедельно во вторник с задержкой 2 или 3 недели	2,5 см	20 пс

2) Точные орбиты спутников

Поправки к орбитам спутников являются частью эфемеридно-временной информации и могут быть получены из каталогов Международной ГНСС службы. Точность орбит спутников при использовании различных типов уточненных эфемерид представлена в таблице 1.

3) Смещение фазового центра и вариации фазового центра антенны

Для фазовых смещений спутниковых антенн выделяют два вида коррекций: смещение фазового центра и вариация фазового центра. Смещение представляет собой постоянный трехмерный вектор, зафиксированный в системе координат, связанной с

космическим аппаратом, т.е. ориентация этого вектора зависит от ориентации спутника относительно Земли. Вариация – это дополнительная коррекция, зависящая от угла надира вектора «космический аппарат – приемник».

Смещение и вариации фазового центра в миллиметрах для всех спутников систем ГЛОНАСС и GPS могут быть получены из файлов IGS формата ANTEX. При отсутствии файлов смещения фазовых центров некоторых модификаций спутников могут быть учтены приближенно (Подкорытов, 2012). Рисунки 13 и 14 иллюстрируют Z-компоненты (ось Z направлена от центра масс спутника к центру масс Земли) смещения фазовых центров антенн спутников ГЛОНАСС и GPS на 28 мая 2010 года, рисунки 15 и 16 иллюстрируют вариации фазовых центров антенн спутников ГЛОНАСС и GPS на 28 мая 2010 года как функции угла надира.

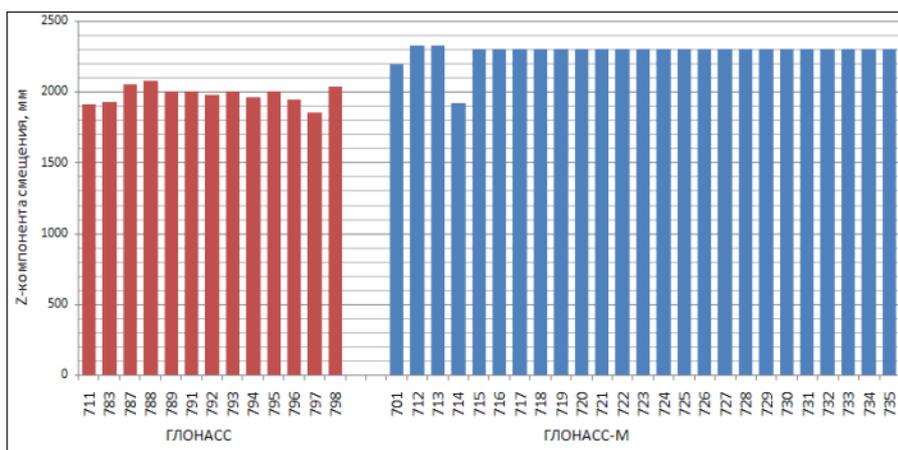


Рис.13.Z-компонента смещения фазовых центров для антенн спутников ГЛОНАСС на 28 мая 2010 (Подкорытов, 2012)

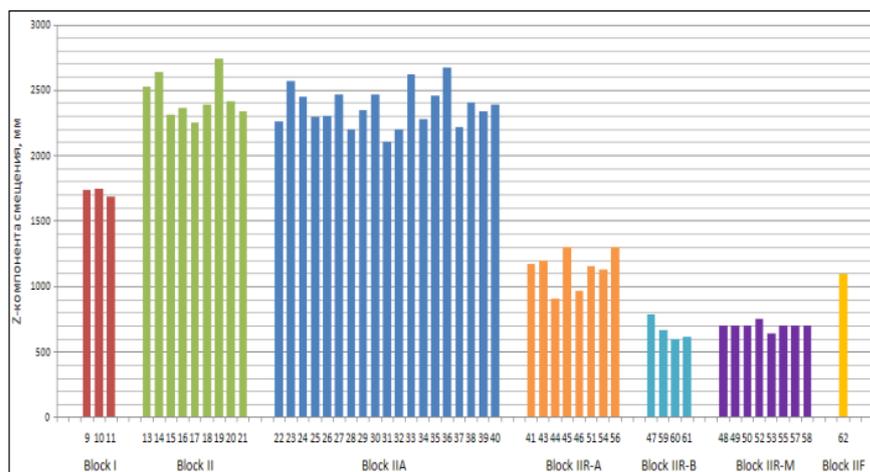


Рис.14.Z-компонента смещения фазовых центров для антенн спутников GPS на 28 мая 2010 (Подкорытов, 2012)

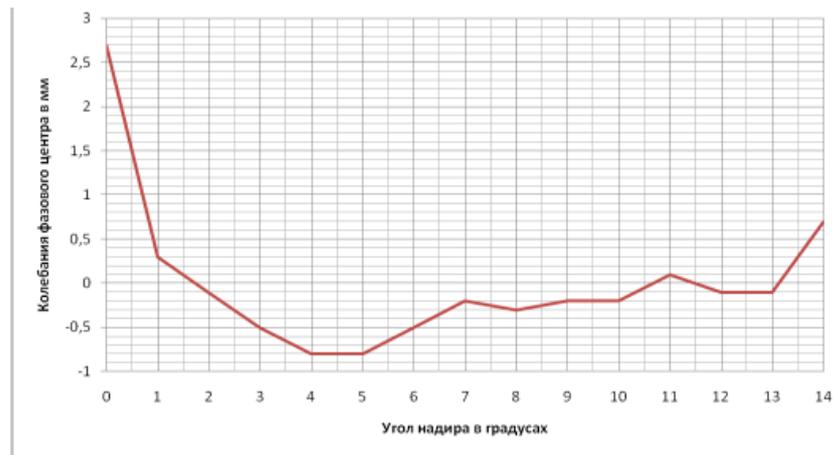


Рис.15. Вариации фазовых центров для антенн спутников ГЛОНАСС и ГЛОНАСС-М на 28 мая 2010 (Подкорытов, 2012)

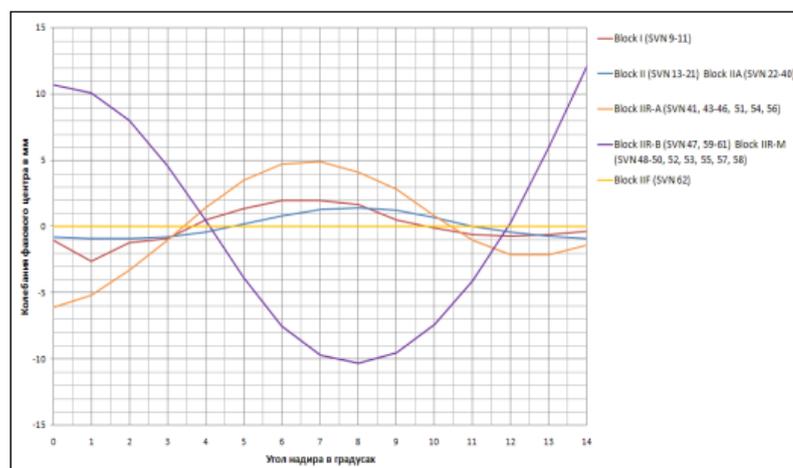


Рис.16. Вариации фазовых центров для антенн спутников GPS на 28 мая 2010 (Подкорытов, 2012)

2. Ошибки, связанные со спецификацией приемника
 - 1) Смещение фазового центра и вариации фазового центра антенны

При проведении точного позиционирования одним из источников ошибок является ошибка фазового центра антенны приемника. Корректирующая модель РСС любой антенны содержит две составляющие: смещение фазового центра (phase center offset, PCO) и вариации фазового центра (phase center variation, PCV) (Ялтыхов, Маркович, 2016).



Рис.17. Фазовый центр GPS-антенны (Ялтыхов, Маркович, 2016)

Фазовый центр идеальной антенны – это условная точка в пространстве, в которой все сигналы принимаются или передаются независимо от частоты, угла возвышения или азимута радиосигнала. Фазовые центры реальных антенн менее постоянны, и параметры PCV определяют изменения положения «нулевой» точки фазового центра в зависимости от частоты, угла возвышений и азимута принимаемого сигнала. Самая простая модель предполагает, что фазовые центры различаются только по вертикальной оси. Производители прилагают технические листы с указанием смещения фазового центра.

Данные вариаций фазового центра PCV заносятся в файл в стандартизированном формате ANTEX, который может быть использован при высокоточных измерениях. Азимутальная ориентация антенны ровера обычно неизвестна, поэтому поправки для каждого положения антенны в горизонтальной плоскости не могут быть учтены. Данные вариации в файле обычно представляют собой функцию угла возвышения и частоты, но с усредненными данными азимута для каждого угла возвышения и частоты.

Таким образом, поправки могут применяться для каждой частоты и угла возвышения, но ошибки, связанные с изменением азимутального параметра, не могут быть исправлены в ГНСС-приемнике.

В настоящее время ведутся активные работы для улучшения параметров смещения фазовых центров антенн. Например, антенна VeroStar компании Tallysman разрабатывалась с учетом симметрии как антенного элемента, так и всего корпуса антенны. По результатам сравнения максимальное общее отклонение фазового центра антенны VeroStar составляет менее 2,9 мм для 4-ех распространенных частот ГНСС, что меньше, чем у 6-и других протестированных антенн (ГНСС плюс. Инновации в новой ГНСС антенне для высокоточных измерений, дата обращения: 20.03.2022).

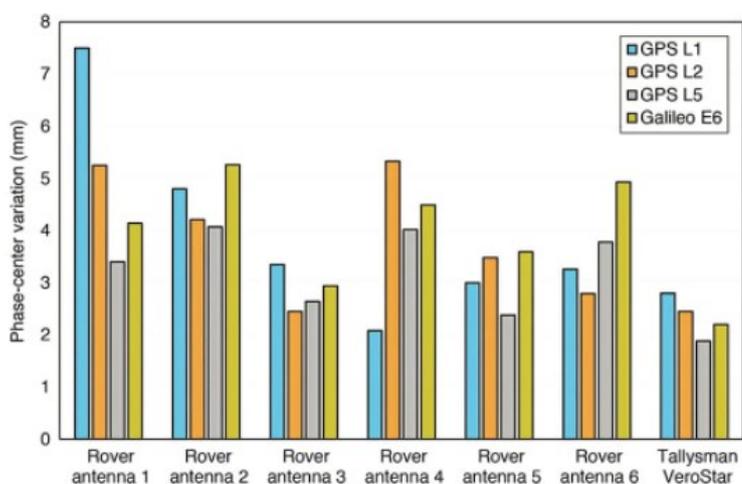


Рис.18. Сравнение параметров смещений фазовых центров антенн (ГНСС плюс. Инновации в новой ГНСС антенне для высокоточных измерений, дата обращения: 20.03.2022)

3. Атмосферные коррекции

1) Тропосферная задержка

Тропосферной задержкой называют задержку радиосигнала при прохождении через нейтральную атмосферу (до 100 км над уровнем Земли), на которую приходится 80% общей задержки. Нейтральная атмосфера разделяется на две составляющие: сухую, состоящую в основном из сухих газов, и влажную, являющуюся результатом испарения воды (Першин, 2009).

В отличие от ионосферной задержки тропосферная не зависит от частоты радиоволн, но зависит от температуры, давления, влажности и расположения антенн передатчика и приемника.

Файлы тропосферной задержки предоставляются Международной ГНСС службой.

2) Ионосферная задержка

Ионосфера содержит частично ионизированную среду, возникающую в результате рентгеновского и ультрафиолетового излучения солнечной радиации и попадания заряженных частиц.

Ионосфера не вызывает постоянной задержки, однако есть несколько факторов, которые оказывают влияние на ее величину:

- возвышение спутника. Задержка сигналов спутников, находящихся низко над горизонтом, будет больше, чем сигналов спутников, расположенных высоко. Это связано с увеличением расстояния, которое сигнал проходит через атмосферу;
- плотность ионосферы. В течение дня солнечное излучение вызывает ионизацию нейтральных атомов с образованием свободных электронов и ионов. Ночью преобладает процесс рекомбинации, при котором свободные электроны рекомбинируют с ионами с образованием нейтральных частиц, что приводит к уменьшению электронной плотности;
- воздействие на сигнал водяных паров.

Файлы ионосферной задержки также предоставляются Международной ГНСС службой.

4. Геофизические модели

Характер повторяемости геодинамических явлений определяет их классификацию:

- вековые (период изменения 100 лет и более);
- межгодовые (период изменений колеблется в пределах от нескольких лет до нескольких десятков лет);
- годовичные, сезонные (период от нескольких месяцев до нескольких лет);

- месячные, полумесячные;
- суточные;
- нерегулярные, случайные.

По характеру направленности движения земной поверхности можно разделить на вертикальные и горизонтальные.

Поверхность планеты непрерывно деформируется из-за воздействия возмущающих факторов, имеющих самое различное происхождение. Поэтому для решения задачи определения координат точек крайне важно учитывать влияние возмущающих факторов на заданную эпоху.

1) Деформации, вызываемые вращением Земли

Файлы формата .egr, предоставляемые службой IGS, являются одними из трех конечных продуктов (наряду с файлами орбит и часов). ERP являются частью полного набора параметров ориентации Земли (EOP), который включает в себя углы прецессии и нутации (Steigenberger и др., 2022)

2) Движения тектонических плит

Изменение координат точек поверхности из-за горизонтальных движений тектонических плит рассчитывается с помощью теоремы вращения Эйлера, по которой изменение положения точки описывается через её вращение на поверхности сферы вокруг некоторой оси, проходящей через центр сферы.

Скорость изменения координат точки i , расположенной на тектонической плите k , описывается выражением произведения геоцентрического вектора точки и геоцентрического вектора вращения плиты, который можно определить двумя способами:

- с использованием геолого-геофизических моделей движения плит;
- с помощью анализа временных рядов координат геодезических пунктов, полученных средствами спутниковой навигации.

В настоящее время наиболее распространена геолого-геофизическая модель NUVEL-1A, которая содержит информацию о параметрах вращения для пятнадцати плит. Для построения модели использовались данные о геомагнитных аномалиях в районах срединно-океанических хребтов.

Использование технологий спутникового позиционирования (ГНСС) дало возможность составления длительных временных рядов, на основе которых может выполняться задача определения скорости изменения координат точек как функции линейной зависимости от времени (Спесивцев, 2017).

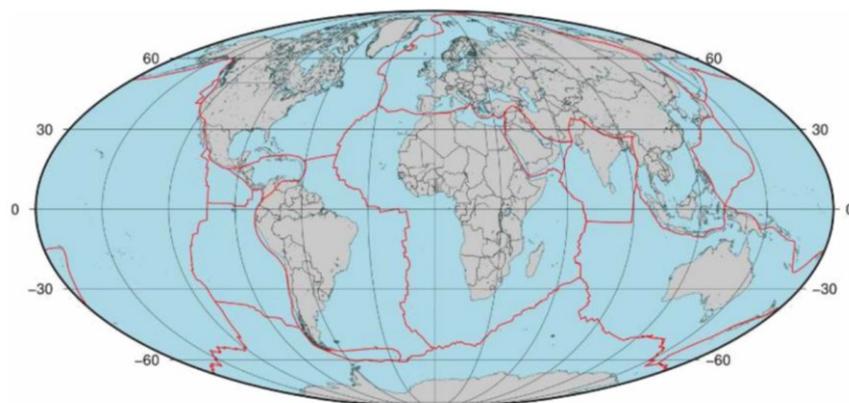


Рис.19. Схема тектонических плит NUVEL-1A (Спесивцев. 2017)

3) Деформации, вызываемые приливами в твердом теле Земли

Движения точек поверхности Земли объясняются упругими деформациями, возникающими из-за воздействия приливных сил небесных объектов - Солнца и Луны (Спесивцев, 2017). Основная составляющая прилива имеет метровую амплитуду на периодах около 12 часов и более. Самые большие составляющие приливов в теле полусуточные, но есть также значительные суточные, полугодовые и двухнедельные вклады.

4) Деформации, вызываемые океаническим приливом

Океанические приливы, вызывающие смещения точек поверхности Земли (величины могут достигать десятков миллиметров), возникают из-за возвратно-поступательных движений вследствие перераспределения водных масс, носящего периодический характер.

Океанические приливы связаны с периодическим перераспределением огромных водных масс из-за возвратно-поступательных движений, которые вызывают деформации земной поверхности, величины которых могут достигать десятков миллиметров. На величины приливных движений оказывают влияние локальные и региональные природные условия (Спесивцев, 2017).

В сравнении с твердотельными приливами океанические приливы играют довольно малую роль. Для повышения точности наблюдений спутников в целях решения задач космической геодезии, в частности при изучении гравитационного поля Земли и построении его моделей, необходимо учитывать вклады обоих приливов.

Разработка и использование глобальных моделей океанических приливов необходимы для учета эффекта от приливов на движение спутников, что давно принято в мировой практике. Международная служба вращения Земли регулярно приводит рекомендации по учету приливов, которые выходят в рамках Соглашений МСВЗ (Гусев, 2013).

Поскольку приливы создаются гравитационным притяжением Луны и Солнца и их орбиты имеют больше одной периодичности из-за эксцентриситета (отклонение от

окружности) и эвекции (наиболее значительное неравенство в движении Луны вокруг Земли, обусловленное возмущающим воздействием Солнца), приливы можно описать как сумму нескольких приливов, каждый из которых имеет свой период. Для расчета приливной нагрузки океана используются одиннадцать периодов или гармоник с наибольшей амплитудой (Ocean tide loading explained, дата обращения: 21.03.2022). Рисунок 20 демонстрирует океанические приливы для гармоники M2 с периодом 12 часов 25 минут. Цветом проиллюстрирована амплитуда, линиями – отставание по фазе приливов с интервалом в 60°.

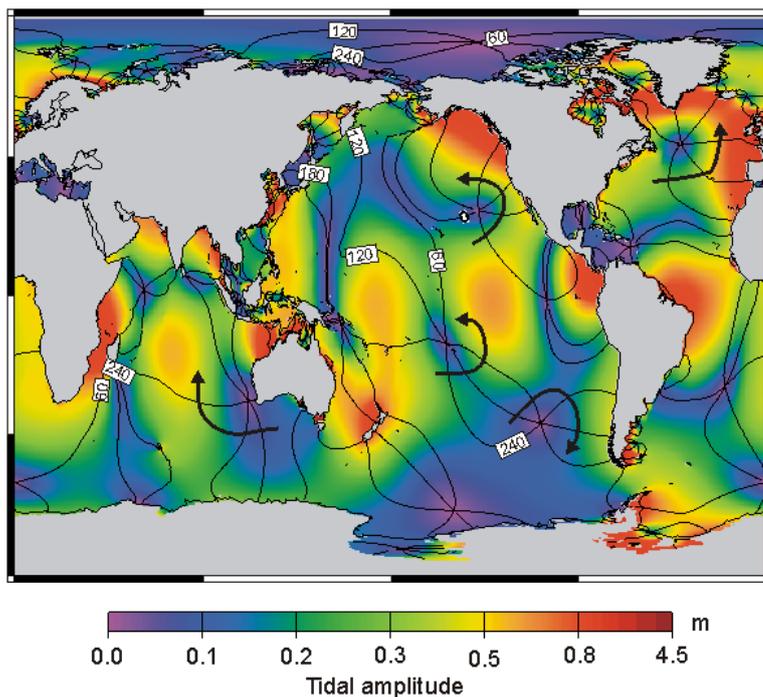


Рис.20.Океанические приливы для гармоники M2 (Ocean tide loading explained, дата обращения: 21.03.2022)

Традиционным способом представления моделей океанических приливов являются котидальные карты. Котидали – изолинии, соединяющие точки, в которых полная вода наступает в один и тот же момент, точки с одинаковыми фазами приливов. Каждая котидальная линия носит обозначение соответствующего ей часа лунного времени по Гринвичу, который называется котидальным и соответствует числу лунных часов, истекших от момента кульминации Луны в Гринвиче до наступления полной воды. Как правило, котидальная линия отражает скорость перемещения приливной волны за котидальный час, давая характеристику положения гребня волны. На котидальных картах традиционно даны синфазные и квадратурные амплитуды приливных высот для главных приливных волн на сетке с заданным шагом по всей площади океана. Синфазная и квадратурная составляющие – это результат представления аналогового сигнала в виде комбинации двух составляющих

одной частоты, но сдвинутых по фазе относительно друг друга на 90° , то есть четверть полного угла.

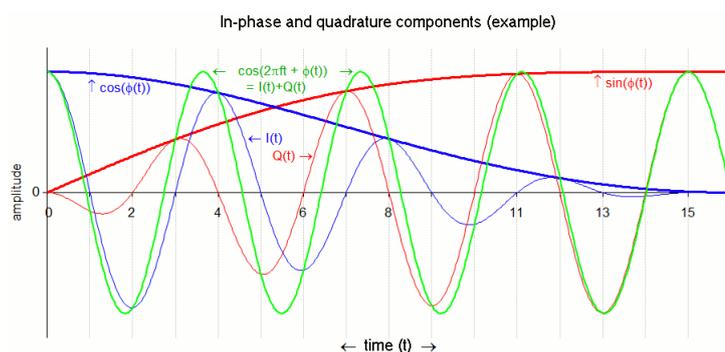


Рис.21. Пример разложения аналогового сигнала на синфазную и квадратурную составляющие

Котидальные карты наглядно отображают физические свойства глобальных океанических приливов.

Стандартно модели приливов включают в себя карты наиболее существенных приливных или главных волн. Для определения расширенного спектра приливных возмущений геопотенциала используется линейное интерполирование от главных волн к меньшим.

Различают глобальные и локальные модели приливов. Глобальные модели строят для всей площади мирового океана, а локальные – для отдельного водного бассейна, например, где особенности рельефа дна и строение береговой линии обуславливают нелинейный эффект, имеющий существенное влияние. Использование локальных моделей значительно повышает точность и достоверность (Гусев, Лебедев, 2013).

По способу создания выделяют три группы моделей.

- Гидродинамические модели, основанные исключительно на решении гидродинамических уравнений Лапласа. Их построение базируется на чисто модельном подходе, т.е. не используется какая-либо измерительная информация, кроме данных о рельефе морского дна, потенциале приливообразующих сил, геометрии береговой линии и диссипативных (рассеивающих) факторах. Однако из-за неточностей знаний морских глубин и особенностей рельефа дна, неизвестных параметров вязкости и трения, крайне важных при моделировании приливов на малых глубинах, гидродинамические модели будут содержать погрешности.
- Эмпирические модели основаны на наблюдениях за колебаниями уровня моря вследствие приливов и данных, полученных с использованием спутниковой альтиметрии. Однако, при их построении учитываются и общие теоретические представления. Точные математические методы не используются при расчете этих моделей, в чем и заключается их эмпиричность. Такой подход не требует сведений о

глубинах, контурах береговой линии, коэффициенте трения и др. Однако возникающие проблемы из-за ограничений пространственного покрытия и пространственного разрешения выборки, наложения спектров частот ведут к некоторым недостаткам, например, относительно малой точности в прибрежных водах.

- Комбинированные модели, в которых гидродинамические уравнения решаются совместно, с ассимиляцией данных спутниковой альтиметрии и наземных данных с уровенных постов (Гусев, Лебедев, 2013).

Проблемными областями являются в основном мелководные моря с большой амплитудой приливов и быстро меняющимся фазовым запаздыванием. К ним относятся моря вокруг Индонезии, Патагонский шельф, Северное море, Китайское море и др.

Некоторые модели океанических приливов не учитывают определенные участки мелководья, что может привести к ошибочным значениям нагрузки, если станция находится близко к морю, которого нет в выбранной модели.

Океанические приливы малы в Средиземном море и крайне малы в Балтийском и Черном морях (A brief description of the available ocean tide models, дата обращения 21.03.2022).

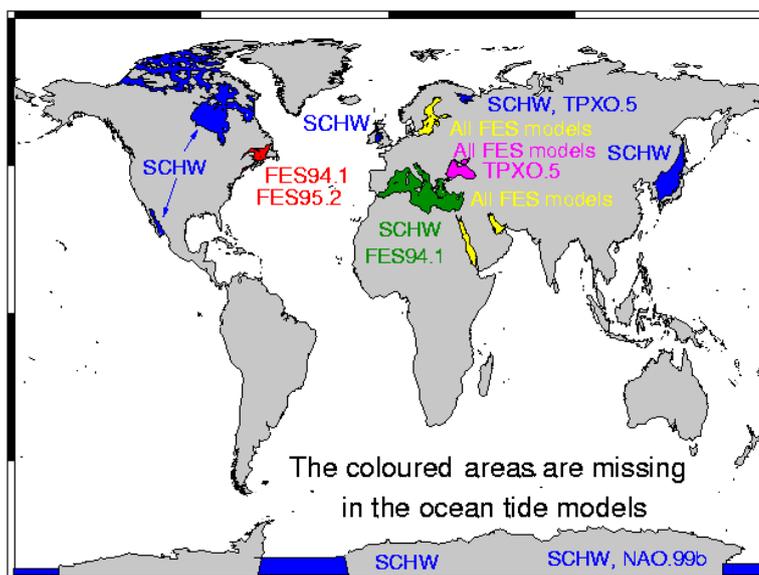


Рис.22.Акватории, отсутствующие в моделях океанических приливов (A brief description of the available ocean tide models, дата обращения 21.03.2022)

В настоящее время для учета влияния приливов МСВЗ рекомендует использовать комбинированную модель FES2004, включающую 6 долгопериодических волн, 4 суточные волны, 6 полусуточных волн и одну четвертьсуточную (Гусев, Лебедев, 2013). Основная проблема заключается в отсутствии территории Балтийского моря во всех моделях FES.

- 5) Деформации, вызываемые атмосферными нагрузками

Атмосферные приливные нагрузки вызываются колебаниями давления, создаваемыми дневным нагревом атмосферы под воздействием Солнца. Величины амплитуд деформаций по вертикали могут быть сравнимы с некоторыми эффектами от океанических нагрузок (Спесивцев, 2017).

6) Деформации, вызываемые полюсным приливом

Причиной данного типа деформаций являются полюсные приливы, возникающие в твердом теле Земли (Спесивцев, 2017).

7) Деформации, вызываемые океаническим полюсным приливом

Явление океанического полюсного прилива связано с воздействием центробежной силы на океанические водные массы вследствие движения полюса (Спесивцев, 2017). Ученые из Earth & Space Research и Университета штата Орегон создают и обслуживают модели баротропных приливов для Северного Ледовитого океана и морей, окружающих Антарктиду. Территория Балтийского моря содержится в модели Arc2kmTM (сайт Earth & Space Research. Polar Tide Models, дата обращения: 05.03.2022).

5. Неприливные геодинамические явления

Помимо периодических геодинамических явлений существуют сезонные процессы, возникающие вследствие неприливных перераспределений масс в океане, атмосфере и на суше.

Основные источники, вызывающие появление нагрузок неприливногo характера:

- атмосфера;
- океан;
- континентальная гидрология.

Перераспределение поверхностных масс оказывает непосредственное влияние на гравитационное поле Земли, а также на деформации ее поверхности. Рисунок 23 отображает механизм данного влияния, взаимодействие процессов и используемые в целях исследований определенного класса явлений геодезические методы (Спесивцев, 2017).

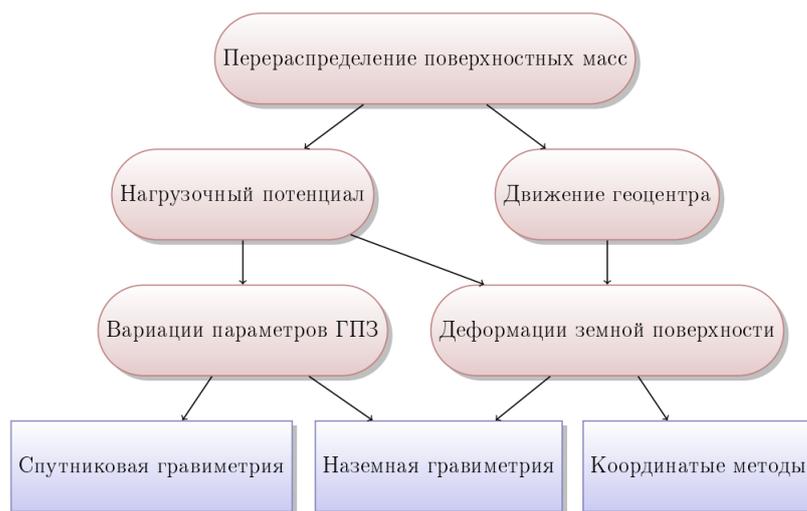


Рис. 23. Механизм влияния перераспределения поверхностных масс на гравитационное поле Земли и координаты точек земной поверхности (Спесивцев, 2017)

1. Атмосферная неприливно́ная нагрузка

Данный тип нагрузки порождается перераспределением воздушных масс и вызванным этим изменением давления. Атмосферная неприливно́ная нагрузка может вызывать вертикальные и горизонтальные смещения точек поверхности на величины, достигающие 10 миллиметров.

Явление атмосферной неприливной нагрузки имеет региональный масштаб и высокую динамику изменения во времени.

Рисунок 24 демонстрирует вид графика вертикальной составляющей деформации земной поверхности, возникающей под действием атмосферной неприливной нагрузки на 1 августа 2008 года. Разница между максимальным и минимальным значениями составляет 10-20 мм (Спесивцев, 2017).

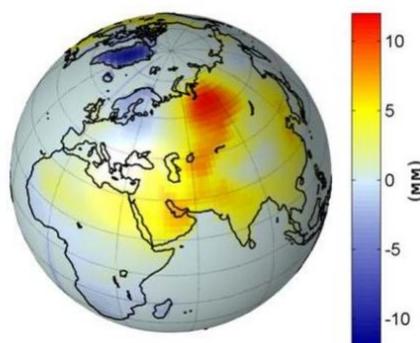


Рис. 24. Деформации земной коры, вызванные неприливной атмосферной нагрузкой на момент 1 августа 2008 года (Спесивцев, 2017)

2. Океаническая неприливно́ная нагрузка

Данный тип нагрузки возникает под влиянием процессов, вызывающих изменение давления на океаническое дно. Среди таких процессов: перераспределение водных масс под

действие циркуляций в атмосфере, изменение объема водных масс вследствие глобального круговорота воды, перераспределение атмосферных масс над поверхностью океана.

По аналогии с приливным типом данной нагрузки, наиболее сильное влияние оказывается на точки, расположенные в непосредственной близости от береговой линии. Величина проявления эффекта при экстремальных условиях может составлять до 10-20 миллиметров (Спесивцев, 2017).

3. Континентальная гидрологическая нагрузка

Возникновение данного типа нагрузки связано с естественными процессами, которые происходят под воздействием перераспределения водных масс в грунте, снежного покрова и др.

Из перечисленных неприливых геодинамических явлений континентальная гидрологическая нагрузка имеет наиболее долгопериодический характер проявления. Деформации земной поверхности могут достигать величины десятка миллиметров (Спесивцев, 2017).

Глава 4. Метод анализа временных рядов «Гусеница»-SSA

По результатам обработки спутниковых измерений составляются временные ряды плановых и высотных положений базовых референчных станций. Дальнейшее исследование проводится с применением математического алгоритма анализа временных рядов.

В рамках исследования использовался активно развивающийся алгоритм «Гусеница» или SSA (Singular Spectrum Analysis). Развитие данного алгоритма проводится независимо за рубежом и в России, в частности метод исследуется в Санкт-Петербургском государственном университете Голяндиной Н.Э и другими учеными (Голяндина, 2004; Главные компоненты..., 1997).

Данный алгоритм эффективно применяется при анализе и прогнозе временных рядов во многих отраслях науки и техники, включая геодезию (Ху, Уен, 2015).

Базовый алгоритм метода «Гусеница» можно разделить на следующие этапы:

- разложение:
 - вложение;
 - сингулярное разложение;
- восстановление:
 - группировка;
 - диагональное усреднение.

Приведенные ниже формулы, теоретические выкладки и понятия базируются на учебном пособии Н.Э Голяндиной (Голяндина, 2004).

$F = (f_0, \dots, f_{N-1})$ – вещественный временной ряд, $N > 2$ – длина этого ряда. В связи с тем, что хотя бы один из членов данного ряда отличается от нуля, ряд является ненулевым. В большинстве случаев считается $f_i = f(i \Delta)$ для функции $f(t)$, где t – время, а Δ – интервал времени.

Шаг 1. Вложение

На первом этапе исходный временной ряд преобразуется в последовательность многомерных векторов. Для анализа временного ряда необходимо выбрать целый параметр L – длину окна, $1 < L < N$. В результате вложения образуется $K = N - L + 1$ векторов вложения с размерностью L :

$$X_i = (f_{i-1}, \dots, f_{i+L-2})^T, \quad (8)$$

где $1 \leq i \leq K$.

Затем образуется траекторная матрица, состоящая из векторов вложения в качестве столбцов:

$$X = [X_1 : \dots : X_K], \quad (9)$$

$$X = (x_{ij})_{i,j=1}^{L,K} = \begin{pmatrix} f_0 & f_1 & \dots & f_{K-1} \\ f_1 & f_2 & & f_K \\ & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{L-1} & f_L & \dots & f_{N-1} \end{pmatrix} \quad (10)$$

Данная матрица является ганкелевой, так как она имеет равные элементы на всех диагоналях, перпендикулярных главной.

Шаг 2. Сингулярное разложение (SVD – Singular Value Decomposition).

Результат данного шага – преобразование матрицы X в сумму элементарных матриц.

Допустим, что $S = XX^T$, тогда $\lambda_1, \dots, \lambda_L$ – собственные числа матрицы S в неубывающем порядке. U_1, \dots, U_L – ортономированная система собственных векторов матрицы S , соответствующих собственным числам.

Пусть $d = \max\{i: \lambda_i > 0\}$. Если принять $V_i = X^T U_i / \sqrt{\lambda_i}$, где $i=1, \dots, d$, то сингулярное разложение матрицы X будет выглядеть следующим образом:

$$X = X_1 + \dots + X_d, X_i = \sqrt{\lambda_i} U_i V_i^T \quad (11)$$

Каждая из полученных матриц X_i является элементарной матрицей. Набор $(\sqrt{\lambda_i}, U_i, V_i)$ – i -ая собственная тройка сингулярного разложения, $\sqrt{\lambda_i}$ – сингулярное число, U_i, V_i – собственные и факторные вектора соответственно (левые и правые сингулярные вектора матрицы X)

Шаг 3. Группировка.

На данном этапе происходит группировка компонент разложения. После разложения все множество индексов $\{1, \dots, d\}$ процедурой группировки делится на m непересекающихся подмножеств I_1, \dots, I_m . Если принять $I = \{i_1, \dots, i_p\}$, то матрица X_I группы I вычисляется следующим образом:

$$X_I = X_{i_1} + \dots + X_{i_p} \quad (12)$$

Аналогичным образом вычисляются матрицы для $I = I_1, \dots, I_m$. Таким образом, разложение может быть записано в сгруппированном виде:

$$X = X_{I_1} + \dots + X_{I_m}. \quad (13)$$

Шаг группировки подразумевает идентификацию собственных троек с их группировкой (Голяндина, 2004; Александров, 2006). На этом шаге определяется основной тренд, периодики и шум (Вохмянин, 2010).

Шаг 4. Диагональное усреднение.

Данный этап характеризуется созданием новых рядов длины N на основе матриц сгруппированного разложения.

Матрица Y (матрица размерности $L \times K$ с элементами y_{ij} , где $1 \leq i \leq L, 1 \leq j \leq K$) преобразуется в ряд g_0, \dots, g_{N-1} по формуле:

$$g_k = \begin{cases} \frac{1}{k+1} \sum_{m=1}^{k+1} y_{m,k-m+2}^* & \text{для } 0 \leq k \leq L^*, \\ \frac{1}{L^*} \sum_{m=1}^{L^*} y_{m,k-m+2}^* & \text{для } L^* - 1 \leq k \leq K^*, \\ \frac{1}{N-k} \sum_{m=k-K^*+2}^{N-K^*+1} y_{m,k-m+2}^* & \text{для } K^* \leq k \leq N, \end{cases} \quad (14)$$

где $L^* = \min(L, K)$, $K^* = \max(L, K)$, $N = L + k - 1$, $y_{ij}^* = y_{ij}$, если $L < K$ и $y_{ij}^* = y_{ji}$.

После применения диагонального усреднения к результирующим матрицам X_{I_k} получим ряды $\tilde{F}^{(k)} = (\tilde{f}_0^{(k)}, \dots, \tilde{f}_{N-1}^{(k)})$. Таким образом, исходный ряд $F = (f_0, \dots, f_{N-1})$ можно разложить в сумму m рядов:

$$f_n = \sum_{k=1}^m \tilde{f}_n^{(k)}. \quad (15)$$

Важнейшим этапом во время работы по алгоритму «Гусеница» является выбор длины окна L , так как неверный выбор параметра может привести к некорректному разложению ряда на составляющие. На выбор длины окна L влияют характеристики и особенности ряда, предварительные свойства, требуемые результаты, основные требования к задаче и другое.

Не существует универсальных правил, определяющих выбор длины окна, однако определены общие принципы (Голяндина, 2004):

- значение длины окна L не следует брать больше чем половина длины ряда при проведении анализа временных рядов;
- детальность разложения исходного ряда линейно зависит от длины окна. Наиболее детальное разложение достигается при длине окна, равной половине длины ряда;
- малая длина окна может привести к смещению компонент ряда, поэтому для достижения лучшей разделимости рекомендуется выбирать большую длину окна;
- при большом значении параметра L результат работы алгоритма устойчив к небольшим изменениям длины окна;
- при наличии сложной структуры ряда не следует выбирать слишком большое значение параметра L , так как это может привести к неверному разложению на компоненты;
- малейшее изменение длины окна может привести к улучшению разделения на компоненты, поэтому необходимо проводить анализ и использовать несколько вариантов параметра.

Выбор длины окна при выделении периодической компоненты $F^{(1)}$ имеет некоторые особенности из-за зависимости между параметром L и величиной периода:

- при проведении анализа временных рядов следует измерять длину ряда N и длину окна L в числе периодов. Если составляющая $F^{(1)}$ асимптотически отделяется от составляющей $F^{(2)}$, то длина ряда должна составлять несколько периодов;
- при работе с короткими временными рядами следует учитывать условия точной делимости. Например, если известен какой-либо период, рекомендуется брать параметр L , пропорциональный величине периода;
- при работе с длинными временными рядами параметр L следует брать как можно больше.

Способ группировки собственных троек при работе алгоритма «Гусеница» также является структурным. Процедура группировки заключается в исследовании собственного и факторного векторов U_i, V_i и собственных чисел λ_i .

Каждый из элементов матрицы характеризуется собственной тройкой. В пособии (Голяндина, 2004) приведены общие правила группировки:

- если восстановление компоненты ряда происходит только с помощью одной собственной тройки и оба сингулярных вектора (собственный и факторный) имеют общую форму, то восстановленная компонента будет иметь такую же форму;
- если $L \ll K$, то факторный вектор будет иметь большую схожесть с восстановленной компонентой, чем собственный;
- чем больше сингулярное значение в собственной тройке, тем больший вклад имеет восстанавливаемая компонента.

Шум также состоит из собственных троек, не имеющих периодик и трендов. В пособии (Голяндина, 2004) приведены основные принципы работы с шумовыми компонентами:

- включение гармонических компонент в шумовую составляющую может привести к пересечению диапазонов сигнала и шума. Из-за этого в восстановленной по собственным тройкам компоненте появляется шум;
- в некоторых случаях гармоники не отделяются от шума из-за малых амплитуд гармонических колебаний и большого шума. Данный эффект исчезает при $N \rightarrow \infty$;
- компоненты восстановления будут напоминать гармоники в случае больших значений K, L и N , которые ведут к содержанию в сингулярном разложении матрицы чистого шума нескольких собственных троек, схожих с гармониками.

При проведении исследования алгоритм «Гусеница»-SSA реализовывался в программном комплексе MathCad.

На первом этапе с помощью встроенной функции на загрузку запрашиваются файлы формата .txt, содержащие временные ряды. Длина окна L задается равной половине ряда. Затем задается траекторная матрица с помощью векторов преобразованного центрированного ряда с параметром длины окна L .

	0
0	0.002
1	-0
2	0.002
3	0.007
4	0.013
5	0.013
6	0.015
7	0.006
8	0.005
9	0.007
10	0.006
11	0.01
12	0.005
13	0.011
14	0.011
15	0.014
16	0.01
17	0.008
18	0.016
19	0.017
20	0.017
21	...

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0.002	-0	0.002	0.007	0.013	0.013	0.015	0.006	0.005	0.007	0.006
1	-0	0.002	0.007	0.013	0.013	0.015	0.006	0.005	0.007	0.006	0.01
2	0.002	0.007	0.013	0.013	0.015	0.006	0.005	0.007	0.006	0.01	0.005
3	0.007	0.013	0.013	0.015	0.006	0.005	0.007	0.006	0.01	0.005	0.011
4	0.013	0.013	0.015	0.006	0.005	0.007	0.006	0.01	0.005	0.011	0.011
5	0.013	0.015	0.006	0.005	0.007	0.006	0.01	0.005	0.011	0.011	0.014
6	0.015	0.006	0.005	0.007	0.006	0.01	0.005	0.011	0.011	0.014	0.01
7	0.006	0.005	0.007	0.006	0.01	0.005	0.011	0.011	0.014	0.01	0.008
8	0.005	0.007	0.006	0.01	0.005	0.011	0.011	0.014	0.01	0.008	0.016
9	0.007	0.006	0.01	0.005	0.011	0.011	0.014	0.01	0.008	0.016	0.017
10	0.006	0.01	0.005	0.011	0.011	0.014	0.01	0.008	0.016	0.017	0.017
11	0.01	0.005	0.011	0.011	0.014	0.01	0.008	0.016	0.017	0.017	0.032
12	0.005	0.011	0.011	0.014	0.01	0.008	0.016	0.017	0.017	0.032	0.032
13	0.011	0.011	0.014	0.01	0.008	0.016	0.017	0.017	0.032	0.032	0.031
14	0.011	0.014	0.01	0.008	0.016	0.017	0.017	0.032	0.032	0.031	0.012
15	0.014	0.01	0.008	0.016	0.017	0.017	0.032	0.032	0.031	0.012	0.011
16	0.01	0.008	0.016	0.017	0.017	0.032	0.032	0.031	0.012	0.011	0.009
17	0.008	0.016	0.017	0.017	0.032	0.032	0.031	0.012	0.011	0.009	0.012
18	0.016	0.017	0.017	0.032	0.032	0.031	0.012	0.011	0.009	0.012	0.012
19	0.017	0.017	0.032	0.032	0.031	0.012	0.011	0.009	0.012	0.012	0.006
20	0.017	0.032	0.032	0.031	0.012	0.011	0.009	0.012	0.012	0.006	...

Рис. 25. Фрагмент ряда данных после центрирования и фрагмент траекторной матрицы

На следующем шаге происходит вычисление векторов собственных чисел λ и матрицы собственных и факторных векторов U, V . Получившиеся матрицы будут одинаковы в случае, если длина окна L равна половине ряда.

	0
0	-0.001
1	-0
2	0
3	0.001
4	0.001
5	0.002
6	0.002
7	0.003
8	0.004
9	0.004
10	0.005
11	0.005
12	0.006
13	0.006
14	0.007
15	...

	0
0	-0.003
1	-0.003
2	-0.003
3	-0.003
4	-0.003
5	-0.003
6	-0.003
7	-0.003
8	-0.004
9	-0.004
10	-0.004
11	-0.004
12	-0.004
13	-0.004
14	-0.003
15	...

	0
0	0.009
1	0.009
2	0.01
3	0.011
4	0.012
5	0.013
6	0.013
7	0.013
8	0.013
9	0.012
10	0.011
11	0.01
12	0.009
13	0.009
14	0.008
15	...

	0
0	-0.003
1	-0.003
2	-0.002
3	-0.001
4	-0
5	0.001
6	0.002
7	0.002
8	0.002
9	0.002
10	0.001
11	-0
12	-0.002
13	-0.002
14	-0.003
15	...

	0
0	-0.004
1	-0.007
2	-0.006
3	-0.002
4	0.002
5	0.001
6	0.002
7	-0.007
8	-0.008
9	-0.006
10	-0.007
11	-0.002
12	-0.007
13	-0.001
14	-0.001
15	...

Рис. 26. Восстановление пяти компонент

Рисунок 27 демонстрирует вид получившихся восстановленных компонент.

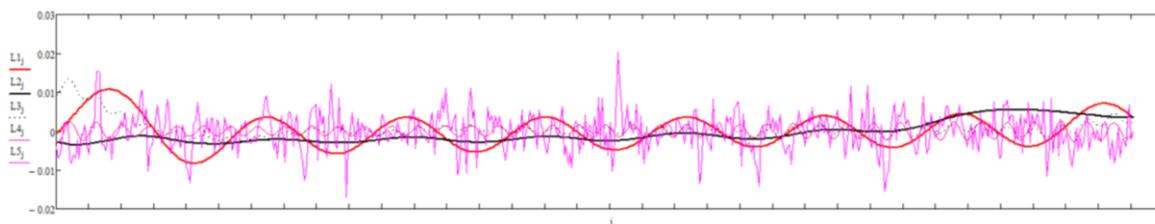


Рис. 27. График компонент $L1, L2, L3, L4, L5$

Для данного случая компоненты $L1, L2, L3$ и $L4$ отражают периодические составляющие, а компонента $L5$ — остаточную шумовую компоненту. При анализе полученных результатов следует учитывать, что наибольшей достоверностью обладают центральные части рядов, так как элементы рядов получаются усреднением по антидиагоналям.

Затухающий вид графиков ковариационных матриц может свидетельствовать о близости выделенного шума к белому. Шумы спутниковых измерений близки к фликер-шумам или являются промежуточными между белым и розовым шумами (Горшков, Щербакова, 2012).

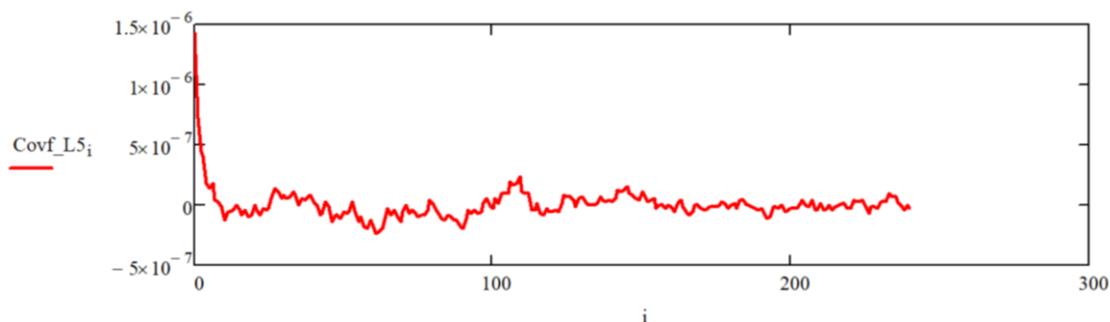


Рис. 28. График ковариационной матрицы

Рисунок 29 демонстрирует вид зашумленного графика функции.

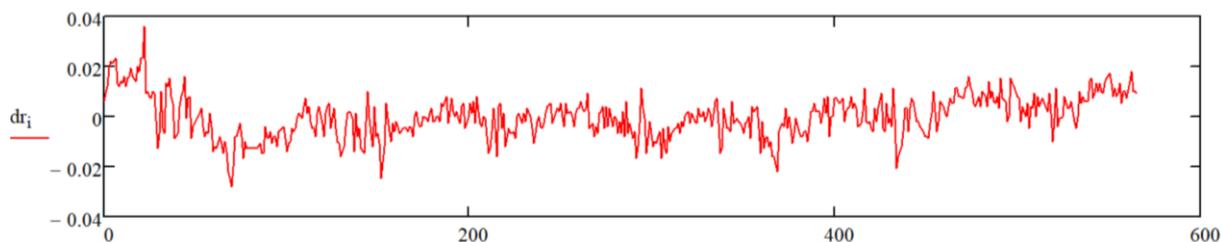


Рис. 29. График функции с шумовой составляющей

Алгоритм «Гусеница»-SSA является крайне удобным и эффективным инструментом при анализе, прогнозе временных рядов и их разбиении на интерпретируемые аддитивные составляющие. Важнейшей особенностью данного метода является отсутствие наличия сведений о характеристиках, структуре и особенностях ряда.

Глава 5. Анализ изменения положений референционных базовых станций

5.1. ПОДГОТОВКА ДАННЫХ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

На предыдущих этапах исследования изучались движения референционных станций сети Комитета по градостроительству и архитектуре г. Санкт-Петербург (сеть РС СПб). В рамках данной работы для проверки гипотез исследовались станции сети Санкт-Петербургского государственного университета и сети частных компаний.

Первая очередь сети базовых станций СПбГУ была введена в эксплуатацию в декабре 2011 года. Сеть предназначена для выполнения учебно-научных работ. На каждом пункте установлен приемник Trimble NetR9, высокоточная антенна Choke Ring и метеостанция Vaisala. Управление сетью осуществляется посредством программного обеспечения Trimble VRS3Net, содержащим модули передачи параметров трансформации и получения данных о состоянии атмосферы. Сеть состоит из пяти пунктов, четыре из которых стационарные, один расположен на передвижной лаборатории (Сеть референционных станций СПбГУ, дата обращения 20.11.2022).

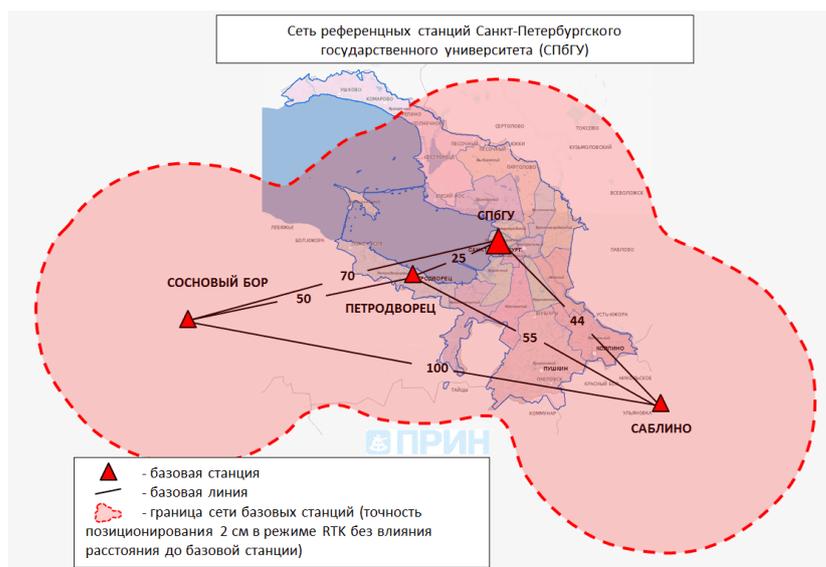


Рис. 30. Сеть референционных станций Санкт-Петербургского государственного университета (Сеть референционных станций СПбГУ, дата обращения 20.11.2022)

На первом этапе работы проводилась подготовка исходных данных для дальнейшей обработки.

В качестве исходных данных были использованы часовые и суточные файлы RINEX-файлы за различные периоды с 2013 г. по 2022 г. со станций 78SP, GU29, LMNS, PULJ, SBOR, SPTR, VASO, расположенных в Выборгском, Петроградском, Петродворцовом, Московском и Василеостровском районах Санкт-Петербурга, а также на территории г. Сосновый Бор Ленинградской области.

Исходные файлы импортировались в проект в ПО Topcon MAGNET Tools, после чего производилась группировка в пятисуточные сеансы наблюдений. В дальнейшем полученные сеансы экспортировались в формате RINEX (сырые данные GPS+).

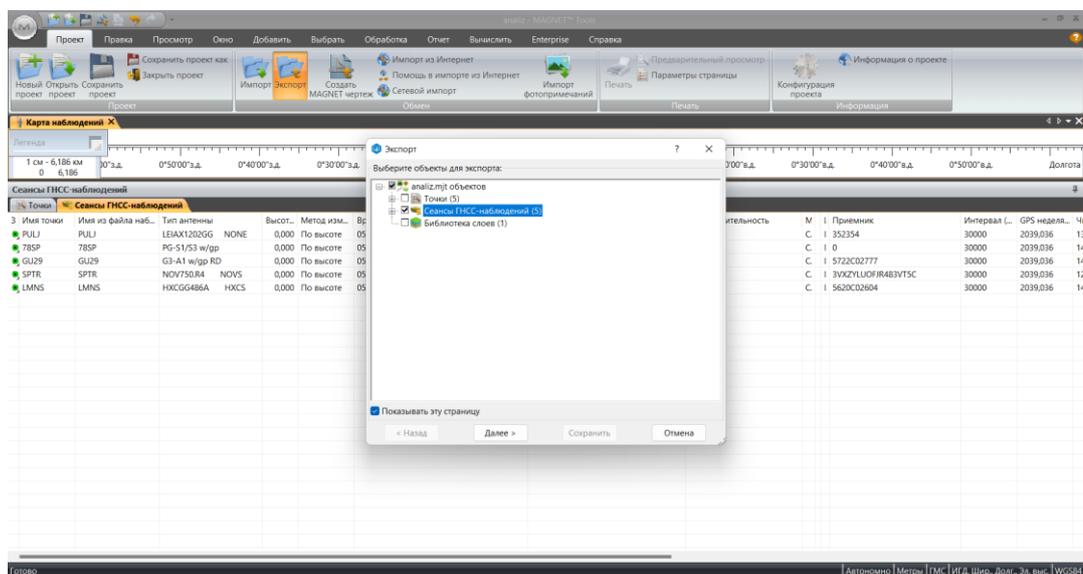


Рис. 31. Экспорт RINEX-файлов в MAGNET Tools

5.2. ОБРАБОТКА ДАННЫХ ПО АЛГОРИТМУ PRECISE POINT POSITIONING

Для обработки данных методом Precise Point Positioning использовался онлайн-сервис CSRS-PPP (Canadian Spatial Reference System Precise Point Positioning) (Сайт Канадской геодезической службы с общедоступными инструментами и настольными приложениями, дата обращения 02.10.2021).

Данный сервис осенью 2020 года получил обновление до 3-ей версии. Модернизация включила в себя возможность обработки по методике PPP-AR с разрешением неоднозначности.

Для использования сервиса в целях обработки данных необходимо пройти обязательную регистрацию. Пользователю предоставляется выбор режима обработки (статический или кинематический), а также системы координат (для исследования выбиралась система ITRF). Существует возможность загрузки модели океанических нагрузок (Ocean Tide Loading). В случае проведения процесса обработки без файла океанических приливов, сервис самостоятельно рассчитывает коэффициент с использованием приблизительных координат с помощью сетки Чалмерса (the Chalmers grid).

Рис. 32. Скриншот страницы обработки данных сервиса CSRS-PPP

После обработки пользователь получает конечные абсолютные координаты положения пункта. Итоговый отчет представляет собой архив, содержащий следующие файлы:

- отчет в форме (.pdf), содержащий текстовую и графическую информацию об обработке. Пример отчета представлен в Приложении А;
- файл формата (.sum), содержащий результаты и параметры обработки в текстовом формате;
- файл формата (.pos). Файл содержит информацию о местоположении для каждой обработанной эпохи;
- файл формата (.csv). Файл содержит информацию о часах и расположении для каждой обрабатываемой эпохи, в качестве разделителя используется запятая;
- файл формата (.tro), содержащий информацию о сухой и влажной зенитных задержках и тропосферный градиент для каждой обработанной эпохи;
- файл формата (.clk), содержащий смещение часов приемника и сигму смещения часов (95%) для каждой обработанной эпохи;
- файл формата (.txt), содержащий описание всех представленных в архиве файлов.

Средние квадратические погрешности не превышали значений 0,002-0,003 м в плане, по высоте СКП находились в диапазоне 0,004-0,006 м.

Полученные по результатам обработки плановые и высотные координаты записывались во временные ряды в ПО Microsoft Office Excel для дальнейшего анализа.

5.3. ОБРАБОТКА ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ. АНАЛИЗ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ СТАНЦИЙ

Обработка итоговых временных рядов производилась с помощью алгоритма «Гусеница»-SSA, который был реализован в ПО MathCAD (результаты обработки всех временных рядов приведены в приложении А). В результате обработки выделяются аддитивные компоненты ряда, которые можно условно разделить на группы:

- тренд;
- периодические составляющие;
- остаточная шумовая компонента.

При анализе использовалось разложение на 5 компонент. Компоненты L1, L2, L3 и L4 являются периодическими составляющими, компонента L5 – остаточным шумом.

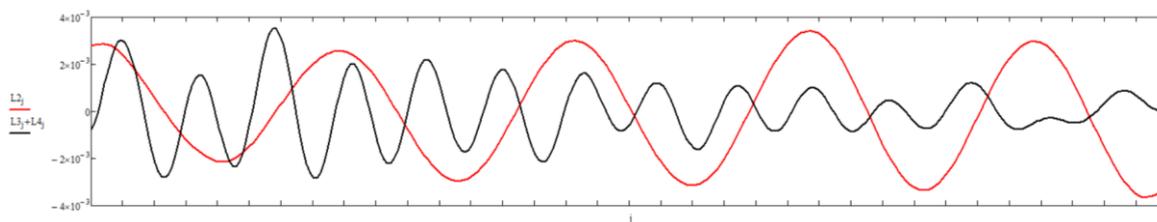


Рис.33. График периодических составляющих ряда координат станции GU29, направление север-юг

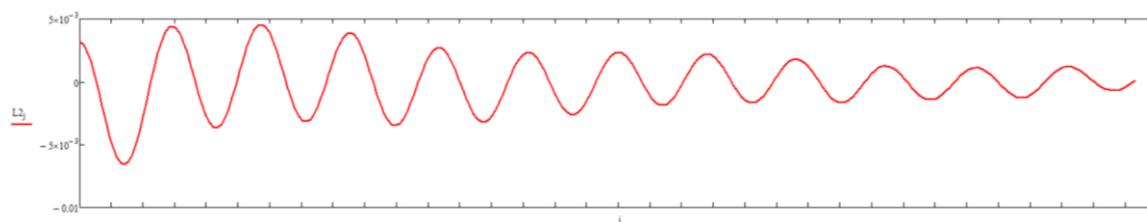


Рис.34. График периодических составляющих ряда координат станции SPTR, направление запад-восток

Представленные на рисунках 33 и 34 графики демонстрируют выявленные периодические компоненты в движении станции в плане в направлениях север-юг и запад-восток, полученные после исключения трендовых и шумовых составляющих.

График на рисунке 35 отражает пример выявленной периодики в движении станции по высоте.

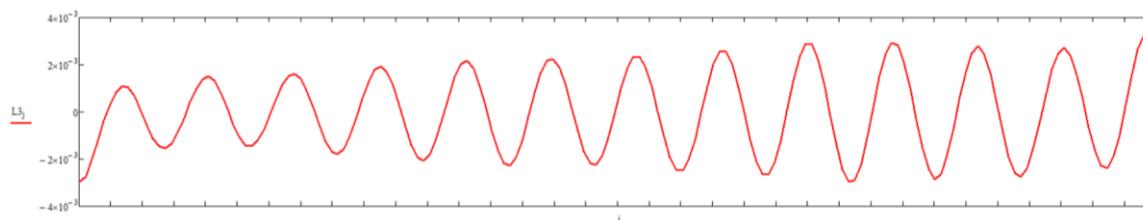


Рис.35. График периодических составляющих ряда координат станции 78SP, высота

Представленная ниже сводная таблица демонстрирует все выявленные периодические составляющие в движениях исследуемых станций в плане и по высоте.

Таблица 2. Периодические движения в плане и по высоте исследуемых референчных станций

	VASO	SBOR	78SP	GU29	LMNS	PULJ	SPTR
Плановая составляющая, направление север-юг	-	4 месяца	3 месяца	4 месяца, 12 месяцев	6 месяцев, 12 месяцев	-	4 месяца, 12 месяцев
Плановая составляющая, направление запад-восток	4 месяца	4 месяца	-	6 месяцев, 12 месяцев	-	-	4 месяца
Высотная составляющая	70 дней	70 дней	70 дней	12 месяцев	12 месяцев	70 дней	70 дней

В высотных движениях многих станций стабильно выделяется периодика продолжительностью 70 дней, в отдельных случаях – 12 месяцев. В плановых движениях в направлении запад-восток периодики различаются по продолжительности, самая часто выявляемая компонента – 4 месяца. В координатах в направлении север-юг часто выделяемые составляющие – 4 месяца и 12 месяцев.

Таблицы 3-5 отражают выявленные амплитуды колебаний в миллиметрах для каждого из направлений.

Таблица 3. Средние амплитуды выявленных периодик, направление север-юг (мм)

	GORN	KRON	KUP2	LOM2	SEST	VASO	SBOR	78SP	GU29	LMNS	PULJ	SPTR
3 месяца								1,1				
4 месяца	1,5	1,5	0,9	1,2	1,2		0,7		1,6			2,0
6 месяцев										2,0		
12 месяцев	1,1	1,4		1,4	1,2				3,1	4,6		4,9

Таблица 4. Средние амплитуды выявленных периодик, направление запад-восток (мм)

	GORN	KRON	KUP2	LOM2	SEST	VASO	SBOR	78SP	GU29	LMNS	PULJ	SPTR
4 месяца	1,1	1,1	1,0	1,1	1,0	1,1	1,6					2,2
6 месяцев									0,9			
12 месяцев		1,0			0,9				1,7			

Таблица 5. Средние амплитуды выявленных периодик, высота (мм)

	GORN	KRON	KUP2	LOM2	SEST	VASO	SBOR	78SP	GU29	LMNS	PULJ	SPTR
70 дней	2,0	1,5	2,2	1,2	2,3	2,2	4,3	2,3			2,3	3,1
12 месяцев	3,3	5,0	4,6	4,5	6,1				4,1	3,9		

Проанализированный тренд продемонстрировал явную тенденцию к движению всех станций на северо-восток.

5.4. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ С ПРЕДЫДУЩИМИ ИССЛЕДОВАНИЯМИ

Исследование дополнительного ряда станций было направлено на подтверждение достоверности ранее проведенных исследований и установление корреляций периодик с различными факторами.

В таблице 6 представлены результаты, полученные по итогам проведенного ранее исследования. Данные отражают исследования движений станций сети РС СПб.

Таблица 6. Периодические движения в плане и по высоте ранее исследованных референционных станций

	GORN	KRON	KUP2	LOM2	SEST
Плановая составляющая, направление север-юг	12 месяцев, 4 месяца	12 месяцев, 4 месяца	4 месяца	12 месяцев, 4 месяца	12 месяцев, 4 месяца
Плановая составляющая, направление запад-восток	4 месяца	12 месяцев, 4 месяца	4 месяца	4 месяца	20 месяцев, 4 месяца
Высотная составляющая	12 месяцев, 70 дней	12 месяцев, 70 дней	12 месяцев, 70 дней	12 месяцев, 70 дней	12 месяцев, 70 дней

При сравнении полученных в данном исследовании результатов с результатами предыдущих исследований выявляется повторяемость многих периодик. Самыми стабильными и часто выявляемыми являются периодики, выделяемые в высотных движениях станций. Результаты исследования, аналогично предыдущим, показали выделение периодик 12 месяцев и 70 дней в высотных движениях, 4 месяца и 12 месяцев в плановых движениях в обоих направлениях.



Рис. 36. Схема расположения исследуемых станций

Одной из задач при выполнении работы являлась проверка нескольких гипотез, связанных с выявляемыми периодами.

1. Наличие взаимосвязи между выявляемыми периодическими компонентами и гармониками океанических приливов.

В результате проведенного исследования в области деформаций, возникающих под действием океанических приливов (обзор приведен в Главе 3), установлено наличие долгопериодических движений волн. Однако данные периоды составляют 182, 27 и 13 дней, что не коррелирует с выявляемыми периодами в движениях станций. Исходя из этого, можно сделать вывод об отсутствии взаимосвязи между долгопериодическими движениями базовых станций и гармониками океанических приливов. Учитывая наличие нескольких суточных периодов в движениях волн, они могут оказывать влияние на короткопериодические перемещения станций.

2. Наличие взаимосвязи между выявляемыми длиннопериодическими компонентами и используемыми на базовых станциях приемниками.

На станциях, задействованных в работе, для проведения спутниковых наблюдений используются различные приемники (Leica, Trimble, Topcon, Javad).

Таблица 7. Приемники и антенны, используемые на исследованных станциях

Станция	Приемник	Антенна
GORN	LEICA GR10	LEIAR25.R4
KRON	LEICA GR10	LEIAR25.R3
KUP2	LEICA GR10	LEIAR25.R4
LOM2	LEICA GR10	LEIAR25.R3
SEST	LEICA GR10	LEIAR25.R4
SBOR	TRIMBLE NETR9	CR-G39(TPSH)
VASO	TRIMBLE NETR9	TRM59800.80 SCIT
78SP	Topcon TPS NET-G3A	PG-S1/S3 w/gp
GU29	TRIMBLE NETR9	G3-A1 w/gp RD
LMNS	TRIMBLE NETR9	HXCGG486A
PULJ	Javad EGGDT PREGO	Regant-SD
SPTR		NOV750.R4 NOVS

По результатам исследования в движениях станций выявлены одинаковые периодики (4 месяца и 12 месяцев в плановых движениях, 70 дней и 12 месяцев в движениях по высоте).

Таким образом, исходя из полученных результатов, можно сделать вывод: несмотря на одиночные случайные периодики (например, компонента продолжительностью 6 месяцев в плановых составляющих в направлении север-юг на станции LMNS), в большинстве случаев периодические движения являются схожими и не зависят от используемых на станциях приемников и антенн.

3. Наличие взаимосвязи между выявляемыми длиннопериодическими компонентами и сезонностью.

В процессе исследования в высотном направлении была выявлена часто повторяющаяся 12-месячная периодика. Для определения причин появления данной компоненты был проведен анализ полученных графиков и установлены месяцы, которые связаны с минимумами и максимумами графиков функций. В результате анализа была установлена повторяющаяся для всех выявленных 12-месячных компонент зависимость: максимум соответствует августу, минимум – февралю (графики всех выявленных 12-месячных компонент приведены в приложении В).

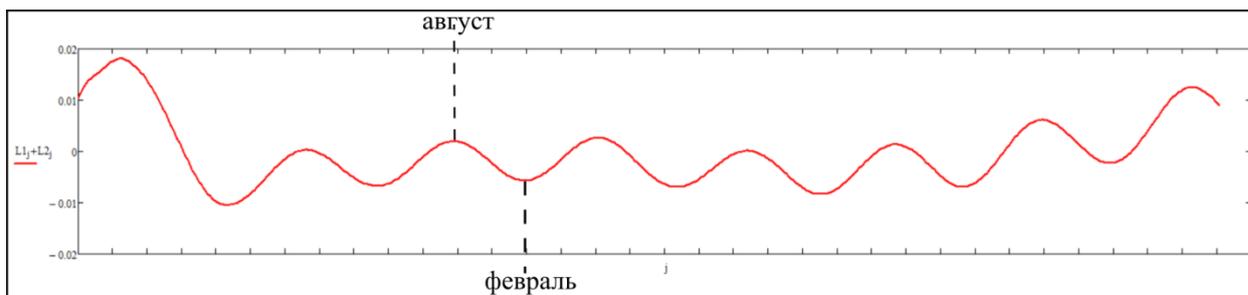


Рис. 37. Анализ 12-месячной компоненты, высота, станция LOM2

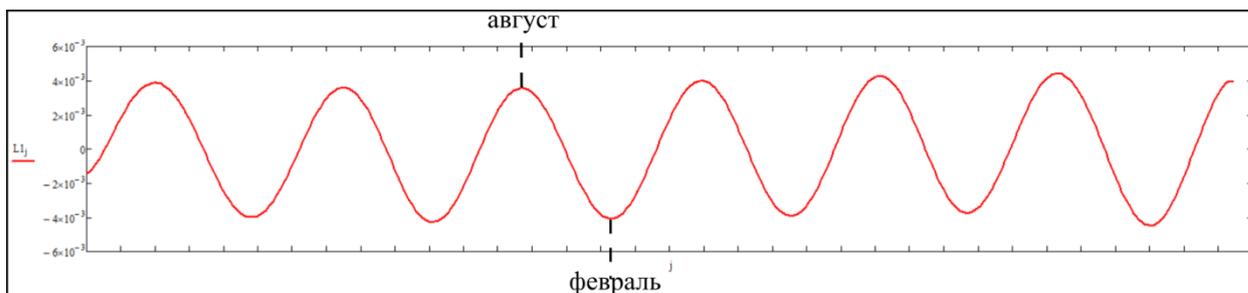


Рис. 38. Анализ 12-месячной компоненты, высота, станция LMNS

Таблица 8. Средние выявленные амплитуды в 12-месячной периодике в высотном направлении

Станция	GORN	KRON	KUP2	LOM2	SEST	GU29	LMNS
Амплитуда (мм)	3,3	5,0	4,6	4,5	6,1	4,1	3,9

Из полученных результатов можно сделать вывод о прямой корреляции между полученными аддитивными компонентами и температурой, и, как следствие, температурными деформациями сооружений. Однако максимум функции смещен на один месяц относительно июля (самого теплого месяца в г. Санкт-Петербург). Это может быть обусловлено максимальным накоплением тепла в теле здания к концу августа и максимальным расширением конструкций. Наблюдаемый в конце февраля минимум обусловлен охлаждением и усадкой сооружений под влиянием низких температур самого холодного месяца.

Также было проведено исследование расположения, высот и материала зданий, на которых установлены приемники. Выявлено, что 12-месячные компоненты по высоте выделялись во временных рядах координат станций, расположенных на высоких, массивных, незатененных зданиях, подверженных максимальному воздействию инсоляции.

Рисунок 39 демонстрирует пример вида зданий, на которых расположены базовые станции с выявленными 12-месячными периодиками в движениях по высоте. Рисунок 39а – здание, на котором расположена станция GORN, материал стен – кирпич, высота – 24 м, расположено на открытой местности, подвержено нагреву под влиянием солнечных лучей, адрес – 12-я линия В.О., 2-4/45. Рисунок 39б – здание, на котором расположена станция GU29, материал стен – железобетон, высота – 18 м, расположено на открытой местности,

подвержено нагреву под влиянием солнечных лучей, адрес – Большая Монетная улица, 16 к30.



а



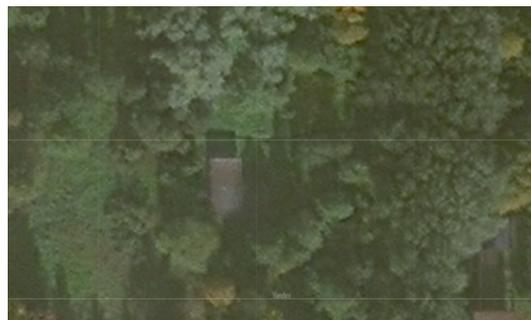
б

Рис. 39. Здания, на которых расположены станции с выявленными 12-месячными периодами в движениях по высоте

Рисунок 40 демонстрирует пример вида зданий, на которых расположены базовые референсные станции, в высотных движениях которых не были выявлены 12-месячные периоды. Рисунок 40а – здание, на котором расположена станция SPTR, материал стен – кирпич, высота – 3 м, затенено деревьями, адрес – Пулковское шоссе, 65 к12. Рисунок 40б – здание, на котором расположена станция PULJ, материал стен – кирпич, высота – 6 м, затенено деревьями, адрес – Пулковское шоссе, 65 к1БА.



а



б

Рис. 40. Здания, на которых расположены станции, в высотных движениях которых не выявлены 12-месячные периоды

Результатом проделанной работы стали выявленные вновь и подтвержденные предыдущими исследованиями долгопериодические движения базовых станций ГНСС, а также опровержение гипотез о влиянии на долгопериодические движения станций на территории Санкт-Петербурга океанических приливов и используемых приемников и подтверждение гипотезы о корреляции периодик с температурными деформациями зданий.

Для дальнейшего исследования и наиболее реалистичного понимания ситуации и выявления периодик крайне важно проведение анализа временных рядов плановых координат путем совмещения обработки направлений север-юг и запад-восток. Задача может решаться путем расчета углов или расстояний до каждой точки временного ряда.

Одной из важнейших задач при проведении геодезического мониторинга является выявление периодических движений и основного тренда, а также определение их причин и количественных значений. Такие исследования позволяют определить влияние протекающих естественных процессов на объект мониторинга и отличить его от изменений в поведении трендов и периодик, вызванных негативными процессами. ГНСС-технологии дают возможность проведения круглосуточного мониторинга, позволяющего вовремя выявлять возможное развитие неблагоприятных ситуаций, а также повышать точность и достоверность измерений.

Заключение

В ходе выполнения работы был проведен обзор существующей литературы, посвященной геодезическому мониторингу, проведению спутниковых наблюдений, вопросам использования базовых референчных станций, применению метода PPP. Одной из задач являлось знакомство с существующими программными продуктами в сфере обработки спутниковых наблюдений.

Особое внимание в работе было уделено изучению теории метода точного позиционирования PPP. Отдельная глава посвящена обзору факторов и моделей, влияющих на точность позиционирования методом PPP.

В рамках исследования была проведена обработка данных спутниковых наблюдений с семи станций. Работа проводилась по методике PPP с использованием открытого онлайн-сервиса CSRS-PPP. Для обработки временных рядов применялся метод «Гусеница»-SSA. Выявленные периодические компоненты были проанализированы, проведено сравнение результатов данного исследования с предыдущими.

В ходе исследования была проведена работа над тремя гипотезами:

- наличие взаимосвязи между выявленными длиннопериодическими компонентами и гармониками океанических приливов. В результате изучения теории приливных явлений наличие взаимосвязи не было выявлено, гипотеза не подтвердилась;
- наличие взаимосвязи между выявляемыми компонентами и используемыми на станциях приемниками. Обработка новых данных и сравнение полученных результатов с предыдущими исследованиями показали отсутствие взаимосвязи, гипотеза не подтвердилась;
- наличие взаимосвязи между выявленными компонентами и сезоном. По результатам анализа обработанных временных рядов в высотном направлении выявилась прямая корреляция между 12-месячными периодиками и сезонными деформациями зданий, гипотеза подтвердилась.

Дальнейшее исследование необходимо вести в направлении анализа временных рядов координат путем объединения движений станций по направлениям север-юг и запад-восток.

Список литературы

1. Александров, Ф.И. Выделение аддитивных компонент временного ряда при пакетной обработке методом «Гусеница»-SSA / Ф.И. Александров // Вестник СПбГУ. – 2006. - №2. – С. 71-74
2. Алексеева, О.А. Природа волновых процессов и их взаимодействие с приливными электростанциями / О.А. Алексеева // Вестник МГСУ. – 2012. - №4. – С. 200-203
3. Антонович, К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии: в 2 т: монография / К.М. Антонович. - Москва: ФГУП «Картгеоцентр», 2006. – 360 с.
4. Антонович, К.М. Спутниковый мониторинг земной поверхности / К.М. Антонович, А.П. Карпик, А.Н. Клепиков // Геодезия и картография. – 2004. - №1. – С. 4-11
5. Бижанова, А.Х. Использование возможностей беспилотных летательных аппаратов при мониторинге сдвижения земной поверхности / А.Х. Бижанова // Научные исследования. XXXVIII Международная практическая заочная конференция «Научные исследования: ключевые проблемы III тысячелетия»: сб. материалов (Москва, 7-8 июня 2020 г.). – Москва, 2020. - №2(33). - С. 15-16.
6. Большой энциклопедический словарь: А-Я / гл. ред. А.М. Прохоров. - М.;СПб: БСЭ, 2000. - 1452 с.
7. Брынь, М.Я. Геодезический мониторинг объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта спутниковыми методами / М.Я. Брынь, А.А. Никитчин, Е.Г. Толстов // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. – 2010. - №4(29). – С.58-60
8. Бутиков, Е.И. Океанские приливы в компьютерных моделях / Е.И.Бутиков // Компьютерные инструменты в образовании. – 2004. - №1. – С. 12-24
9. Воронов, А.Н. Сервис коррекции TerraStar – сантиметровая точность без базовых станций / А.Н. Воронов, Д.А. Никулин // Геопрофи. – 2021. - №4. С. 31-35
10. Вохмянин, С.В. Испытание алгоритма метода «Гусеница-SSA» для восстановления временного ряда / С.В. Вохмянин // Вестник СибГУ им. М.Ф. Решетникова. – 2010. - №1. – С. 59-62
11. Главные компоненты временных рядов: метод «Гусеница» / под. ред. Д.Л. Данилова, А.А. Жиглявского. - СПб: Пресском, 1997. - 307 с.
12. ГНСС плюс. Инновации в новой ГНСС антенне для высокоточных измерений: [электронный ресурс]. URL: <https://gnssplus.ru/articles/innovatsii-v-novoy-gnss-antenne-dlya-vysokotochnykh-izmereniy.html> (дата обращения: 20.03.2022)
13. Голяндина, Н.Э. Метод «Гусеница»-SSA: анализ временных рядов: учеб. пособие. - СПб, 2004. - 76 с.

14. Горшков, В.Л. База скоростей ГНСС Восточно-Европейской платформы для решения научных и прикладных задач / В.Л. Горшков, Н.В. Мохнаткин, А.В. Щербакова // Геодезия и картография. – 2021. - №1. – С. 34-44. DOI: 10.22389/0016-7126-2021-967-1-34-44
15. Горшков, В.Л. Исследование случайных и систематических ошибок GPS-наблюдений на территории Пулковской обсерватории / В.Л. Горшков, Н.В. Щербакова // Международный научно-технический и производственный электронный журнал «Науки о Земле». – 2012. - №4. – С. 12-22
16. ГОСТ Р 55535-2013. Глобальная навигационная спутниковая система. Методы и технологии выполнения геодезических работ. Общие технические требования к системам геодезического мониторинга: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28 августа 2013г. N 600-ст: дата введения 2014-01-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200104818> (дата обращения 25.11.2021). – Текст: электронный.
17. Гусев, И.В. Разработка методики учета эффектов от приливов в движении ИСЗ : автореф. дисс. канд. тех. Наук : 25.00.32 / Гусев Игорь Витальевич ; науч.рук. Яшкин Станислав Николаевич ; МИИГАиК. – Москва, 2013. – 24 с.
18. Гусев, И.В. Учет влияния океанических приливов при наблюдении геодезических искусственных спутников Земли / И.В. Гусев, С.А. Лебедев // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. - №1. – С. 25-32
19. Давыдов, А.В. Опыт использования результатов ГНСС-измерений на пунктах IGS для мониторинга морских нефтяных платформ на шельфе о. Сахалин / А.В. Давыдов, Е.Г. Гиенко // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2019. - №1. – С. 62-70. DOI: 10.33764/2618-981X-2019-1-1-62-70
20. Жуков, Б.Н. Геодезический контроль инженерных объектов промышленных предприятий и гражданских комплексов: учебное пособие / Б.Н. Жуков, А.П. Карпик. – Новосибирск: СГГА, 2006. – 148 с.
21. Жуков, Б.Н. Геодезический контроль сооружений и оборудования промышленных предприятий / Б.Н. Жуков. – Новосибирск: СГГА, 2003. – 356 с.
22. Исследование геодинамики зоны сопряжения Балтийского щита с Восточно-Европейской платформой по данным ГНСС-наблюдений / В.Л. Горшков, А.В. Мохнаткин, С.Д. Петров [и др]. // Вестник СПбГУ. – 2015. - №3. - С. 482-491.
23. Кавешников, М.Б. Сети постоянно действующих дифференциальных геодезических станций как часть общей информационной системы для малонаселенных территорий, создаваемой с целью уменьшения хозяйственных издержек и рисков / М.Б. Кавешников,

- А.Ю. Старостин, Е.К. Трифанова // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2020. – №2. – С. 156-162.
DOI: 10.33764/2618-981X-2020-1-2-156-162
24. Калинин, В.В. Влияние атмосферных нагрузок на результаты спутникового мониторинга здания станционного узла Загорской ГАЭС-2 методом PPP / В.В. Калинин, А.В. Устинов, Н.С. Косарев // Вестник СГУГиТ. – 2020. - №25, 3 – С. 34-41.
DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-3-34-41
25. Комаров, Р.В. Методические аспекты оценки точности спутниковых измерений / Р.В. Комаров, А.Н. Фахрутдинова, И.С. Нугманов // Ученые записки Казанского университета. Серия Физико-математические науки. – 2008. - №150, 3. – С. 46-56
26. Кузьмин, Ю.О. Современная геодинамика: от движений земной коры до мониторинга ответственных объектов / Ю.О. Кузьмин // Физика Земли. – 2019. - №1. – С. 78-103
27. Куприянов, А.О. Экспериментальный мониторинг ионосферы с применением мультисистемной ГНСС-аппаратуры / А.О. Куприянов, Д.А. Морозов // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2016. – №1. – С 29-33.
28. Курошев, Г.Д. Геодезия и география: учебник. – СПб: Изд-во С.-Петербург. ун-та. – 1999. – 372 с.
29. Липатников, Л.А. Совершенствование методики точного дифференциального позиционирования с использованием глобальных навигационных спутниковых систем: специальность 25.00.32 – Геодезия: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Липатников Леонид Алексеевич; научн. рук. Ю.В. Сурнин; СГГА. - Новосибирск, 2014. - 114 с.
30. Малинников, В.А. Перспективы развития методов обработки результатов спутниковых измерений в геодезии / В.А. Малинников, Е.Б. Ключкин, В.В. Калугин // Глобальная ядерная безопасность. – 2011. – №1. – С 79-88
31. Мельников, А.Ю. Анализ точности метода Precise Point Positioning для оценки возможности его применения в геодинамических исследованиях / А.Ю. Мельников // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2018. - Т. 62. № 2. - С. 605 – 616
32. Малютина, К.И. Сравнение бесплатной программы RTKLib с коммерческим программным обеспечением для постобработки ГНСС измерений / К.И. Малютина, С.О. Шевчук // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2017. - №2. – 12 с.
33. Першин, Д.Ю. Сравнительный анализ моделей тропосферной задержки в задаче определения местоположения высокой точности в спутниковых навигационных системах ГЛОНАСС/GPS / Д.Ю. Першин // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. - 2009. - Том 7, №1. - 8 с.

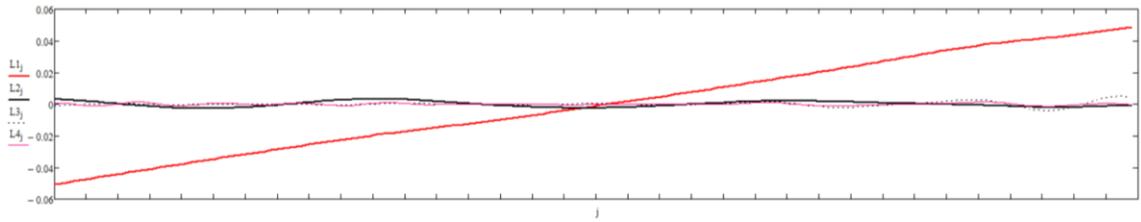
34. Подкорытов А.Н. Математическая модель смещения фазовых центров антенн при высокоточном местоопределении в глобальных навигационных комплексах / А.Н. Подкорытов // Электронный журнал "Труды МАИ". - 2012. - №50. - 13 с.
35. Сайт Канадской геодезической службы с общедоступными инструментами и настольными приложениями: [электронный ресурс]. URL: <http://www2.unb.ca/gge/Resources/PPP/OnlinePPPs.html> (дата обращения 02.10.2021)
36. Сайт Earth & Space Research. Polar Tide Models: [электронный ресурс]. URL: <https://www.esr.org/research/polar-tide-models/> (дата обращения: 05.03.2022)
37. Сайт IGS. Рабочая группа по точному позиционированию: [электронный ресурс]. URL: <https://www.igs.org/wg/precise-point-positioning-ppp/#charter> (дата обращения 12.05.2021).
38. Сайт IGS. Analysis Center Coordinator: [электронный ресурс]. URL: <https://www.igs.org/acc/#analysis-centers> (дата обращения: 20.03.2022)
39. Сайт Trimble. Использование точных GPS/ГЛОНАСС орбит при постобработке: [электронный ресурс]. URL: <https://trimble.club/ispolzovaniie-tochnykh-gps-glonass-orbit-pri-postobrabotkie/> (дата обращения 15.03.2022)
40. Рзаев, А. Гейдар-оглы. Идентификация механизмов тектонических движений земной коры / А.Гейдар-оглы Рзаев, С.Рауф-оглы Расулов // Известия Уральского государственного горного университета. – 2019. - №1. – С. 103-114
41. Серапинас, Б.Б. Глобальные системы позиционирования: учеб. изд. - М.: ИКФ «Каталог», 2002. – 106 с.
42. Сеть референцных станций СПбГУ: [электронный ресурс]. URL: https://www.prin.ru/seti_referencyh_stancij/sanktpeterburgskij_gosudarstvennyj_universitet_spbgu/?ysclid=lnjxx0kzy760926773 (дата обращения 20.11.2022)
43. Спесивцев, А.А. Разработка методики учета сезонных геодинимических эффектов с использованием данных о гравитационном поле Земли: дисс. канд. тех. наук : 25.00.32 / Спесивцев Александр Александрович ; науч.рук. В.Б. Непоклонов ; МИИГАиК. – Москва, 2017. – 110 с.
44. Терещенко, В.Е. Сравнение относительных смещений пунктов сети постоянно действующих базовых станций Новосибирской области, полученных с использованием различных онлайн-сервисов обработки спутниковых измерений / В.Е. Терещенко, Е.К. Лагутина // Вестник СГУГиТ. – 2019. - №2. – С. 76-94. DOI: 10.33764/2411-1759-2019-24-2-76-94
45. Хорошилова, Ж.А. Деформационный мониторинг инженерных объектов как составная часть геодезического мониторинга / Ж.А. Хорошилова, В.С. Хорошилов // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2012. – Т.1. – С. 77-80

46. Шевчук, С.О. Исследование точности метода PPP для навигационно-геодезического обеспечения геофизических работ / С.О. Шевчук, А.Х. Мелеск, Н.С. Косарев // Геопрофи. – 2016. - №3. – С. 10-15
47. Шевчук, С.О. Перспективы использования свободного программного обеспечения для постобработки ГНСС-измерений / С.О. Шевчук, К.И. Малютина, Л.А. Липатников // Вестник СГУГиТ. – 2018. – №1. – С. 65-84
48. Ялтыхов, В.В. К вопросу использования различных моделей калибровок GPS-антенн, типов куполов, масок по углу возвышения при обработке GNSS-измерений / В.В. Ялтыхов, К.И. Маркович // Вестник СГУГиТ. – 2016. - №4. – С. 40-51
49. A brief description of the available ocean tide models: [электронный ресурс]. URL: <http://holt.oso.chalmers.se/loading/tidemodels.html> (дата обращения 21.03.2022)
50. Evaluation of earth rotation parameters from modernized GNSS navigation messages / P. Steigenberger, O. Montenbruck, M. Bradke, M. Ramatschi [and ot.] // GPS solutions. - 2022. - 26, №2. – 12 p. DOI: 10.1007/s10291-022-01232-4
51. Huang, L. A new global grid model for the determination of atmospheric weighted mean temperature in GPS precipitable water vapor / L. Huang, W. Jiang, L. Liu, H. Chen [and ot.] // Journal of Geodesy. – 2019. – Vol. 93. - № 2. – P.159-176. DOI: 10.1007/s00190-018-1148-9
52. Ivanova, V. Long periodicals in the position of permanent GNSS stations / V. Ivanova, S. Tyurin // E3S Web of Conferences. – 2021. – Vol. 310. – 7 p. URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2021/86/e3sconf_spatialdata2021_03005/e3sconf_spatialdata2021_03005.html (дата обращения 14.11.2021)
53. Katsigianni, G. PPP and PPP-AR Kinematic Post-Processed Performance of GPS-Only, Galileo-Only and Multi-GNSS / G. Katsigianni, S. Loyer, F. Perosanz // Remote Sensing. – 2019. – Vol. 11, №11. - DOI: 10.3390/rs11212477
54. Kouba, J. Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products / J. Kouba, P. Heroux // GPS Solutions. – 2001.–Vol.5. – № 2. – P.12 – 28.
55. Legos. Observation and archiving service products. FES global tidal atlas distribution: [электронный ресурс]. URL: http://www.legos.obs-mip.fr/en/share/soa/cgi/getarc/v0.0a/index.pl.cgi?contexte=SOA&donnees=maree&produit=modele_fes (дата обращения 02.11.2022)
56. Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004 / F.Lyard, F.Leferve, T.Letellier, O.Francis // Ocean Dynamics. – 2006. - №56. – P.394-415
57. Ocean tide, Baltic Sea and atmospheric loading model tilt comparisons with interferometric geodynamic tilt observation – case study at Lohja2 geodynamic station, southern Finland /

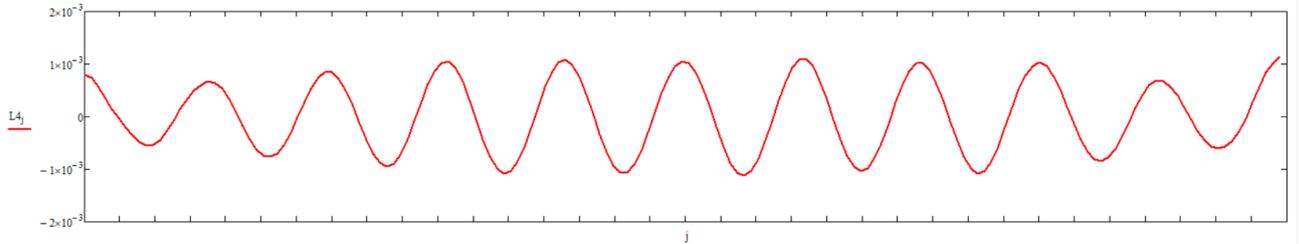
- H.Ruotsalainen, M.Nordman, J,Virtanen, H,Virtanen // Journal of Geodetic Science. – 2015. - №5. – P. 156-162
58. Ocean tide loading explained: [электронный ресурс]. URL: <http://holt.oso.chalmers.se/loading/loadingprimer.html> (дата обращения: 21.03.2022)
59. Pelc-Mieczkowska, R. Preliminary analysis of the applicability of the GPS PPP method in geodynamic studies / R. Pelc-Mieczkowska // Geomatics and environmental engineering. - 2020. - №14, 4. - P. 57-68. DOI: 10.7494/geom.2020.14.4.57
60. Sanchez, L. Geodetic monitoring of the variable surface deformation in Latin America / L. Sanchez, H. Drewes // International Association of Geodesy Symposia. – 2020. – P. 1-12. DOI: 10.1007/1345_2020_91
61. Seepersad, G. An assessment of the interoperability of PPP-AR network products / G. Seeresad, S. Bisnath // The Journal of Global Positioning Systems. – 2017. – Vol. 15. – 12 p. DOI: 10.1186/s41445-017-0009-9
62. The impact of different ocean tide loading models on GNSS estimated zenith tropospheric delay using precise point positioning technique / J.Zhang, X.Wang. Z.Li [and ot.] // Remote Sensing . – 2020. - №12. – 18 p. DOI: 10/3390/rs12183080
63. Vazquez-Ontiveros, J.R. Evaluation and analysis of the accuracy of open-source software and online services for PPP processing in static mode / J.R. Vazquez-Ontiveros, J. Padilla Velazco, J.R. Gaxiola-Camacho, G.E. Vazques Becerra // Remote Sensing. - 2023. - №15, 8. - 20 p.
64. Xu, C. Monte Carlo SSA to detect time-variable seasonal oscillations from GPS-derived site position time series / C. Xu, D. Yeu // Tectonophysics– 2015.–Vol.665. – P.118 – 126. DOI: 10.1016/j.tecto.2015.09.029

Приложение А. Графики временных рядов

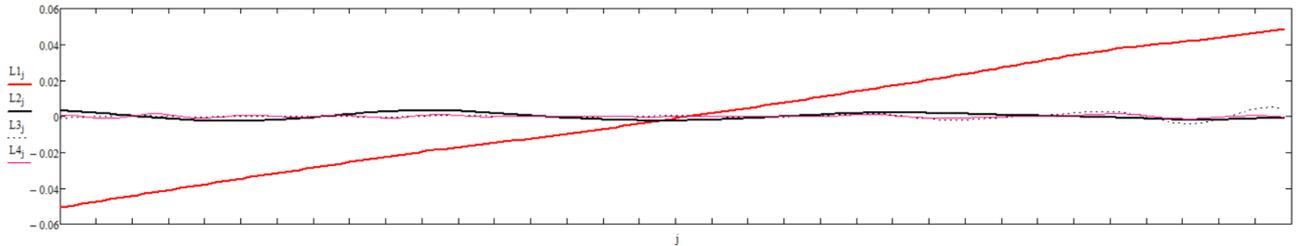
78SP (направление Ю-С), период 2018-2020 гг., тренд



78SP (направление Ю-С), период 2018-2020 гг., период



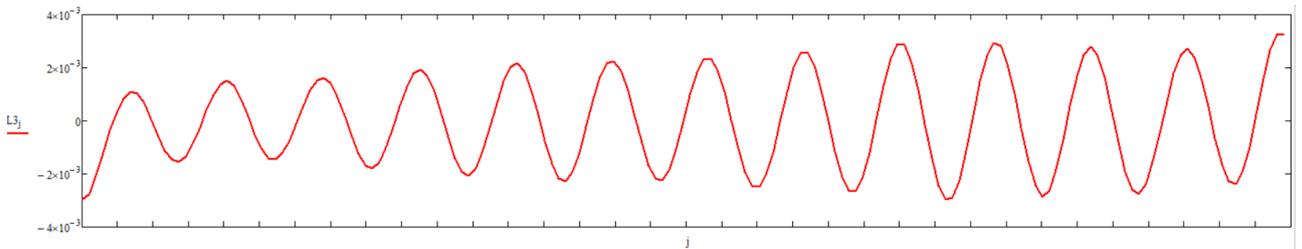
78SP (направление З-В), период 2018-2020 гг., тренд



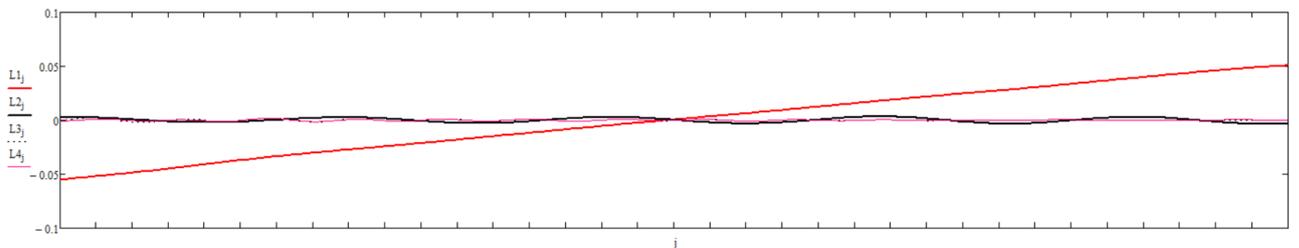
78SP (направление З-В), период 2018-2020 гг., период

Периодики не выявлены

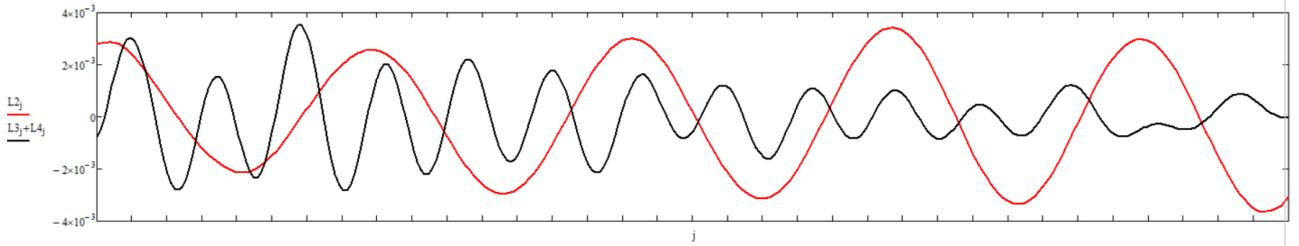
78SP (высота), период 2018-2020 гг.



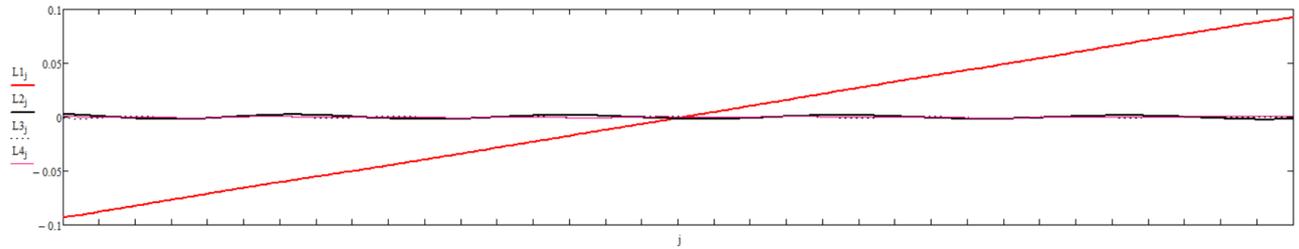
GU29 (направление Ю-С), период 2018-2022 гг., тренд



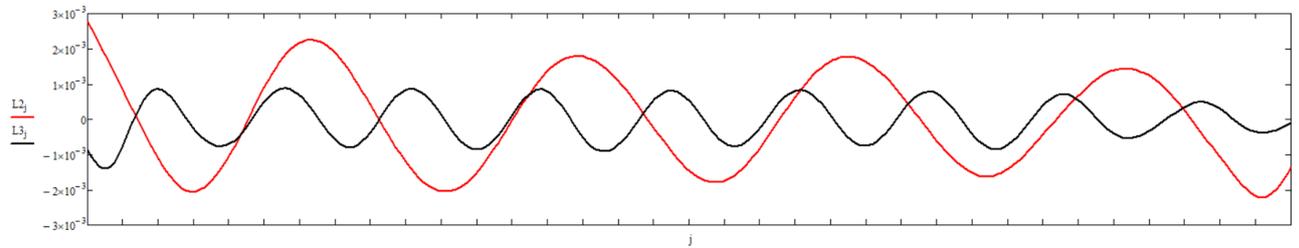
GU29 (направление Ю-С), период 2018-2022 гг., период



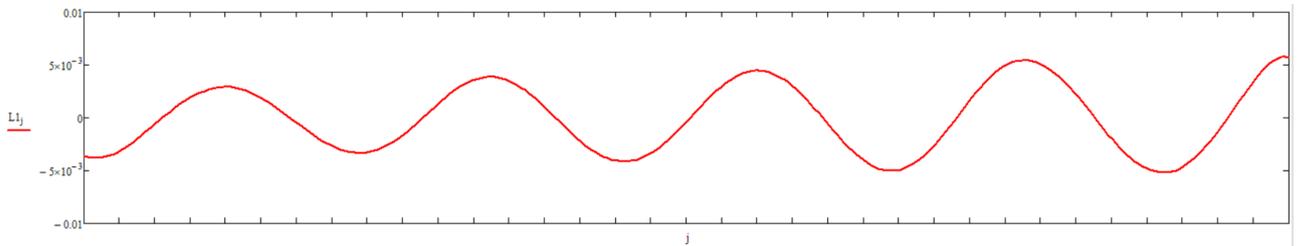
GU29 (направление З-В), период 2018-2022 гг., тренд



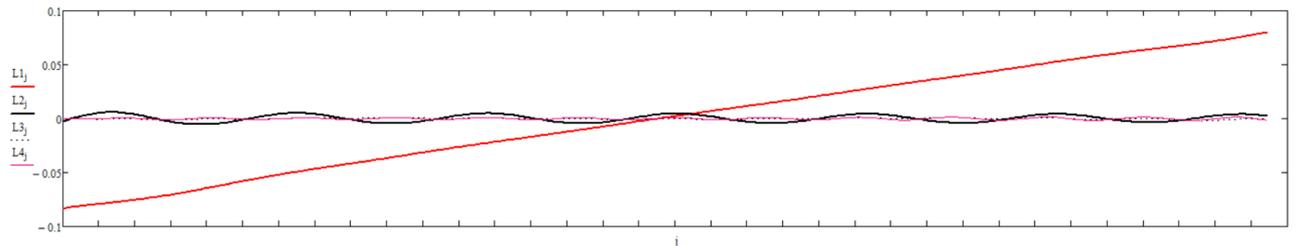
GU29 (направление З-В), период 2018-2022 гг., период



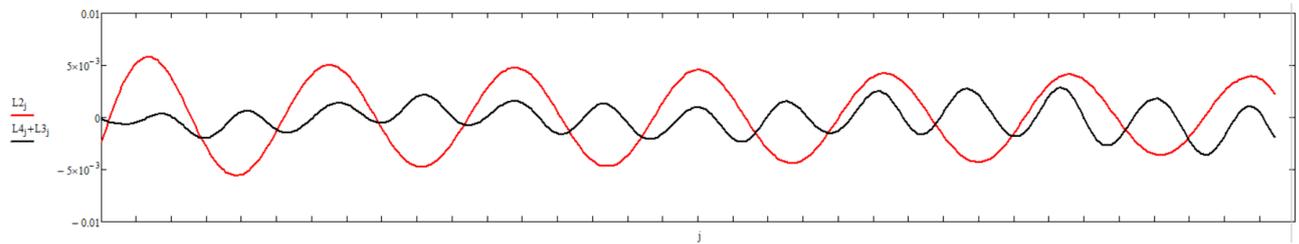
GU29 (высота), период 2018-2022 гг.



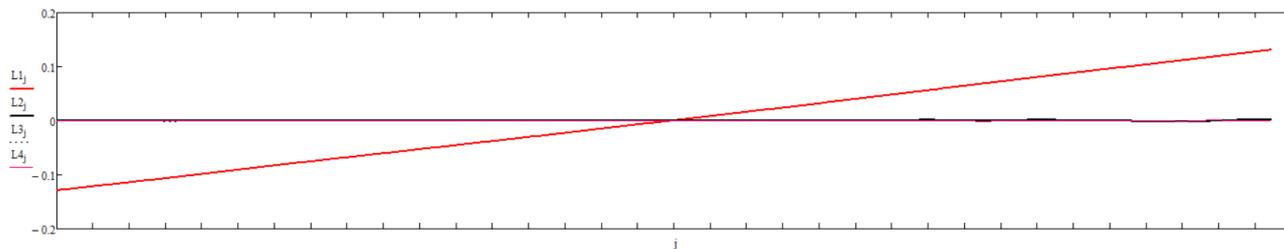
LMNS (направление Ю-С), период 2016-2022 гг., тренд



LMNS (направление Ю-С), период 2016-2022 гг., период



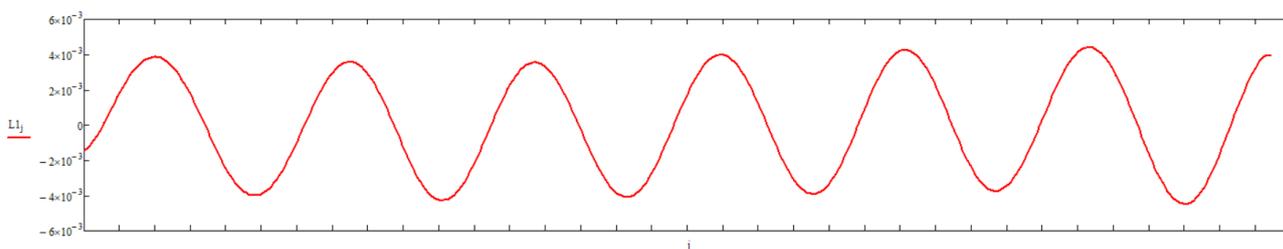
LMNS (направление 3-B), период 2016-2022 гг., тренд



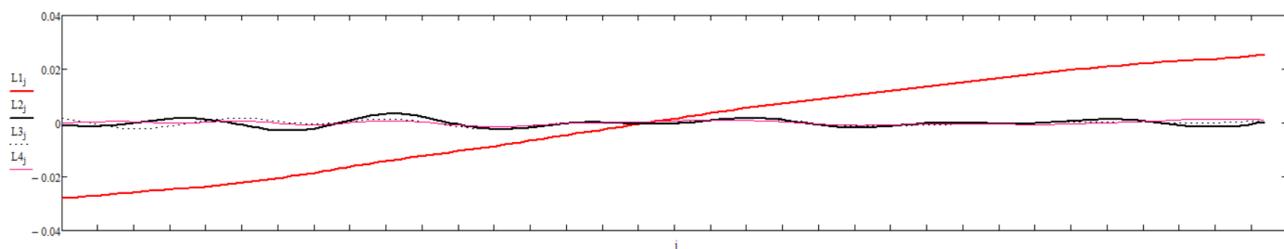
LMNS (направление 3-B), период 2016-2022 гг., период

Периодики не выявлены

LMNS (высота), период 2016-2022 гг.



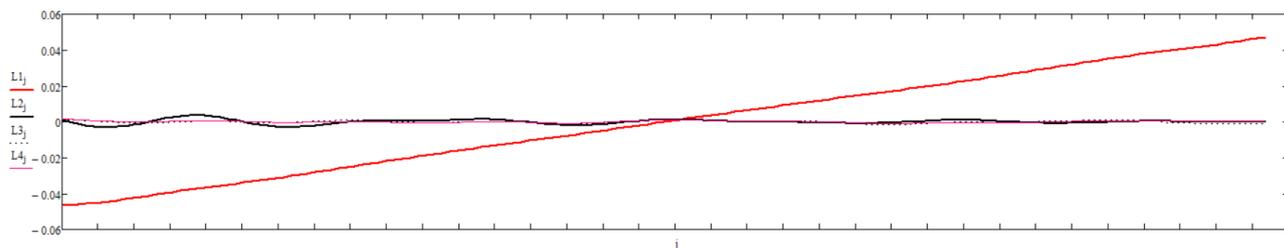
PULJ (направление Ю-С), период 2019-2021 гг., тренд



PULJ (направление Ю-С), период 2019-2021 гг., период

Периодики не выявлены

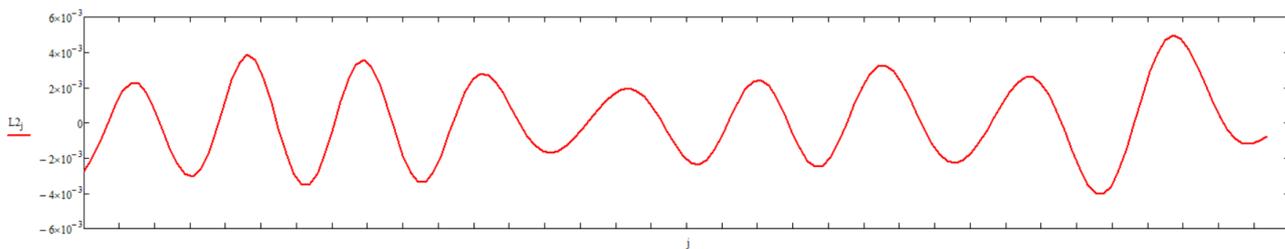
PULJ (направление 3-B), период 2019-2021 гг., тренд



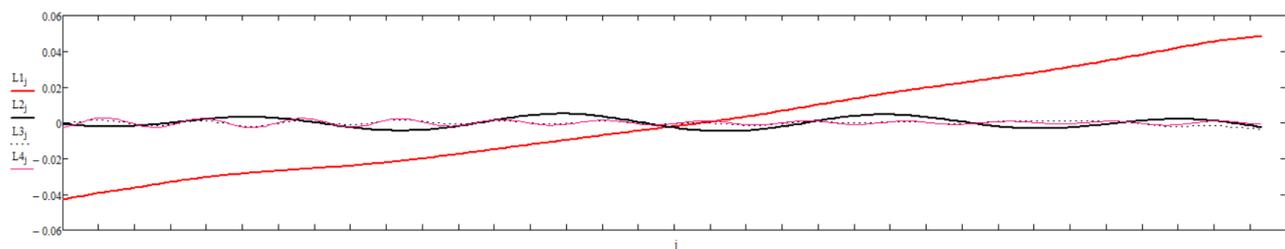
PULJ (направление 3-B), период 2019-2021 гг., период

Периодики не выявлены

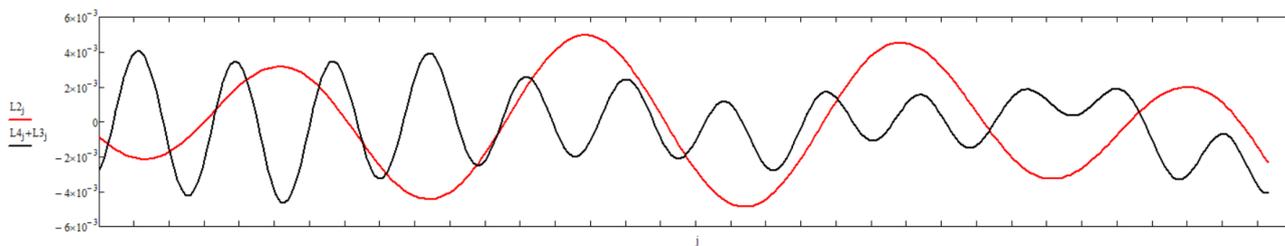
PULJ (высота), период 2019-2021 гг.



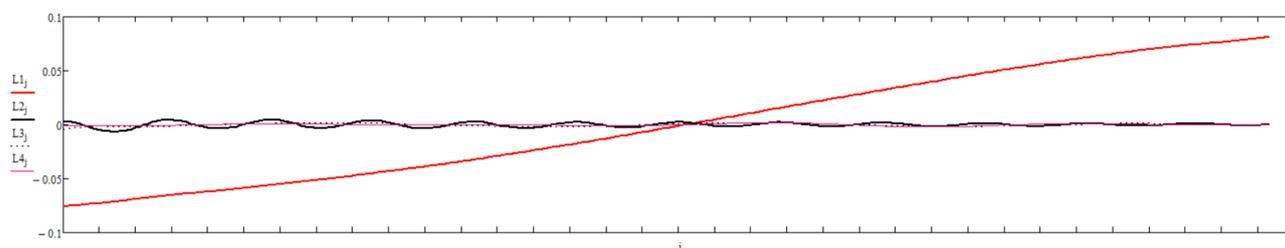
SPTR (направление Ю-С), период 2013-2016 гг., тренд



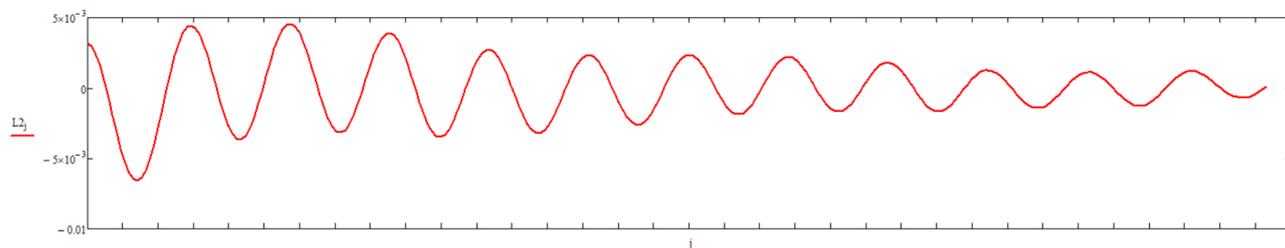
SPTR (направление Ю-С), период 2013-2016 гг., период



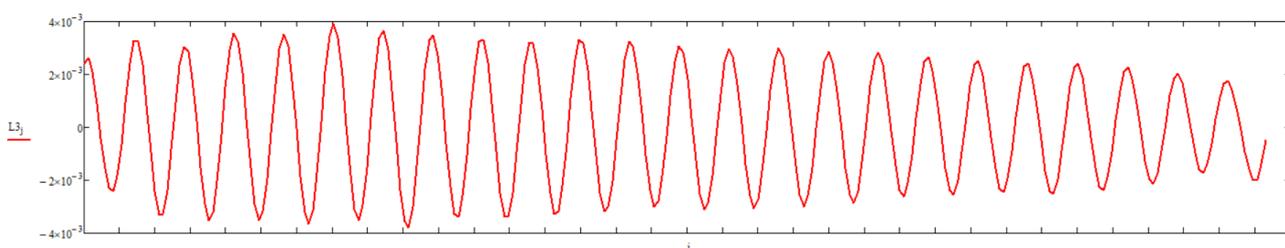
SPTR (направление З-В), период 2013-2016 гг., тренд



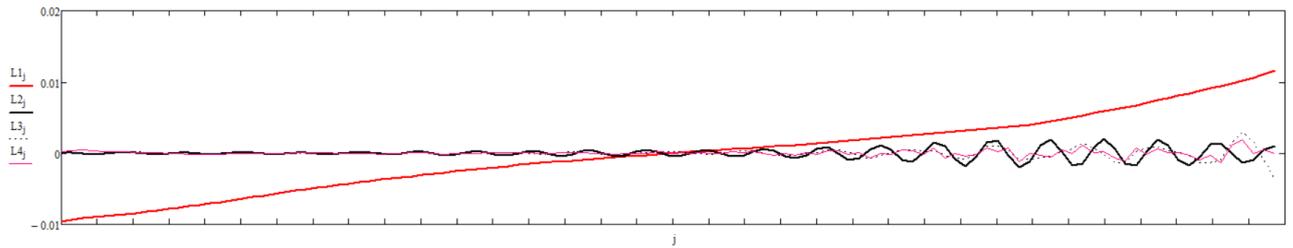
SPTR (направление З-В), период 2013-2016 гг., период



SPTR (высота), период 2013-2016 гг.



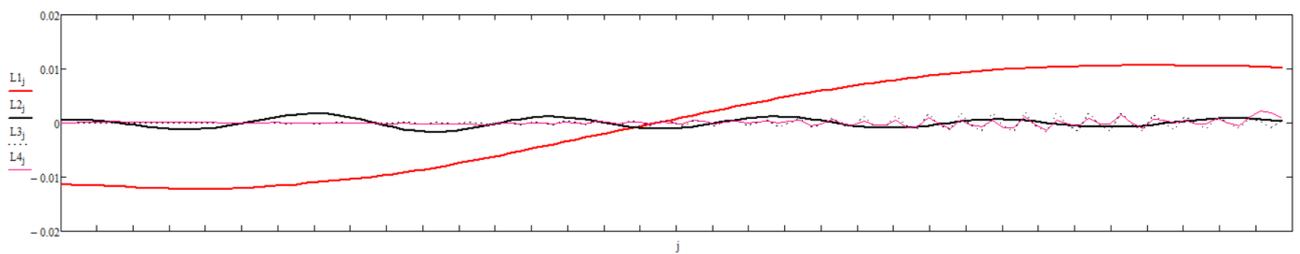
VASO (направление Ю-С), период 2014-2015 гг., тренд



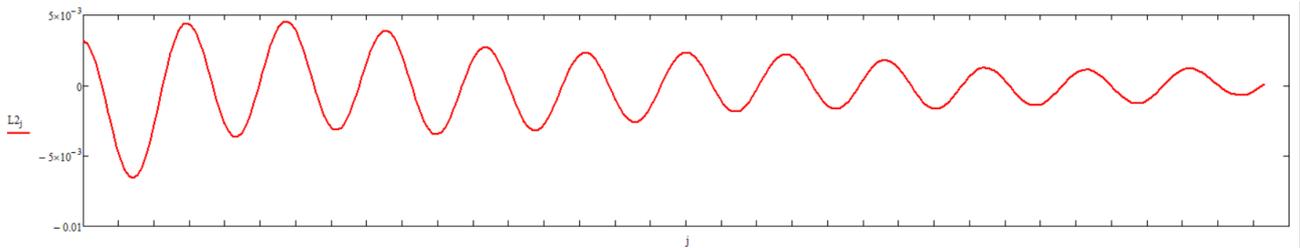
VASO (направление Ю-С), период 2014-2015 гг., период

Периодики не выявлены

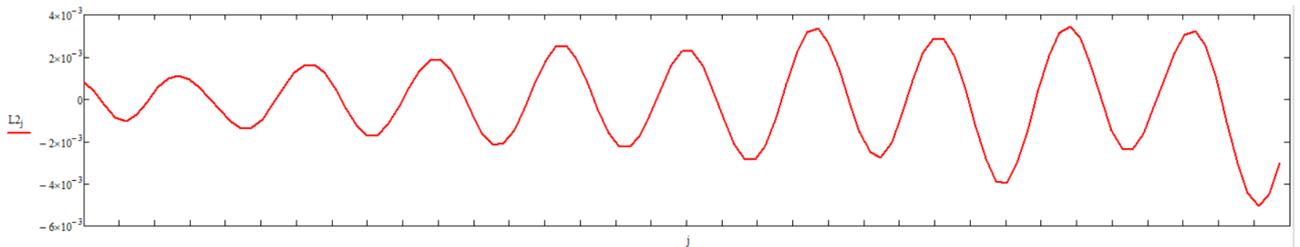
VASO (направление З-В), период 2014-2015 гг., тренд



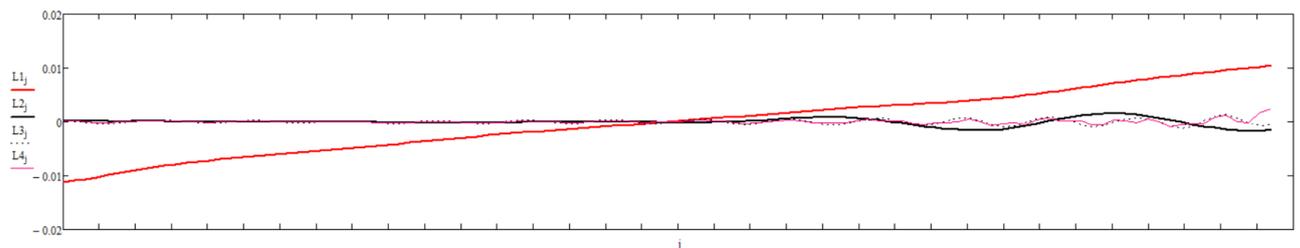
VASO (направление З-В), период 2014-2015 гг., период



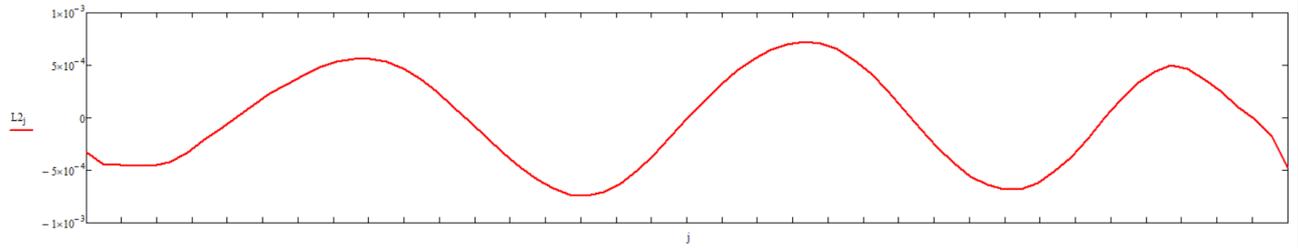
VASO (высота), период 2014-2015 гг.



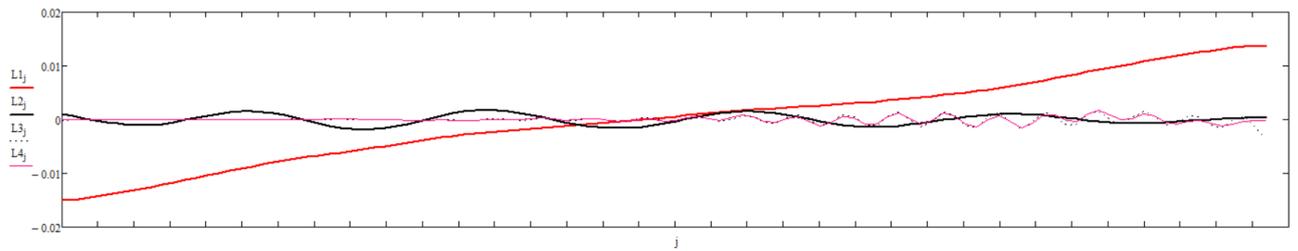
SBOR (направление Ю-С), период 2014-2015 гг., тренд



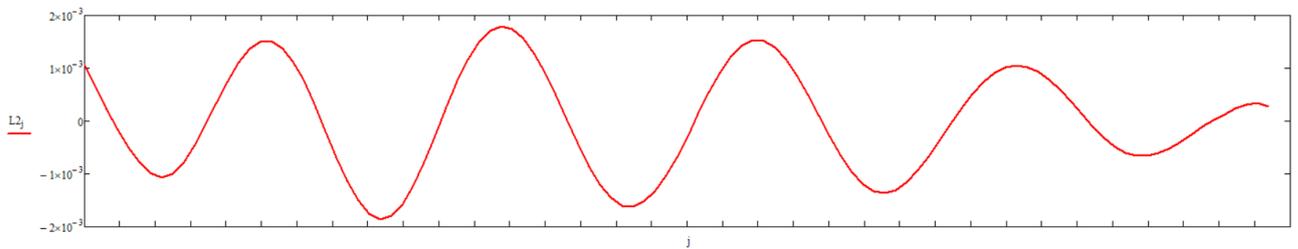
SBOR (направление Ю-С), период 2016-2017 гг., период



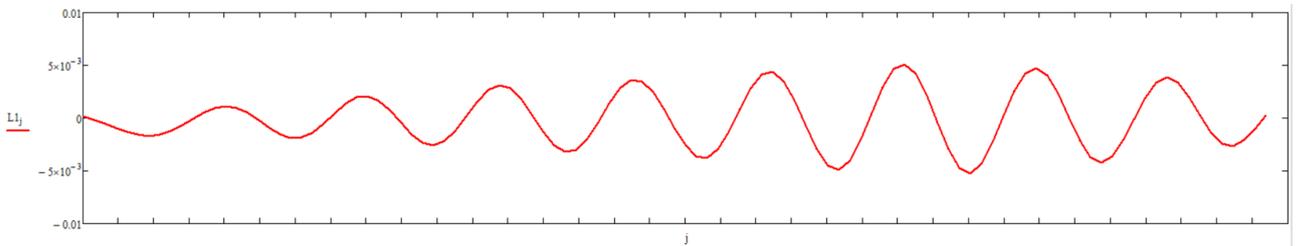
SBOR (направление З-В), период 2014-2015 гг., тренд



SBOR (направление З-В), период 2014-2015 гг., период

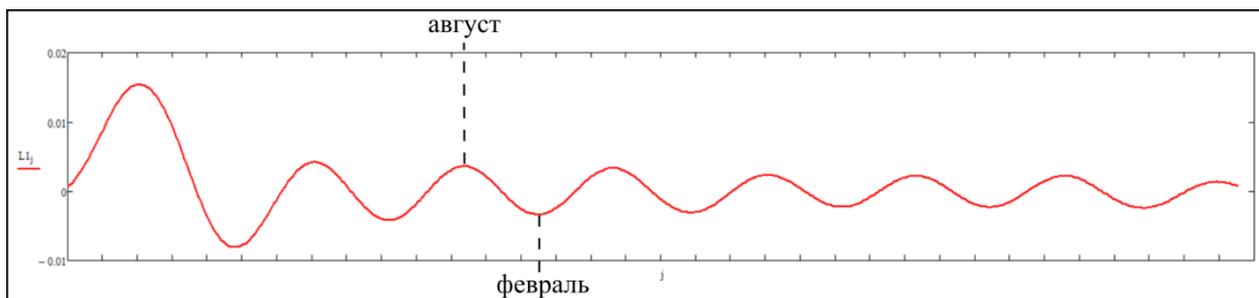


SBOR (высота), период 2014-2015 гг.

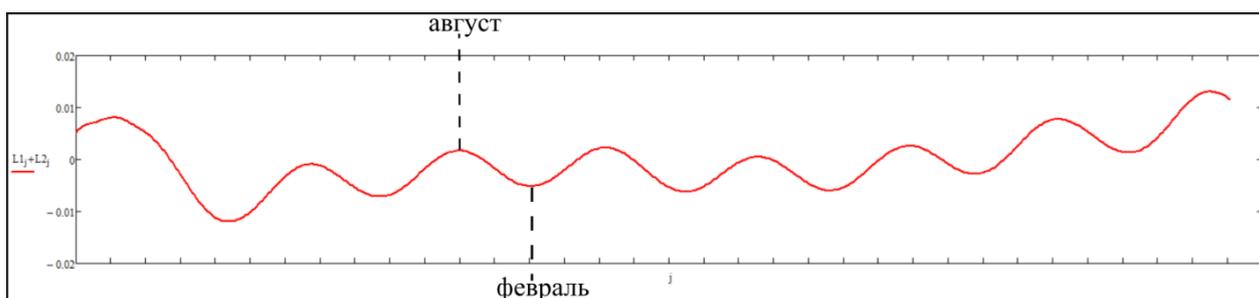


Приложение В. Анализ 12-месячных периодических компонент

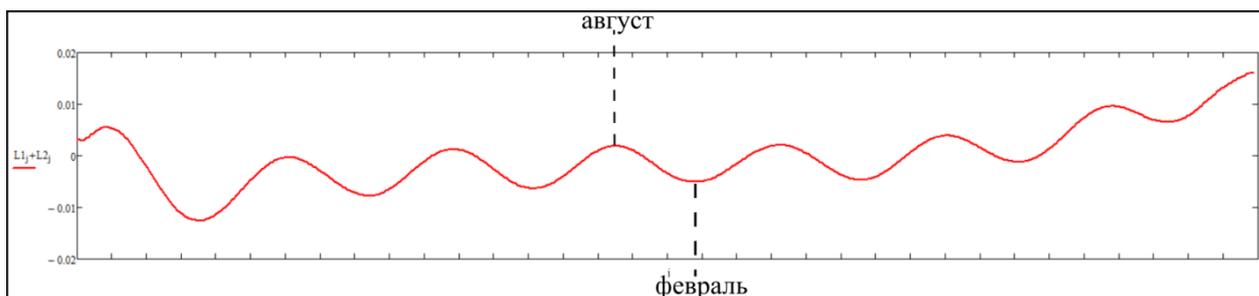
Анализ 12-месячной компоненты, высота, станция GORN



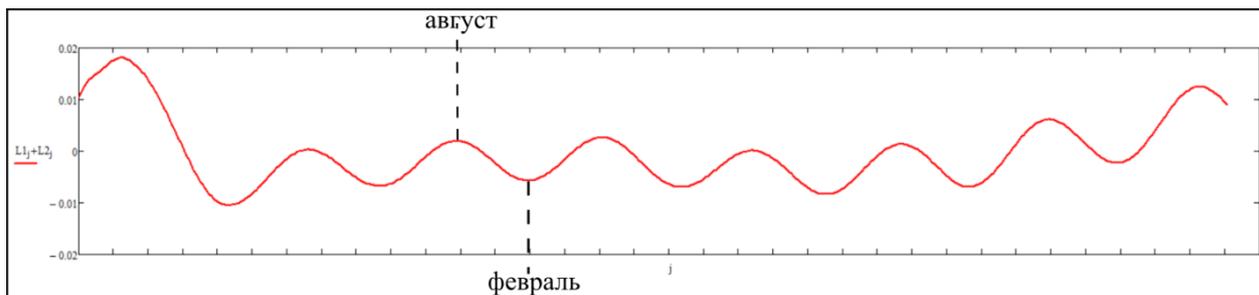
Анализ 12-месячной компоненты, высота, станция KRON



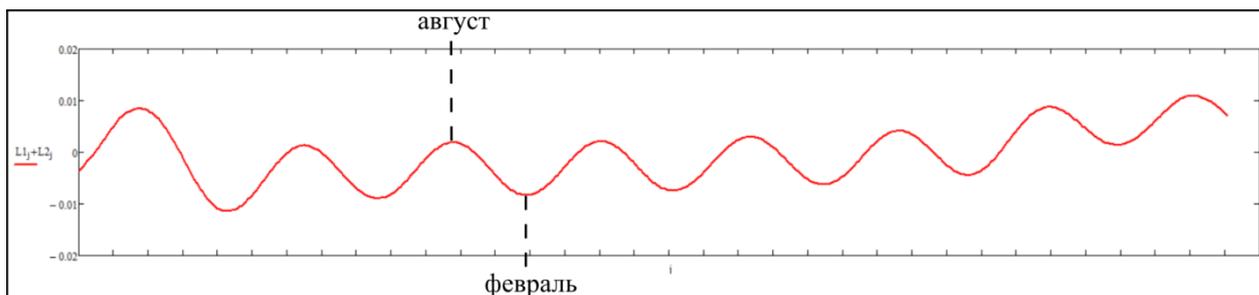
Анализ 12-месячной компоненты, высота, станция KUP2



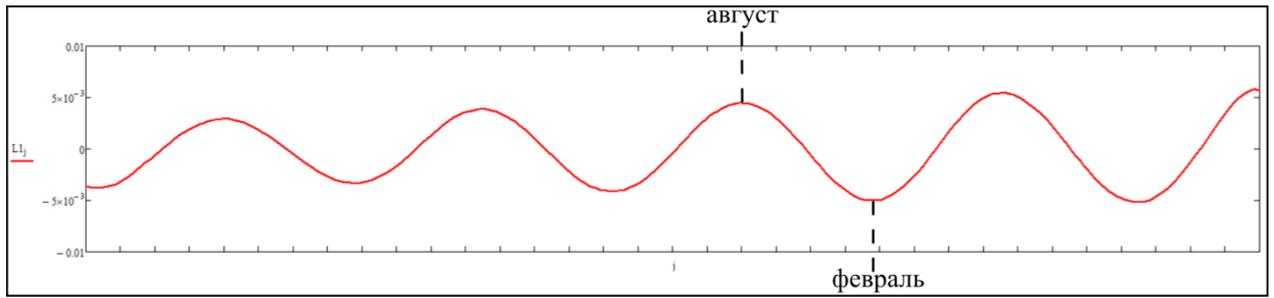
Анализ 12-месячной компоненты, высота, станция LOM2



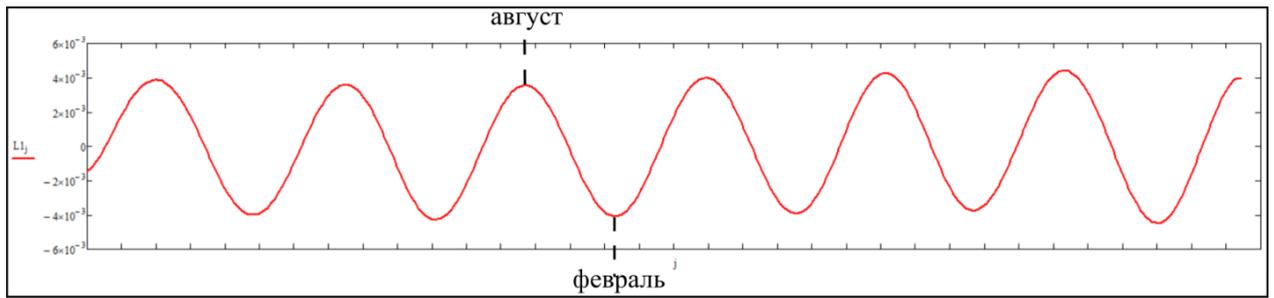
Анализ 12-месячной компоненты, высота, станция SEST



Анализ 12-месячной компоненты, высота, станция GU29



Анализ 12-месячной компоненты, высота, станция LMNS



Приложение С. Пример отчета онлайн-сервиса CSRS-PPP



CSRS-PPP 3.54.2 (2022-11-10)



78SP016a.200
78SP

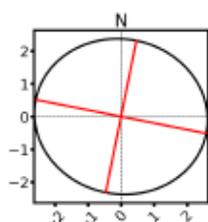
Data Start	Data End	Duration of Observations
2020-01-16 00:00:30.00	2020-01-20 23:59:30.00	4 days, 23:59:00
Processing Time		Product Type
17:08:29 UTC 2023/05/15		NRCan/IGS Final
Observations	Frequency	Mode
Phase and Code	Double	Static
Elevation Cut-Off	Rejected Epochs	Fixed Ambiguities
7.5 degrees	5.11 %	88.08 %
Antenna Model	APC to ARP	ARP to Marker
TPSPG_S1+GP NONE	L1 = 0.037 m L2 = 0.043 m	H:0.000m / E:0.000m / N:0.000m

(APC = antenna phase center; ARP = antenna reference point)

Estimated Position for 78SP016a.200

	Latitude (+n)	Longitude (+e)	Ell. Height
ITRF14 (2020.0)	60° 4' 10.49000"	30° 22' 26.24139"	57.474 m
Sigmas(95%)	0.002 m	0.002 m	0.006 m
A priori*	60° 4' 10.48887"	30° 22' 26.23723"	57.482 m
Estimated – A priori	0.035 m	0.064 m	-0.008 m

95% Error Ellipse (mm)
 semi-major: 3 mm
 semi-minor: 2 mm
 semi-major azimuth: -78° 19' 1.09"

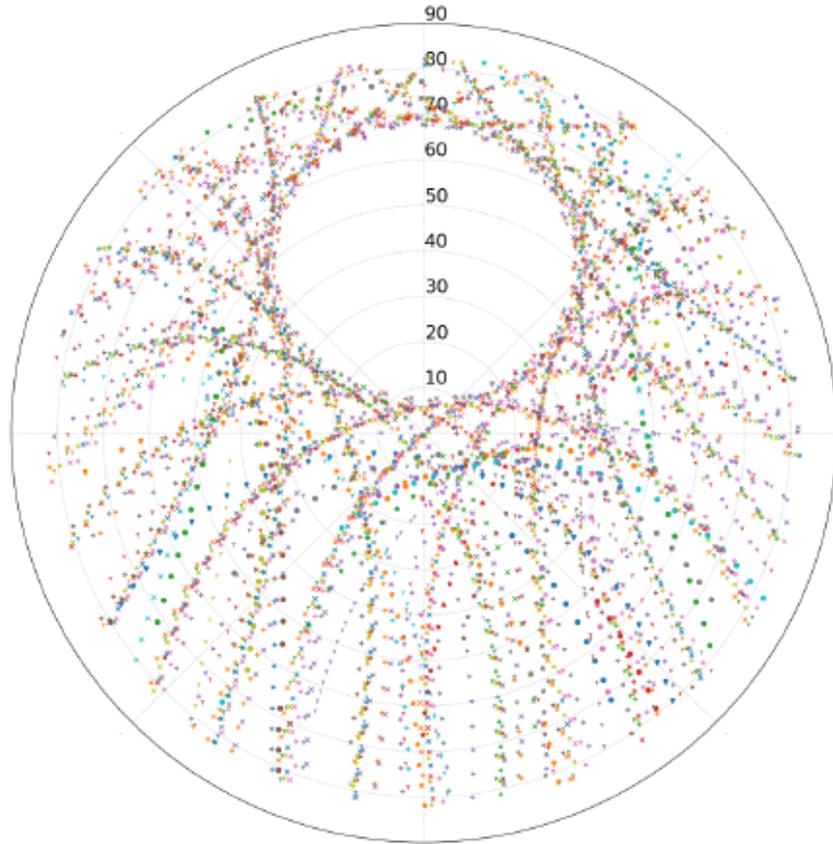


UTM (North)
Zone 36

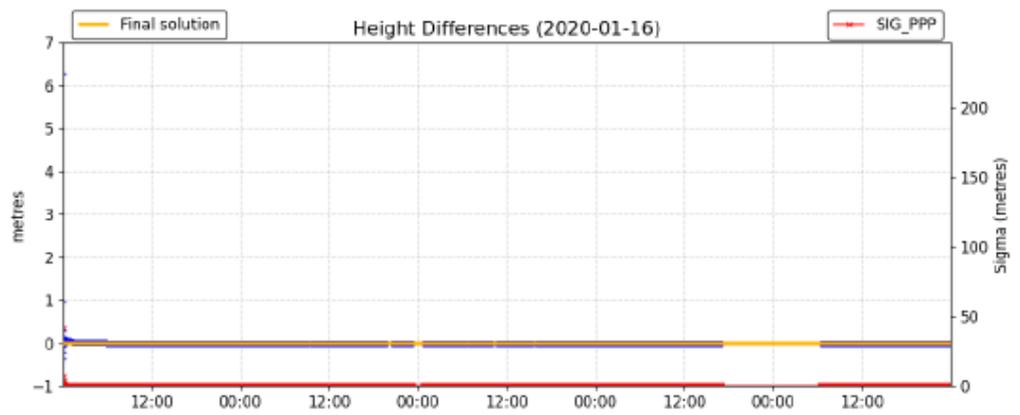
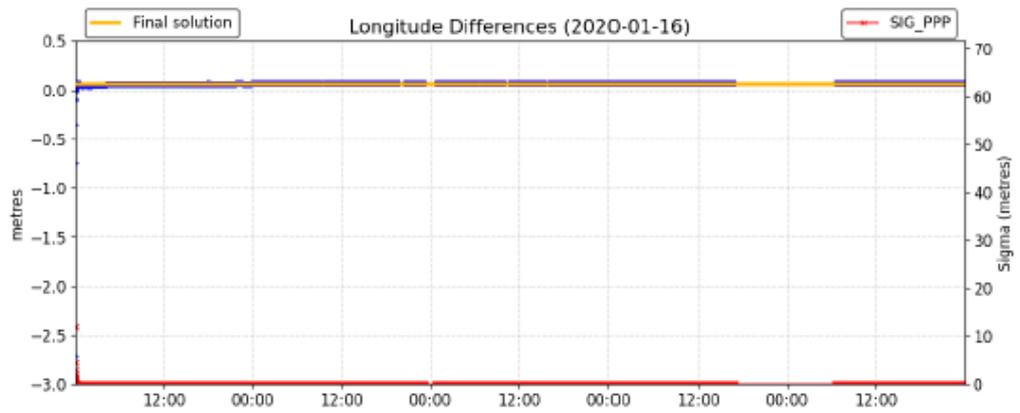
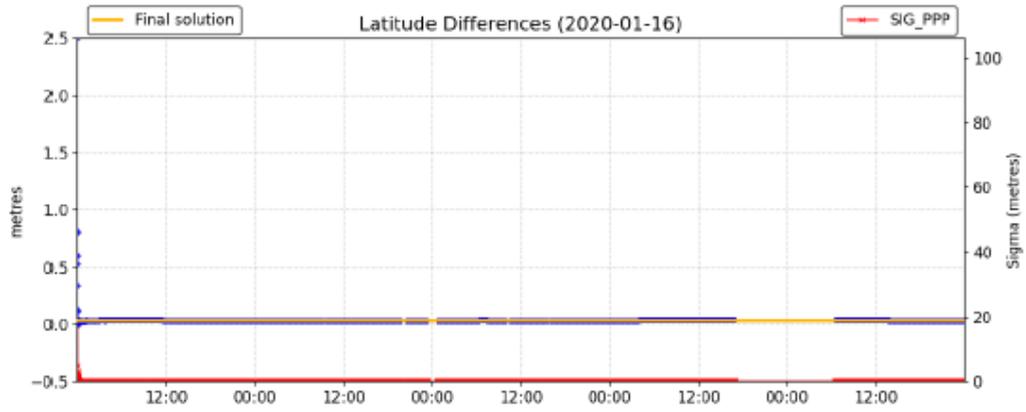
6662063.420 m (N)
 353858.727 m (E)
 Scale Factors
 0.99986173 (point)
 0.99985274 (combined)

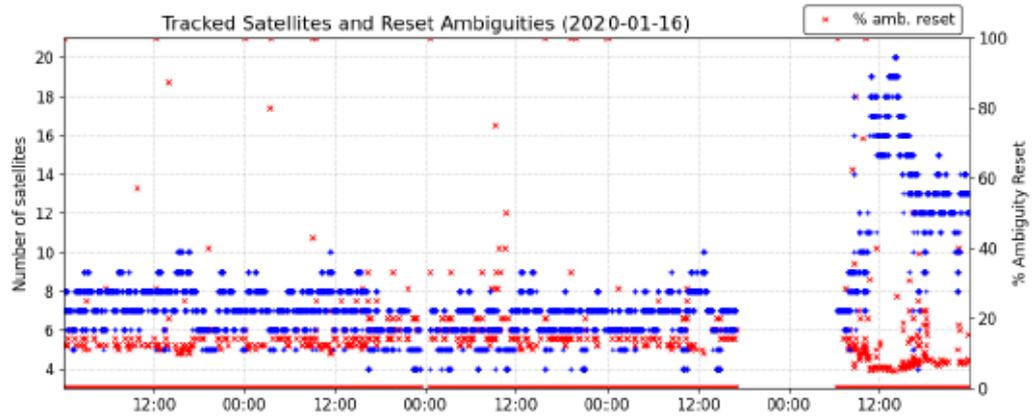
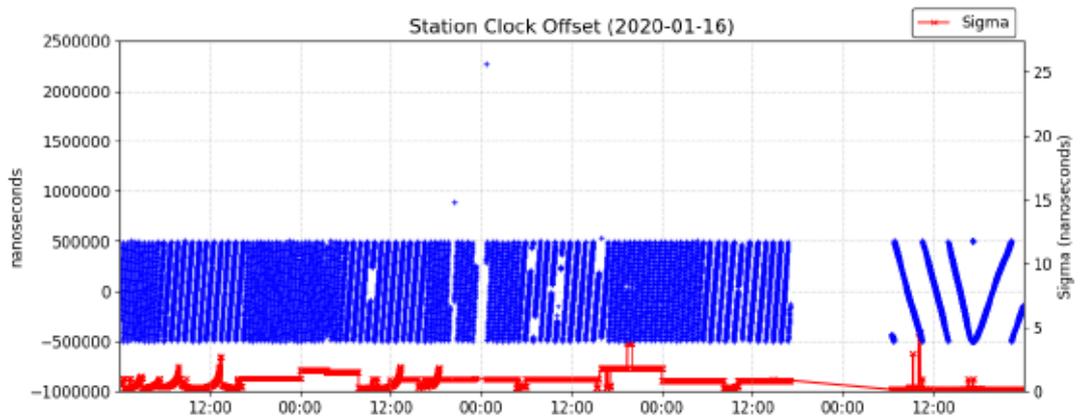
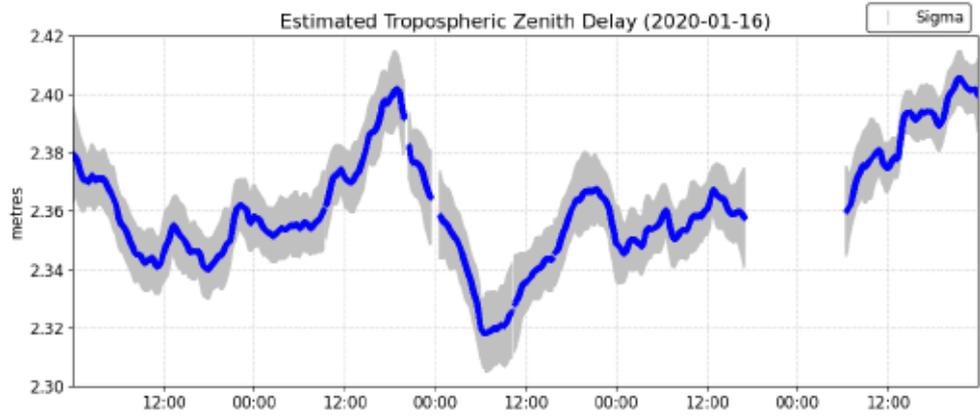
*(Coordinates from RINEX header used as a priori position)

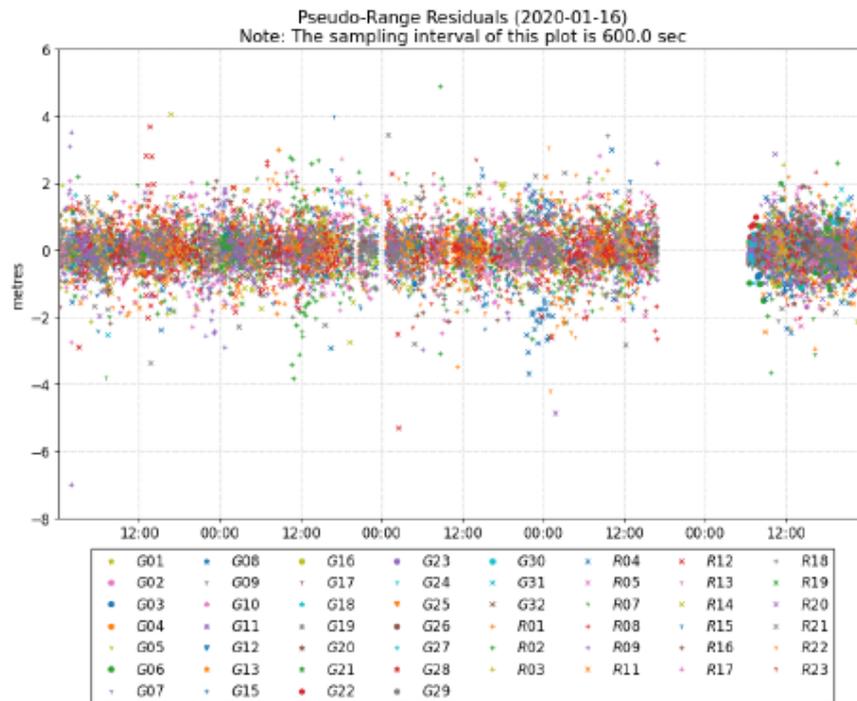
Satellite Sky Distribution
 Note: The sampling interval of this plot is 600.0 sec



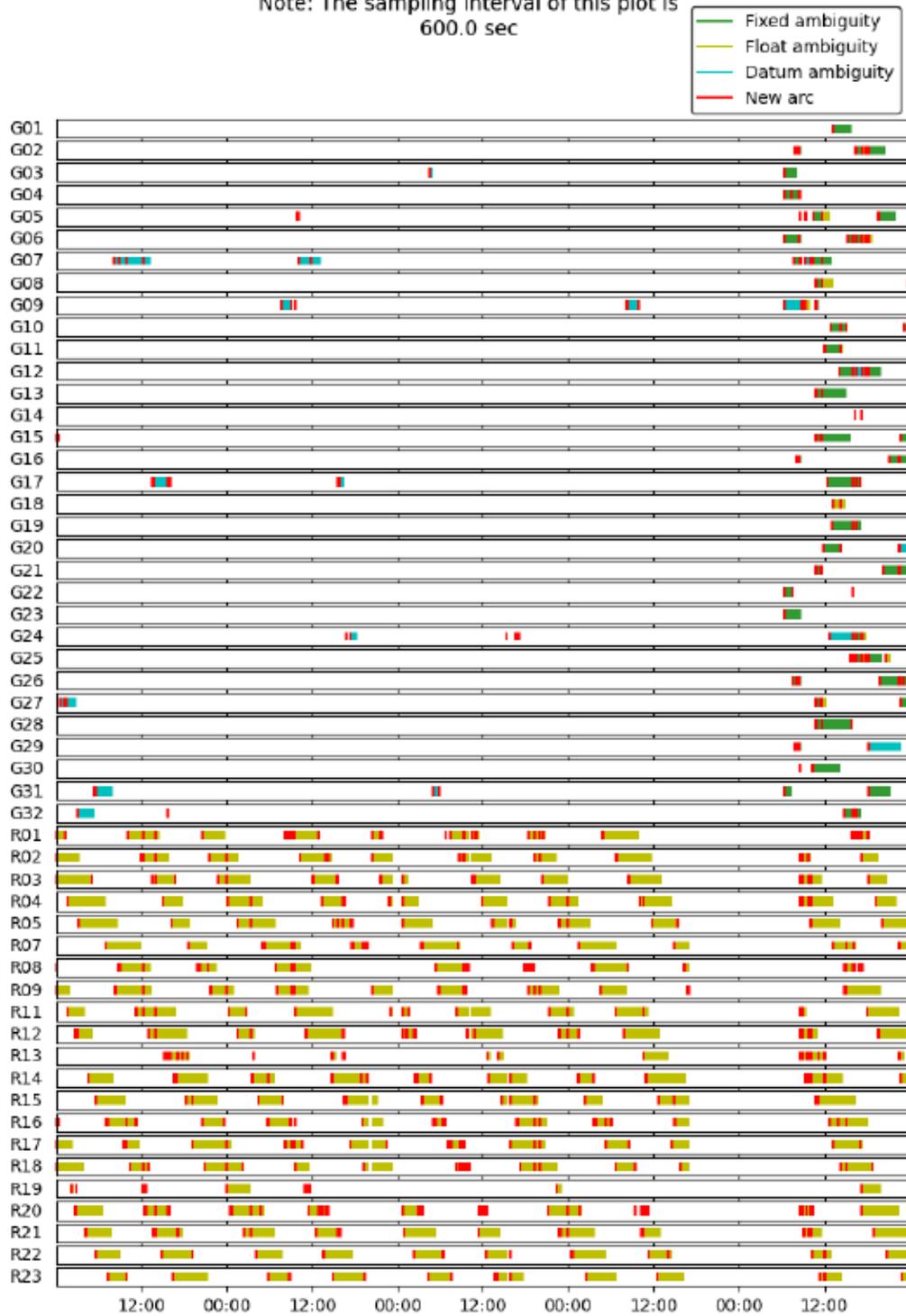
• G01	• G10	• G20	• G29	• R07	• R16
• G02	• G11	• G21	• G30	• R08	• R17
• G03	• G12	• G22	• G31	• R09	• R18
• G04	• G13	• G23	• G32	• R11	• R19
• G05	• G15	• G24	• R01	• R12	• R20
• G06	• G16	• G25	• R02	• R13	• R21
• G07	• G17	• G26	• R03	• R14	• R22
• G08	• G18	• G27	• R04	• R15	• R23
• G09	• G19	• G28	• R05		







Phase Ambiguity Status (2020-01-16)
 Note: The sampling interval of this plot is 600.0 sec



~~~~ Disclaimer ~~~~

Natural Resources Canada does not assume any liability deemed to have been caused directly or indirectly by any content of its CSRS-PPP online positioning service.

If you have any questions, please feel free to contact:

Geodetic Integrated Services  
Canadian Geodetic Survey  
Surveyor General Branch  
Natural Resources Canada  
Government of Canada  
588 Booth Street, Room 334  
Ottawa, Ontario K1A 0Y7  
Phone: 343-292-6617

Email: [geodeticinformation-informationgeodesique@nrcan-rncan.gc.ca](mailto:geodeticinformation-informationgeodesique@nrcan-rncan.gc.ca)



Natural Resources  
Canada

Ressources naturelles  
Canada

Canada