

Санкт-Петербургский государственный университет

***ИВАНОВА Виктория Витальевна***

**Выпускная квалификационная работа**

***Выявление и анализ длиннопериодических движений постоянно действующих базовых станций ГНСС***

Уровень образования: бакалавриат

Направление *05.03.03 «Картография и геоинформатика»*

Основная образовательная программа *СВ.5020 «Картография и геоинформатика»*

Научный руководитель:

доцент, кафедра картографии и  
геоинформатики, кандидат технических  
наук, Тюрин Сергей Вячеславович

Рецензент:

начальник отдела обеспечения сети  
референцных станций СПб ГКУ ЦИОГД,  
Флёров Даниил Геннадьевич

Санкт-Петербург

2021

## Содержание

Введение.....	3
Глава 1. Геодезический мониторинг с применением ГНСС-технологий .....	5
Глава 2. Обзор существующего программного обеспечения.....	9
Глава 3. Способы позиционирования.....	12
3.1. Абсолютный способ позиционирования .....	12
3.1.1. Метод PPP (Precise Point Positioning).....	13
3.2. Относительный способ позиционирования .....	16
Глава 4. Метод анализа временных рядов «Гусеница»-SSA.....	19
Глава 5. Анализ изменения положения референчных базовых станций. ....	25
5.1. Подготовка данных для исследования .....	26
5.2. Обработка данных методом PPP .....	27
5.3. Обработка данных относительным методом .....	29
5.4. Обработка временных рядов методом «Гусеница»-SSA .....	30
5.4.1. Анализ движений станций, метод PPP .....	31
5.4.2. Анализ движений станций, относительный метод.....	35
5.5. Обобщение результатов .....	39
Заключение.....	41
Список литературы.....	42
Приложение А.....	45
Приложение В.....	52
Приложение С.....	60

## Введение

В настоящее время широкий спектр геодезических работ, требующих высокоточного определения времени и местоположения, проводится с активным использованием ГНСС-технологий (англ. GNSS, Global Navigation Satellite System). Главным отличием данной технологии от классических методов является непрерывность измерений. Основное достоинство непрерывности заключается в возможности выявления различных периодик (в отличие от классических методов, которые не позволяют проводить измерения с необходимой частотой). Автоматизация процесса, сводящая к минимуму ошибки исполнителей, является еще одним достоинством применения ГНСС-технологий. Кроме того, использование данного метода позволяет значительно снизить зависимость проведения работ от погодных условий.

Современный этап характеризуется активным развитием геодезического мониторинга с применением ГНСС-технологий. Основные достоинства, в частности непрерывность измерений и автоматизация, позволили этому методу геодезического мониторинга получить широкое распространение и применение во многих отраслях промышленности, науки и строительства.

Актуальность работы: изучение движений постоянно действующих базовых станций ГНСС и выявление их причин помогает повысить точность геодезического мониторинга и его достоверность.

Цель работы: выявление и анализ длиннопериодических движений референчных базовых станций ГНСС.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить ряд задач:

- изучение существующих методов обработки спутниковых измерений, в частности метода PPP (Precise Point Positioning);
- изучение существующего программного обеспечения, освоение навыков работы с ними;
- изучение существующих методов для обработки временных рядов (в частности метода «Гусеница»-SSA);
- изучение сети базовых станций КГА СПб;
- подготовка данных из архивов сети референчных базовых станций ГНСС на территорию г. Санкт-Петербурга;
- обработка измерений с помощью различных программных комплексов;
- анализ движений станций ГНСС с выявлением длиннопериодических компонент.

Объект исследования – референчные базовые станции ГНСС, предмет исследования – положение референчных базовых станций ГНСС.

## Глава 1. Геодезический мониторинг с применением ГНСС-технологий

Мониторингом называют наблюдение за состоянием окружающей среды с целью ее контроля, прогноза и охраны (Большой энциклопедический словарь, 2000). Различают 3 уровня мониторинга:

- глобальный;
- региональный;
- локальный.

Использование мониторинга возможно для любых видов систем: природных, социальных и др. Выделяют следующие виды мониторинга:

- мониторинг земной поверхности (Антонович, Карпик, 2004):

Данный вид мониторинга включает в себя наблюдение за общеземной координатной системой ITRF (исследование движения тектонических плит, параметров ориентировки Земли и др.), мониторинг региональных сетей (размер 100-1000км), мониторинг локальных сетей (размер менее 100 км);

- мониторинг объектов:

Мониторинг объектов включает в себя наблюдение за состоянием и положением объектов (например, контроль транспортных средств, перемещение животных и др.) (Жуков, Карпик, 2006);

- мониторинг окружающей среды:

Данный тип мониторинга включает в себя 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, Jiang, 2019).

Основные требования, предъявляемые к геодезическому мониторингу, проводимому спутниковыми методами (Жуков, 2003):

- закрепленные на местности точки должны быть легко опознаваемы;
- закрепленные на местности точки должны быть удобны для центрировки приборов, используемых при проведении работ различными методами.

Для получения наилучших результатов при проведении геодезического мониторинга с помощью ГНСС-технологий важно закреплять точки в местах, где будут минимизированы помехи, создаваемые внешней средой.

Координаты могут быть получены абсолютным и относительным методами, для достижения наилучшей точности чаще всего используют метод статики.

Основные преимущества мониторинга с применением ГНСС-технологий:

- возможность выявления суточных и сезонных перемещений;
- высокий уровень автоматизации процесса, сведение к минимуму ошибок исполнителя;
- отсутствие зависимости проведения работ от погодных условий;
- непрерывность и долговременность наблюдений;
- высокий показатель производительности;
- возможность проведения наблюдений за движущимися объектами.

Однако данный метод имеет и ряд недостатков:

- дорогостоящее оборудование и программное обеспечение;
- необходимость расположения пунктов в местах с минимальными воздействиями окружающей среды;
- недостаточная для некоторых видов мониторинга точность.

При написании работы были изучены различные исследования и публикации в области геодезического мониторинга и ГНСС-технологий. В качестве материалов использовались научная литература, публикации из периодических изданий, учебно-методическая литература, сборники статей конференций и другое.

Одними из основных источников, используемых при написании работы 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». Авторы объясняют устройство спутниковых систем, методы наблюдений и основы обработки измерений.

В ходе написания работы использовались публикации из различных журналов: «Вестник СПбГУ», «Вестник СГУГиТ», «Геодезия и картография», «Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка», «Геофизические исследования», «Геопрофи», «The Journal of Global Positioning Systems», «Remote Sensing», «Journal of Geodesy» и др.

Публикации можно разделить на несколько групп:

- исследования, посвященные влиянию атмосферы на результаты спутниковых измерений и изучению атмосферы по этим измерениям (Антонович К.М. и др.; Куприянов А.О., Морозов Д.А.; Дударев В.И.; Вшивкова О.В.; Jitka Mučková, Rostislav Dandoš, Petr Jadvišček, Miroslav Konečný; Gu Shengfeng, Chunqi Dai,

Wentao Fang, Fu Zheng; Fangzhao Zhang, Jean-Pierre Barriot, Guochang Xu, Marania Noruare и др.);

- исследования, посвященные геодинاميке и геодезическому мониторингу с использованием ГНСС-технологий (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.);
- исследование и использование референчных станций (Антонович К.М.; Богданец Е.С.; Черемухина О.О.; A. Mémin, C. Watson и др.; Yanming Feng, Shengfeng Gu и др.);
- исследования, посвященные 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.);
- исследования метода точного абсолютного позиционирования PPP (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.);
- исследования методов ГНСС для создания сетей координат (Демьянов Г.В. и др.; Побединский Г.Г.; Шульц Р.В., Терещук А.И. и др; J. Yu, G. Wang; S. Glasser, R. König и др.);
- программное обеспечение для спутниковых измерений (Грохольский Д.В.; Шевчук С.О., Малютина К.И., Липатников Л.А. и др.);
- исследования применения ГНСС в различных отраслях (Валеев С.Г.; Мысленков С.А., Самсонов Т.Е.; F. Fund, F. Perosanz и др.).

Геодезический мониторинг с применением ГНСС-технологий активно исследуется отечественными и зарубежными авторами. Для многих крупных объектов, требующих непрерывного наблюдения, мониторинг с использованием спутниковых технологий является крайне актуальным. Например, в работе Шульца Р.В., Анненкова А.А. и Куличенко Н.В. приводятся результаты геодезического мониторинга высотного здания (Шульц, Анненков, 2016). Для определения его крена используются ГНСС-технологии. Кроме того, исследуется температурное влияние на конструкции самого здания.

Развитие ГНСС-технологий послужило стартом для активных исследований в области геодинамики. Это связано с возможностью получения высокоточных горизонтальных и вертикальных компонент смещения исследуемых пунктов при долговременном определении координат опорных точек. Горшков В.Л. и Щербакова Н.В. в своих работах (Горшков, Мохнаткин, 2015) описывают исследования на территории бассейна Финского залива Балтийского моря. Для исследования геодинамики региона были использованы наблюдения за период с 1993 по 2014 год на 27 постоянно действующих станциях. Ряды положений станций вычислялись с помощью пакета GIPSY с использованием метода PPP и исправлялись за нагрузочные эффекты атмосферы. По полученным рядам вычислялось поле скоростей станций, используемое для оценки поля деформаций региона. В результате, полученные векторы скоростей показали локальный поворот Балтийского щита в направлении против часовой стрелки относительно Восточно-Европейской платформы.

В работе Гусевой Т.В., Крупенниковой И.С., Мокровой А.Н., Передерина В.П., Розенберга Н. К (Гусева, Крупенникова, 2020) анализируются результаты наблюдений за период 2006-2018 гг. Обработка данных производилась с помощью программного комплекса Bernese. Результаты показали сводообразное поднятие, приуроченное к Балтийскому щиту, и движения пунктов ГНСС в северо-восточном направлении.



## Глава 2. Обзор существующего программного обеспечения

В настоящее время происходит активная разработка и усовершенствование различных программ для обработки спутниковых измерений.

Широкий спектр существующего программного обеспечения можно разделить на следующие категории (Малютина, Шевчук, 2017):

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

Коммерческое ПО создается для обработки измерений, выполняемых приемниками определенного производителя. Последующая обработка в других программных обеспечениях или обработка данных, полученных с приемников других производителей, производится с использованием международного универсального формата RINEX. Внутренние математические алгоритмы таких программ скрыты от пользователей и защищаются авторским правом.

К данной категории относятся следующие программы:

- 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).

Некоммерческое ПО в настоящее время активно развивается и распространяется. Рынок предлагает все больше бесплатных программ с открытым исходным кодом и возможностью его редактирования. Зачастую функционал таких программ соответствует коммерческому ПО или, для удобства использования, является несколько упрощенным. Данные ПО реализуют функции без привязки к внутренним форматам производителей. В своем большинстве некоммерческие программы разрабатываются научно-исследовательскими и образовательными организациями и финансируются за счет грантов и внешних инвестиций.

Примеры некоммерческих программ:

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

Научные ПО часто могут иметь открытые математические алгоритмы, доступные для модифицирования пользователем. Распространение программ данной категории может быть как бесплатным, так и коммерческим. Данные ПО разрабатываются в научных учреждениях или учебных заведениях. Научные программы не рассчитаны на неподготовленного пользователя из-за сложного интерфейса и расширенного функционала, предназначенного для решения нетипичных и трудных 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 в себе возможности научного ПО и доступность и простоту решений, характерные для коммерческого ПО, и позволяют пользователю производить обработку измерений в режиме онлайн через Всемирную сеть (Терещенко, Лагутина, 2019).

Обработка измерений на online-сервисах локального охвата основана на относительном методе и использует данные ГНСС-измерений, которые получены от сетей референциальных базовых станций. Такой тип обработки ограничивает территорию функционирования зоной покрытия используемой сети.

Примерами online-сервисов локального охвата 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).

Сервисы глобального охвата используют метод PPP, определение координат происходит с применением апостериорно уточненной эфемеридно-временной информации. Кроме того, данная методика позволяет определить местоположение точки без привязки к наземной координатной основе.

К данной категории 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).

Активное развитие и доступность для пользователей некоммерческих программ и бесплатных online-сервисов позволяет уменьшить затраты при выполнении геодезических работ.

В данной работе использовались программный продукт Magnet Tools, online-сервис CSRS-PPP для обработки по методу PPP и online-сервис AUSPOS для обработки в относительном режиме.

### Глава 3. Способы позиционирования

Определение координат точек возможно с помощью абсолютных и относительных методов. В первом случае приемник определяет свои координаты независимо от других приемников. Суть второго метода заключается в использовании не менее чем двух приемников, один из которых установлен на опорном пункте с известными координатами, а второй на определяемом пункте.

Общая схема деления способов позиционирования (Серапинас, 2002):

- абсолютные методы:
  - автономные;
  - дифференциальные (поправки к параметрам наблюдений для неизвестного пункта формируются по результатам наблюдений на опорном пункте);
- относительные методы:
  - статические (измерения выполняются одновременно между двумя или более неподвижными приемниками продолжительный период времени);
  - кинематические (один из приемник находится в движении, другой закреплен на опорном пункте).

Выбор используемого метода зависит от многих факторов, например, целей проведения работ, технической оснащенности, необходимой точности и др.

#### 3.1. АБСОЛЮТНЫЙ СПОСОБ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Специфика абсолютного способа позиционирования заключается в определении положения пункта независимо от измерений на других станциях.

Механизм измерения следующий: на спутнике и на приемнике формируется псевдослучайный кодовый сигнал, который в заданные промежутки времени с разных спутников в форме электромагнитной волны отправляется на землю. При поступлении на антенну приемника программа фиксирует время прихода и определяет время отправления, затем расстояние рассчитывается по скорости прохождения сигнала. Главные условия – синхронизация атомных часов на спутнике и наличие поступления на антенну сигнала не менее чем от четырех спутников. Способ не может гарантировать точность лучше 5-10 метров. Это связано с возникновением ошибок их-за асинхронности часов, задержки движения волны, нестабильных условий приема на антенне. Основным преимуществом способа является быстрота получения данных.

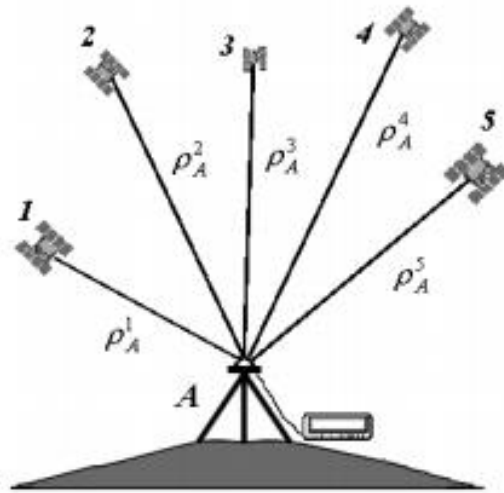


Рис 1. Абсолютный способ спутникового позиционирования (Антонович, 2006)

Основной параметр, по которому находят координаты – 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 относится к пункту наблюдения, индекс  $i$  – к спутнику. Параметры уравнения:  $\rho_A^i$  – геометрическая дальность (расстояние между спутником в момент выхода сигнала и приемником 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 (сигналы достигают приемника не только по прямому пути, но и по ломаному, образуемому из-за отражений сигнала от различных объектов),  $e_A^i$  – случайная ошибка измерений,  $c$  – скорость распространения радиоволн в вакууме.

В настоящее время самыми развивающимися и распространенными методами являются дифференциальный и метод PPP.

### 3.1.1. МЕТОД PPP (PRECISE POINT POSITIONING)

Метод PPP – точное абсолютное позиционирование - метод высокоточных координатных определений (Трофимов, 2019). Данный метод позволяет определять координаты с точностью от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров в зависимости от продолжительности сеанса наблюдений.

Существует ряд факторов, влияющих на увеличение погрешностей в определении координат: неточность эфемеридно-временной информации, плохой учет ионосферной и тропосферной рефракций. В связи с тем, что при использовании метода PPP отсутствует базовая станция, обработка данным способом требует использования точной эфемеридно-временной информации и моделей факторов, которые влияют на распространение сигналов.

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

Для повышения точности определения псевдодальностей необходимо использование приемников, которые способны проводить фазовые измерения и измерения на двух частотах любой из используемых систем. Однако при этом возникает проблема разрешения целочисленной неоднозначности, с чем связана сложность практического применения метода PPP из-за трудности реализации математических алгоритмов.

Следующий шаг – повышение точности определения координат спутника. При использовании бортовых эфемерид, дающих точность порядка 1 м, и бортовых поправок часов спутников с точностью около 2,5 нс возможности приемной аппаратуры становятся бесполезными. В связи с этим для получения координат необходимо использовать высокоточные эфемериды, предоставляемые центрами обработки и Международной ГНСС службой. Итоговые (final) 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 сервера IGS, который получает эту информацию по результатам обработки совместных измерений более чем с 400 базовых станций на всему миру (Шевчук, Мелеск, 2016; Kouba, Heouх, 2001).

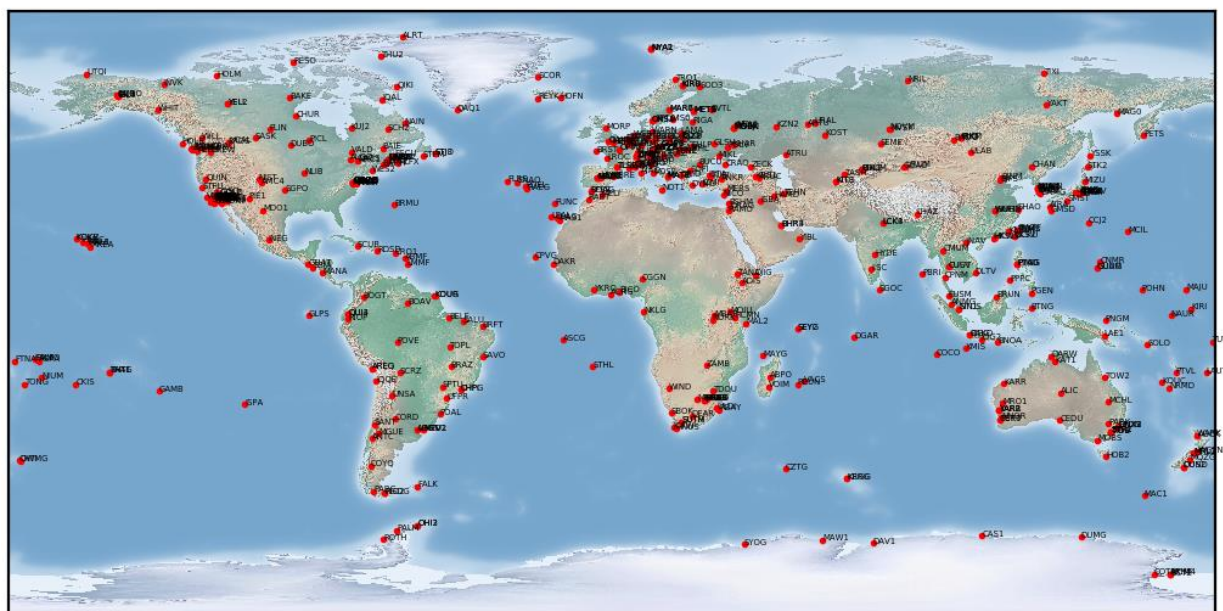


Рис.2. Расположение станций IGS

Для учета задержки в ионосфере используется либо двухчастотность наблюдений, либо дополнительная информация о состоянии атмосферы. Наиболее распространенный

способ – использование ионосферных карт в формате IONEX. Определенная по данной карте концентрация электронов в ионосфере позволяет вычислять задержку сигнала на интересующих частотах и корректировать псевдодальность. Задержка из-за влияния тропосферы определяется из наблюдений или с использованием модели Саастомойнена и картирующих функций.

Псевдодальность определяется по измерениям фазы несущего сигнала:

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

В данном уравнении  $\Phi_A^i(t)$  – 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,  $\lambda$  – длина волны,  $\rho_A^i(t)$  – геометрическая дальность,  $N_A^i$  – целочисленная неоднозначность фазы.

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

Однако у метода существует и ряд недостатков:

- отсутствие мгновенной доступности точной эфемеридно-временной информации. 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 20.02.2021);

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

- для получения точных координат необходимо длительное измерение, не менее 30 минут;
- чувствительность к срывам измерения фазы (Шевчук, Мелеск, 2016);
- необходимо наличие дорогостоящего оборудования, которое поддерживает фазовые и двухчастотные измерения.

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

Около 10 лет назад были разработаны методы устранения неоднозначности в стратегии PPP. Данный метод получил название PPP-AR (PPP with ambiguity resolution). Исследования в этой области показали улучшение долготной составляющей на 30%, улучшение оценки стабильности часов приемника и уменьшение ошибок в атмосферных задержках. Разрешение неоднозначности позволяет значительно повысить точность коротких сеансов наблюдения, что особенно полезно для полевых исследований во многих отраслях.

В настоящее время существует немало аналитических центров IGS, производящих продукты, обеспечивающих 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).

### 3.2. ОТНОСИТЕЛЬНЫЙ СПОСОБ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Суть относительного режима определения координат – использование одновременно нескольких приемников, из которых как минимум один расположен на пункте с известными координатами. Данная стратегия направлена на вычисление вектора между двумя точками – базовой линии. На двух станциях, входящих в состав базовой линии, проводят одновременные наблюдения одних и тех же спутников. По результатам измерений получают координаты одной из станций относительно другой, которая находится на пункте с известными координатами. Иначе говоря, получают компоненты вектора базовой линии (Курошев, 2011).

Если А является известной точкой, В – определяемой точкой, то  $D_{AB}$  – 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:

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



Предполагая, что на двух пунктах А и В производятся одновременные измерения, можно составить линейные комбинации, приводящие к одинарным, двойным и тройным разностям (Антонович, 2006).

- Одинарные разности образуются между измерениями, сделанными одновременно с одного пункта на два спутника или с двух пунктов на один спутник.

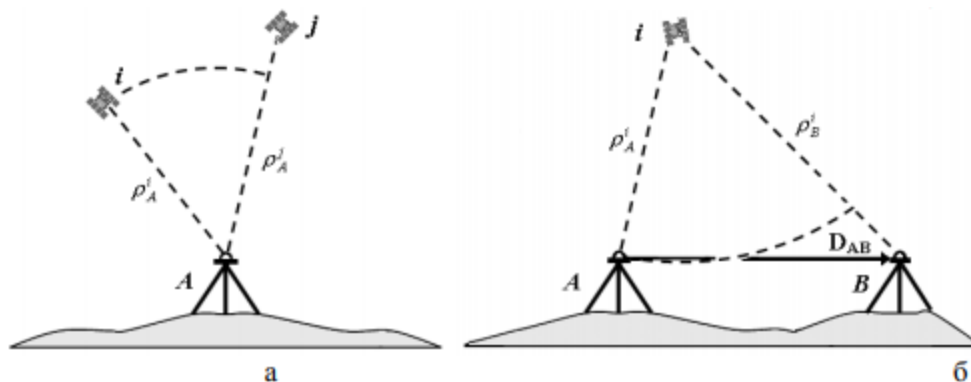


Рис 3. Одинарные разности: между спутниками (а), между станциями (б)  
(Антонович, 2006)

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 данной одинарной разности исключаются поправки часов спутника, запаздывания в аппаратуре спутника и влияние начальной фазы генератора спутника. В случае если линии не слишком длинные, ослабляется влияние тропосферы и ионосферы, а также влияние ошибок эфемерид, но возрастает шум.

- Двойные разности образуются между двумя приемниками, одновременно наблюдающие два спутника.

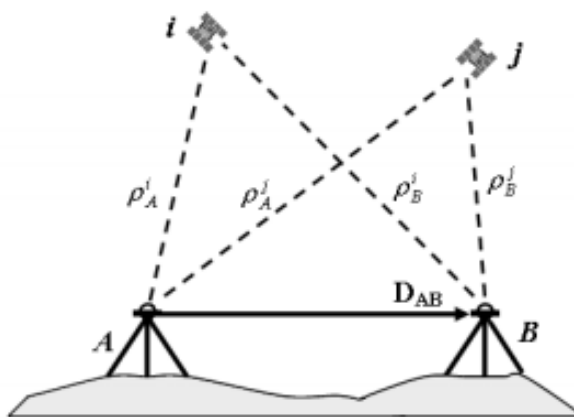


Рис 4. Двойные разности (Антонович, 2006)

Уравнение выглядит следующим образом:

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

В двойных разностях исключаются ошибки часов приемника и все ошибки, которые исключены в одинарных разностях. Продолжает ослабевать влияние тропосферы и ионосферы, шум измерений растет.

- Тройные разности образуются при одновременном наблюдении двух спутников с двух станций в две эпохи.

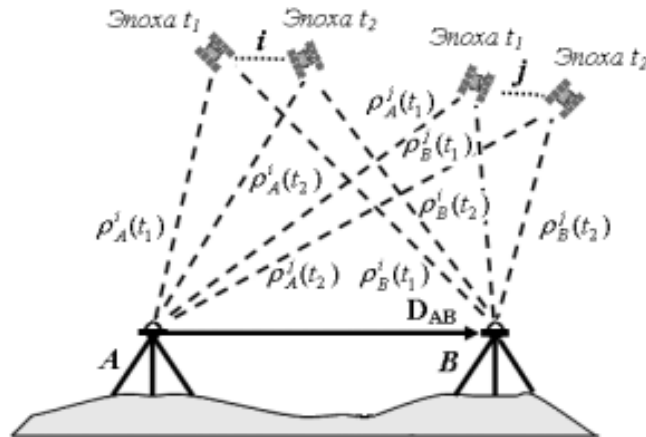


Рис 5. Тройные разности (Антонович, 2006)

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

Приемники, один из которых расположен на станции с известными координатами, а другой на станции с определяемыми координатами, производят одновременные наблюдения. В результате получается вектор, соединяющий две станции.

- кинематическое позиционирование

Один из приемников, расположенный на точке с известными координатами, является стационарным, второй приемник является мобильным, его положение определяется в произвольные эпохи.

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

Результатом обработки спутниковых измерений являются временные ряды. Для дальнейших исследований применяют математические алгоритмы анализа временных рядов.

Одним из методов, используемых для выявления тренда и шума, является активно развивающийся метод «Гусеница» или SSA (Singular Spectrum Analysis). Данный алгоритм разрабатывается независимо в России и в Великобритании. В России метод «Гусеница»-SSA исследуется в Санкт-Петербургском государственном университете Голяндиной Н.Э. и другими учеными (Голяндина, 2004; Главные компоненты..., 1997).

Метод «Гусеница»-SSA является удобным инструментом, который применяется во многих отраслях науки и техники, включая геодезию (Ху, Уен, 2015).

Согласно теории (Голяндина, 2004), базовый алгоритм состоит из следующих этапов:

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

Все приведенные ниже формулы и понятия базируются на учебном пособии Н.Э.Голяндиной (Голяндина, 2004).

Рассмотрим вещественный временной ряд  $F = (f_0, \dots, f_{N-1})$ ,  $N > 2$  – длина ряда. Данный ряд является ненулевым, т.е. существует хотя бы один отличный от нуля член ряда. Чаще всего считается  $f_i = f(i\Delta)$  для функции  $f(t)$ , где  $t$  – время, а  $\Delta$  – интервал времени.

### Шаг 1. Вложение

На данном этапе временной ряд переводится в последовательность многомерных векторов. Для анализа временного ряда выбирается целый параметр  $L$  – длина окна,  $1 < L < N$ . В результате 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, то есть она имеет равные элементы на всех диагоналях, перпендикулярных главной.

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

На данном шаге матрица  $X$  преобразуется в сумму элементарных матриц.

Пусть  $S = XX^T$ ,  $\lambda_1, \dots, \lambda_L$  – собственные числа матрицы  $S$ , взятые 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 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.

После разложения все множество индексов  $\{1, \dots, d\}$  процедурой группировки разбивается 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:

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

Аналогично 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.

На данном этапе создаются новые ряды 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  $y_{ij}^* = y_{ji}$ .

Применив диагональное усреднение 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:

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

Длина окна  $L$  является важнейшим параметром работы алгоритма «Гусеница». Неправильный выбор данного параметра может повлечь за собой невозможность подбора группировки для разложения ряда на составляющие. Выбор длины окна должен базироваться на характеристиках ряда, его особенностях и предварительных свойствах, требованиях к задаче и др.

Суммирующих правил, определяющих выбор окна для всех возможных вариантов временных рядов, не существует, однако определены общие принципы выбора длины окна  $L$  (Голяндина, 2004):

- для проведения процедуры анализа временного ряда следует брать длину окна, не превышающую половину длины ряда;
- по мере увеличения длины окна увеличивается детальность разложения исходного ряда. Наиболее детальное разложение получается при длине окна, равной половине длины ряда;
- для достижения лучшей делимости следует выбирать большую длину окна, так как малая длина может повлечь смешение интерпретируемых компонент ряда;
- при большой длине окна результаты делимости устойчивы к небольшим изменениям  $L$ ;
- если ряд имеет сложную структуру, то выбор слишком большой длины окна может привести к неправильному разложению компонент;
- малейшие изменения длины  $L$  может привести к лучшему разделению компонент.

Из-за связи между длиной окна  $L$  и величиной периода, выбор длины окна при выделении периодической компоненты  $F^{(1)}$  имеет особенности (Голяндина, 2004):

- 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;
- для коротких рядов стоит учитывать условия точной делимости. Например, если ряд имеет компоненту с известным периодом, то рекомендуется брать длину окна пропорциональной величине периода;
- для длинных рядов стоит брать длину окна как можно большей.

Еще один параметр метода «Гусеница»-SSA является структурным - способ группировки собственных троек. Процесс группировки заключается в исследовании собственного и факторного векторов  $U_i, V_i$  и собственных чисел  $\lambda_i$ .

Каждый элемент матрицы характеризуется собственной тройкой. Общие правила группировки (Голяндина, 2004):

- при восстановлении компоненты ряда только с помощью одной собственной тройки и при условии общей формы собственного и факторного векторов, восстановленная компонента имеет примерно такую же форму;
- при  $L \ll K$  факторный вектор в собственной тройке имеет большую схожесть с восстановленной компонентой, чем собственный;
- чем больше сингулярное значение в собственной тройке, тем больше вклад соответствующей восстановленной компоненты.

При исследовании временных рядов с помощью алгоритма «Гусеница»-SSA шум состоит из собственных троек, которые не содержат периодик и трендов. Определены общие принципы работы с шумовыми компонентами (Голяндина, 2004):

- часто возникающий эффект пересечения диапазонов сигнала и шума связан с включением гармонических компонент сигнала в шумовую составляющую, следствием этого является содержание шума в восстановленной по собственным тройкам компоненте;
- по причине малых амплитуд гармонических колебаний и большого шума в некоторых случаях гармонические компоненты не отделяются от шума, эффект исчезает при  $N \rightarrow \infty$ ;
- в случае больших значений  $K, L$  и  $N$  сингулярное разложение матрицы чистого шума будет содержать несколько собственных троек, схожих с гармониками, компоненты восстановления будут напоминать гармоники.

Алгоритм «Гусеница»-SSA был реализован в программном комплексе MathCAD 14.

Программа с помощью встроенной функции запрашивает файл формата .txt, который содержит временные ряды, затем, с помощью векторов преобразованного центрированного ряда с параметром длины окна  $L$  задается траекторная матрица. Длина окна  $L$  задается равной половине длины ряда. Ниже представлены фрагмент ряда данных после центрирования ( $dr$ ) и фрагмент траекторной матрицы ( $X$ ).

	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.6. Фрагмент ряда данных после центрирования и фрагмент траекторной матрицы

Затем вычисляются вектора собственных чисел  $\lambda$  и матрицы собственных и факторных векторов  $U, V$ . При условии равенства длины окна половине ряда матрицы будут одинаковы.

Затем находятся компоненты сингулярного разложения. В результате образуются пять матриц. Путем усреднения по антидиагоналям происходит восстановление пяти компонент.

	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.7. Восстановление пяти компонент

На рисунке 8 представлен вид данных компонент.

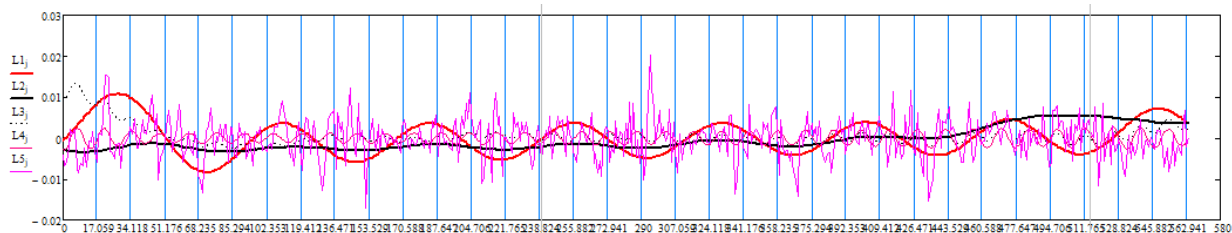


Рис.8. График компонент  $L1, L2, L3, L4, L5$

Компоненты  $L1, L2, L3$  и  $L4$  отражают периодические составляющие, компонента  $L5$  – остаточный шум. Наибольшей достоверностью обладают центральные части рядов в связи с тем, что элементы рядов получают усреднением по антидиагоналям.

Графики ковариационных матриц имеют затухающий вид, исходя из этого можно сделать вывод, что выделенный шум является близким к белому. Согласно работе Горшкова В.Л. шумы спутниковых измерений близки к фликер-шумам или являются промежуточными между белым и розовым шумами (Горшков, Щербакова, 2012).

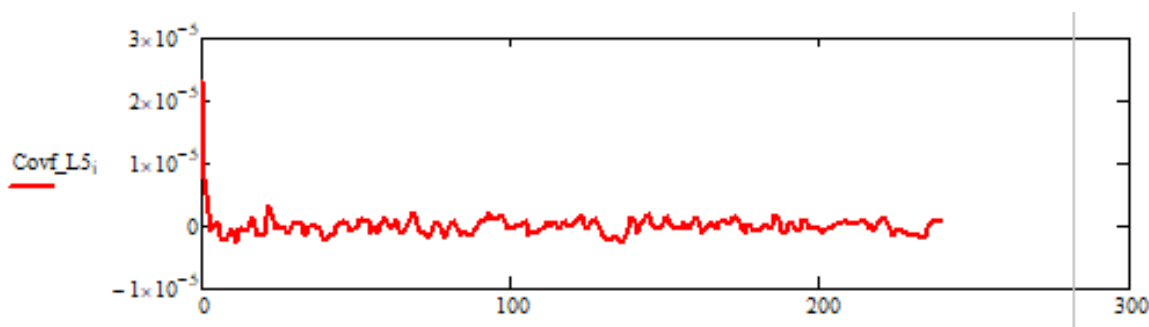


Рис.9. График ковариационной матрицы

Зашумленный график функции выглядит следующим образом:

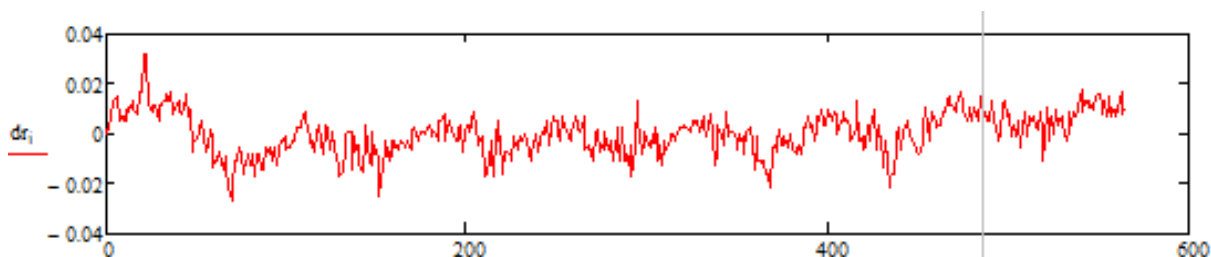


Рис.10. График функции с шумовой составляющей

Метод «Гусеница»-SSA является удобным инструментом для анализа, прогноза временных рядов и их разбиения на аддитивные составляющие. Одним из достоинств метода является отсутствие строгой необходимости наличия сведений о особенностях, характеристиках и структуре ряда. Однако, полученные результаты не дают объяснений причин возникновения компонент.



## **Глава 5. Анализ изменения положения референчных базовых станций.**

Для анализа длиннопериодических движений станций использовались данные, полученные с сети референчных станций Комитета по градостроительству и архитектуре г. Санкт-Петербург (сеть РС СПб).

Данная сеть состоит из постоянно действующих станций, местоположение которых с высокой точностью определяется с помощью ГНСС-технологий. В связи с тем, что на станциях непрерывно проводятся круглосуточные наблюдения, станции расположены в местах, где отсутствуют или минимизированы воздействия внешних факторов.

Референчная станция – это аппаратно-программный комплекс, служащий для выполнения измерений и определения положения. Станция состоит из приемника, фиксированной в пространстве антенны, источника питания и средств связи.

Пункты сети РС СПб были закреплены специальными центрами на крышах зданий по возможности на капитальной стене. Создание пунктов проводилось в 2010-2013 гг. по специальному проекту, в котором были учтены вопросы пригодности зданий для выполнения долговременных измерений, особенности закрепления центров, размещения приемной аппаратуры и условия проведения наблюдений с минимальными воздействиями внешних факторов.

Для определения координат использовались трехсуточные наблюдения на базовых станциях и пунктах IGS (SVTL, ZWE2, RIGA, JOEN, MOBN, MDVJ) в период с 22.05.2013 г. по 24.05.2013г.

Принцип высокой однородной точности городской геодезической основы, позволяющий минимизировать погрешности для взаимного положения пар пунктов, реализовывался с помощью построения трехступенчатой сети:

- сеть референчных станций;
- каркасная сеть;
- спутниковая геодезическая сеть 1 класса.

Обработка результатов выполнялась с использованием современных ЭВМ, способных реализовать многосеансные варианты обработки, в 2 этапа:

- производилось свободное уравнивание с фиксированием в геоцентрической системе координат;
- параллельным переносом свободной сети достигались наименьшие невязки пунктов относительно пунктов IGS.

После обработки невязки не превосходили 3 мм в плане и 7 мм по высоте. Координаты определялись в виде прямоугольных пространственных координат в геоцентрической Международной системе координат ITRF-2008 на эпоху 23.05.2013г.

Для вычисления геодезических координат и высот в качестве отсчета был принят общеземной эллипсоид WGS-84. Для контроля результатов использовался метод точного позиционирования PPP.

Координаты пунктов были получены относительно пунктов IGS с погрешностью менее 1 см.

Сеть станций устанавливает на территорию города и окрестностей высокоточное координатное пространство, которое связано с единой государственной системой координат СК-95 посредством каркасной сети и сети СГГС-1.

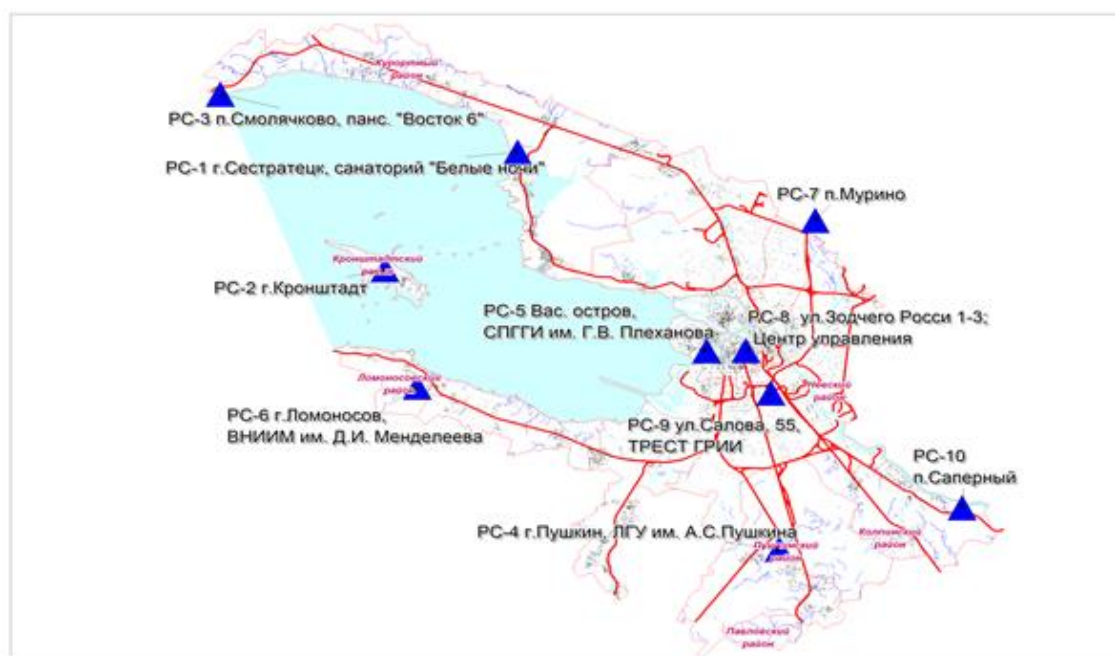


Рис.11. Схема расположения станций PC СПб (Сеть референчных станций г. Санкт-Петербург, дата обращения 04.11.2020)

Сеть включает в себя 10 базовых станций. На пунктах установлены приемники Leica GR10 с антеннами Leica AR25, которые имеют 120 каналов, способны наблюдать до 60 спутников и поддерживают работу со спутниками GPS, ГЛОНАСС и Galileo. Управление сетью осуществляет центр управления и обработки СПб ГКУ ЦИОГД.

### 5.1. ПОДГОТОВКА ДАННЫХ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Первый этап работы заключался в подготовке данных для дальнейшей обработки и анализа.

В качестве исходных данных были использованы часовые RINEX-файлы за 2013-2020 года со станций GORN, KRON, KUP2, LOM2, SEST, расположенных в

Василеостровском, Кронштадтском, Фрунзенском, Петродворцовом и Курортном районах Санкт-Петербурга.

С помощью ПО Topcon Magnet Tools исходные данные объединялись в пятисуточные RINEX-файды для дальнейшей обработки относительным методом и методом PPP.

## 5.2. ОБРАБОТКА ДАННЫХ МЕТОДОМ PPP

Обработка данных методом точного позиционирования проводилась при помощи online-сервиса CSRS-PPP.

Перед отправкой на сервис исходные часовые файлы импортировались в ПО Topcon Magnet Tools и производился экспорт пятисуточных RINEX-файлов (сырые данные GPS+) версий 2 и 3.

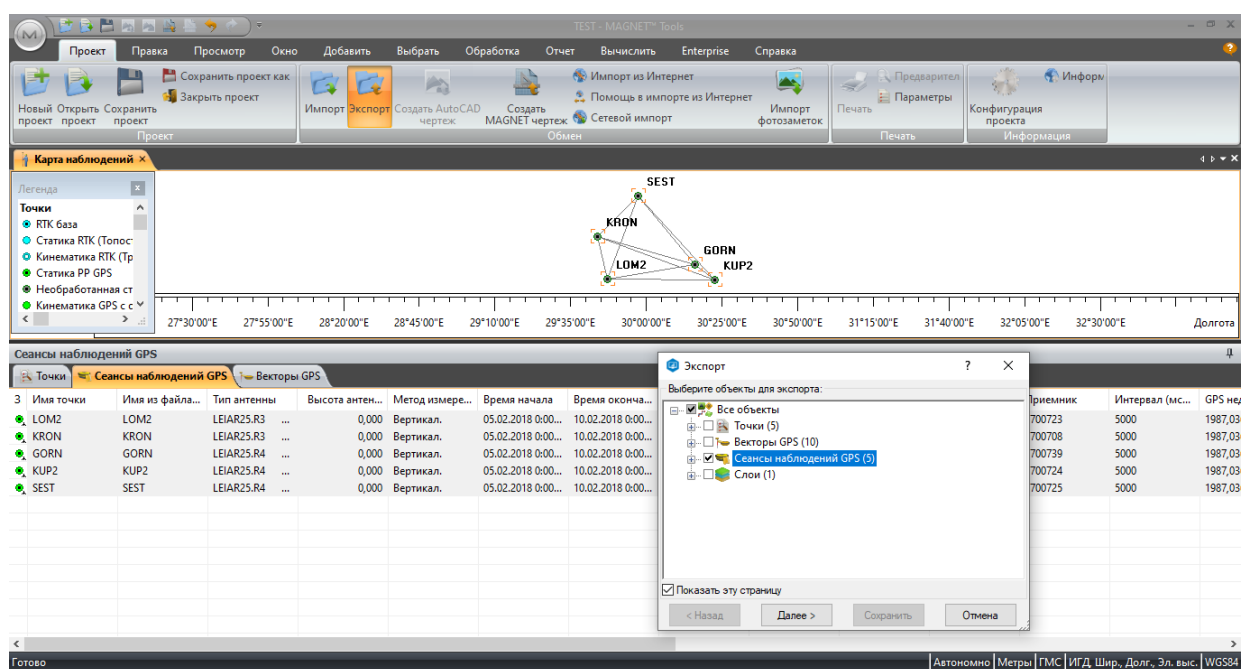


Рис. 12. Подготовка RINEX-файлов в ПО Topcon Magnet Tools

Полученные файлы загружались на сервис для обработки в статическом режиме. В качестве системы отсчета выходных данных были использованы параметры международной системы координат ITRF-08.

Рис.13. Вид страницы online-сервиса CSRS-PPP

Осенью 2020 года Канадская геодезическая служба природных ресурсов Канады обновила сервис точного позиционирования. Данная модернизация включает в себя разрешение неоднозначности для данных, полученных 1 января 2018 года или после этой даты. За счет преобразования неоднозначностей несущей фазы в целое число циклов точность на сантиметровом уровне может быть получена намного быстрее. Кроме того, из-за геометрии спутника разрешение неоднозначностей приводит к улучшению оценок для компоненты долготы (З-В). Данные, собранные до этой даты, по-прежнему обрабатываются с плавающим решением.

На сервисе существует возможность использования моделей океанических приливных нагрузок (OTL, ocean tide loading). Данные нагрузки вызывают движения станций из-за давления океанических приливов на земную кору. Эффект более заметен в высотных движениях, но есть и горизонтальные смещения, которые также могут учитываться в зависимости от задачи. Влияние приливов зависит от их величины и близости станции к побережью. Смещения могут превышать 5 см по вертикали и 1 см по горизонтали. Сервис предоставляет пользователям возможность самостоятельно загрузить файл OTL. В случае проведения обработки без файла океанических приливов, сервис самостоятельно рассчитает коэффициент OTL с использованием приблизительных координат с помощью сетки Чалмерса (the Chalmers grid).

По результатам обработки пользователь получает конечные абсолютные координаты. Отчет представляет собой архив, содержащий следующие файлы:

- отчет в форме (.pdf). Данный файл содержит в себе 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), текстовый файл с запятой в качестве разделителя, содержащий информацию о часах и расположении для каждой обработанной эпохи;
- 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 ошибки и предупреждения, возникшие во время работы сервиса.

Средние квадратические погрешности в плане не превышали 2 мм, погрешности по высоте находились в диапазоне 4-6 мм.

На основе полученных координат были составлены временные ряды в ПО Microsoft Excel для дальнейшей обработки и анализа.

### 5.3. ОБРАБОТКА ДАННЫХ ОТНОСИТЕЛЬНЫМ МЕТОДОМ

Обработка данных относительным методом была реализована с помощью online-сервиса AUSPOS.

Данный сервис не поддерживает файлы RINEX 3, для обработки на сервис загружались файлы RINEX 2.

Все вычисления выполняются с использованием Bernese Software System – программной системы для высокоточного определения орбиты и геодезических параметров. В процессе вычислений используется линейка продуктов Международной службы GPS (IGS), такие как точные параметры орбиты и параметры ориентации Земли.

После отправки файла RINEX для обработки в качестве опорных станций используются ближайшие станции IGS и APREF (Asia-Pacific Reference System). С использованием этих станций вычисляется точное решение с использованием метода двойных разностей. Ошибки из-за влияния внешних факторов, таких как часы приемника, тропосфера и ионосфера, учитываются либо посредством моделирования, либо путем оценки связанных параметров.

В качестве системы отсчета выходных данных используется ITRF-2014.

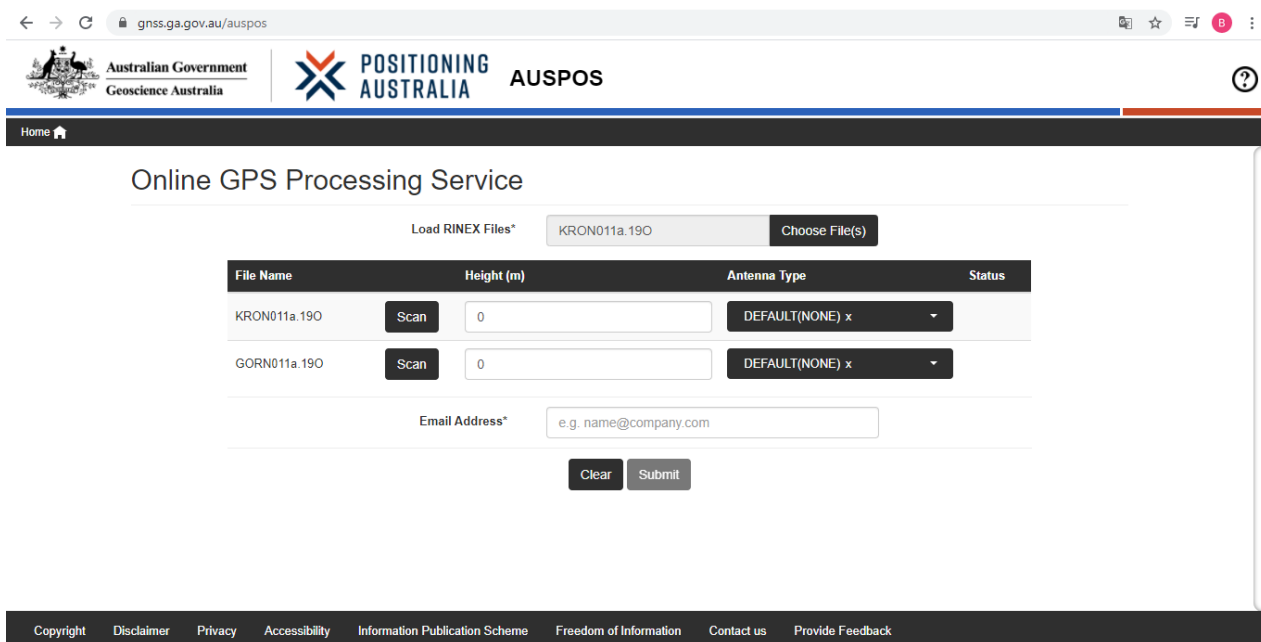


Рис.14. Вид страницы online-сервиса AUSPOS

По результатам обработки пользователь получает отчет, в котором предоставлены прямоугольные декартовы координаты, геодезические координаты, координаты в проекции UTM, позиционная неопределенность (неопределенность координат точки в метрах с уровнем достоверности 95% по отношению к определенной системе отсчета), результаты разрешений неоднозначности и данные об обработке (вычислительная система, предварительная обработка данных и моделирование измерений, оценки, система отсчета и неопределенности). Пример отчета представлен в Приложении В.

Средние квадратические погрешности в плане находились в диапазоне 2-3 мм, погрешности по высоте в диапазоне 5-6 мм.

Полученные координаты были представлены в ПО Microsoft Excel в виде временных рядов из списка координат точек в плане и по высоте.

#### 5.4. ОБРАБОТКА ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ МЕТОДОМ «ГУСЕНИЦА»-SSA

Полученные временные ряды обрабатывались с помощью алгоритма, реализованного в ПО MathCAD. По результатам обработки выделяются различные компоненты ряда, которые можно разделить на группы:

- тренд;
- периодические составляющие;
- шум.

Если различные компоненты имели одинаковый или близкий периоды, то они объединялись.

### 5.4.1. АНАЛИЗ ДВИЖЕНИЙ СТАНЦИЙ, МЕТОД PPP

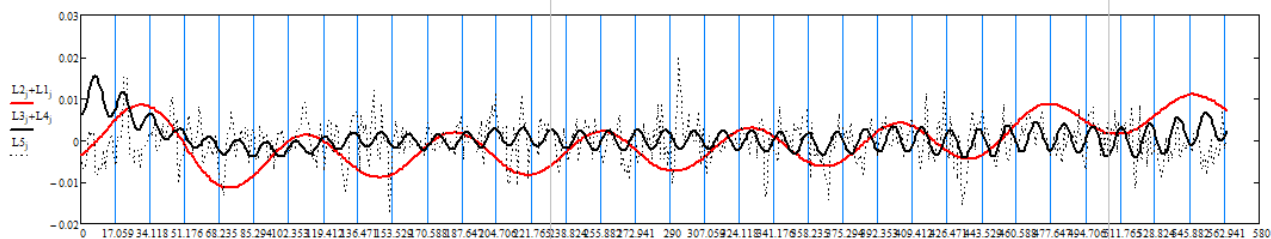


Рис.15. График компонент ряда, высота, станция SEST, метод PPP

Представленный на рисунке 15 график отражает пример разложения на компоненты для перемещений станции по высоте. Компоненты L1, L2, L3 и L4 являются периодическими составляющими, компонента L5 – остаточным шумом.

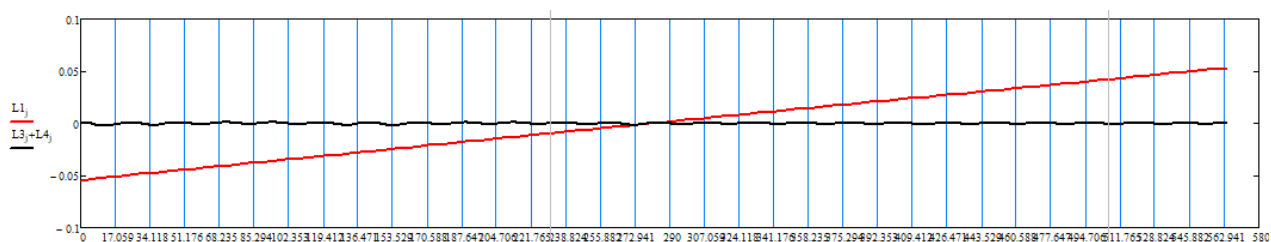


Рис.16. График компонент ряда координат станции SEST, метод PPP

График, представленный выше, демонстрирует полученный тренд в движении станции в плане в направлении юг-север. Такие же тренды были получены в направлении запад-восток.

График на рисунке 17 отражает периодические составляющие ряда координат, полученные после исключения тренда и шума.

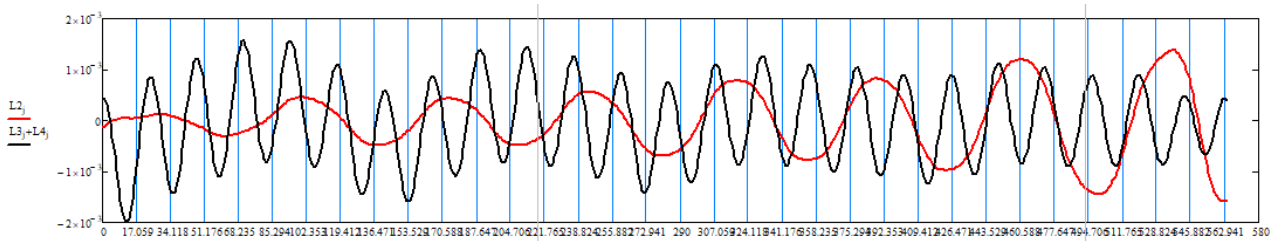


Рис.17. График периодических составляющих ряда координат станции SEST, метод PPP

Представленная ниже таблица отражает выявленные периодические составляющие движений станций в плане и по высоте.

Таблица 2. Периодические движения в плане и по высоте станций постоянно действующих сетей г. Санкт-Петербург, метод PPP

	GORN	KRON	KUP2	LOM2	SEST
Высотная составляющая	12 месяцев, 70 дней	12 месяцев, 70 дней	12 месяцев, 70 дней	12 месяцев, 70 дней	12 месяцев, 70 дней
Плановая составляющая, направление С-Ю	12 месяцев, 3 месяца	12 месяцев, 3 месяца	12 месяцев, 3 месяца	12 месяцев, 3 месяца	12 месяцев, 3 месяца

Продолжение таблицы 2

Плановая составляющая, направление З-В	24 месяца, 3 месяца	12 месяцев, 3 месяца	12 месяцев, 3 месяца	21 месяц, 3 месяца	21 месяц, 3 месяца
----------------------------------------	---------------------	----------------------	----------------------	--------------------	--------------------

В высотных движениях выделились одинаковые периоды продолжительностью 12 месяцев и 70 дней. В координатах в направлении юг-север выделились составляющие с периодами 12 месяцев и 3 месяца. В плановых движениях в направлении запад-восток периоды различаются по продолжительности, длительность колеблется от 12 до 24 месяцев, единой для всех станций является составляющая с периодом 3 месяца.

Выявленные амплитуды периодических движений станций составили в среднем по высоте 7-10 мм в длинных периодах и 3-6 мм в коротких, в плане 1-2,5 мм в длинных периодах и 1,5-3 мм в коротких. Кроме того, выявленный тренд показал явную тенденцию к движению всех станций на северо-восток.

Таблица 3. Трендовые движения в плане станций постоянно действующих сетей г. Санкт-Петербург, метод PPP

	GORN	KRON	KUP2	LOM2	SEST
Перемещения станций в направлении Ю-С, см.	8,5	10,6	8,7	10,5	10,8
Перемещения станций в направлении З-В, см.	16,1	15,9	15,5	15,7	15,6

Полученный тренд для станций соответствует данным, полученным с международного сервиса Plate Motion Calculator (Сайт международного сервиса Plate Motion Calculator, дата обращения 11.04.2021). Для каждой исследуемой точки с помощью данного сервиса была определена скорость движения Евразийской плиты в двух направлениях. Например, скорость движения плиты в районе станции SEST составляет 12,6 мм/год в северном направлении и 20,1 мм/год в восточном направлении. По результатам исследования движение станции SEST составляет 13,5 мм/год в северном направлении и 19,5 мм/год в восточном направлении. Таким образом, движение станции, редуцированное за движение Евразийской плиты, составляет 0,9 мм в год в северном направлении и 0,6 мм в год в западном направлении. Кроме того, было проведено сравнение полученных результатов с предыдущими исследованиями, проводимыми Пулковской обсерваторией (Горшков, Мохнаткин, 2015).

Таблица 4. Сравнение результатов с предыдущими исследованиями, станция GORN

	Скорость движения в направлении юг-север, мм в год	Скорость движения в направлении запад-восток, мм в год
Движение ЕА плиты по данным международных организаций	+12,6	+20,2



Продолжение таблицы 4

Абсолютное движение станции	+10,6	+20,1
Движение станции, редуцированное за движение ЕА плиты	-2,0	-0,1
Среднее движение станции по исследованиям Пулковской обсерватории	+0,27±0,117	-0,91±0,117

Таблица 5. Сравнение результатов с предыдущими исследованиями, станция KRON

	Скорость движения в направлении юг-север, мм в год	Скорость движения в направлении запад-восток, мм в год
Движение ЕА плиты по данным международных организаций	+12,6	+20,1
Абсолютное движение станции	+13,2	+19,9
Движение станции, редуцированное за движение ЕА плиты	+0,6	-0,2

Таблица 6. Сравнение результатов с предыдущими исследованиями, станция KUP2

	Скорость движения в направлении юг-север, мм в год	Скорость движения в направлении запад-восток, мм в год
Движение ЕА плиты по данным международных организаций	+12,6	+20,2
Абсолютное движение станции	+10,9	+19,4
Движение станции, редуцированное за движение ЕА плиты	-1,7	-0,8
Среднее движение станции по исследованиям Пулковской обсерватории	-0,93±0,123	-0,96±0,132

Таблица 7. Сравнение результатов с предыдущими исследованиями, станция LOM2

	Скорость движения в направлении юг-север, мм в год	Скорость движения в направлении запад-восток, мм в год
Движение ЕА плиты по данным международных организаций	+12,6	+20,1
Абсолютное движение станции	+13,1	+19,6

Продолжение таблицы 7

Движение станции, редуцированное за движение ЕА плиты	+0,5	-0,5
Среднее движение станции по исследованиям Пулковской обсерватории	+0,18±0,138	-0,26±0,126

Таблица 8. Сравнение результатов с предыдущими исследованиями, станция SEST

	Скорость движения в направлении юг-север, мм в год	Скорость движения в направлении запад-восток, мм в год
Движение ЕА плиты по данным международных организаций	+12,6	+20,1
Абсолютное движение станции	+13,5	+19,5
Движение станции, редуцированное за движение ЕА плиты	+0,9	-0,6
Среднее движение станции по исследованиям Пулковской обсерватории	+0,3±0,126	-0,85±0,139

В программном обеспечении QuantumGIS была составлена схема, которая наглядно отображает расположение станций, их перемещения за 8 лет по каждому из направлений и общий тренд движения без учета движения литосферной плиты.



Рис.18. Схема расположения исследуемых станций и их перемещения, метод PPP

#### 5.4.2. АНАЛИЗ ДВИЖЕНИЙ СТАНЦИЙ, ОТНОСИТЕЛЬНЫЙ МЕТОД

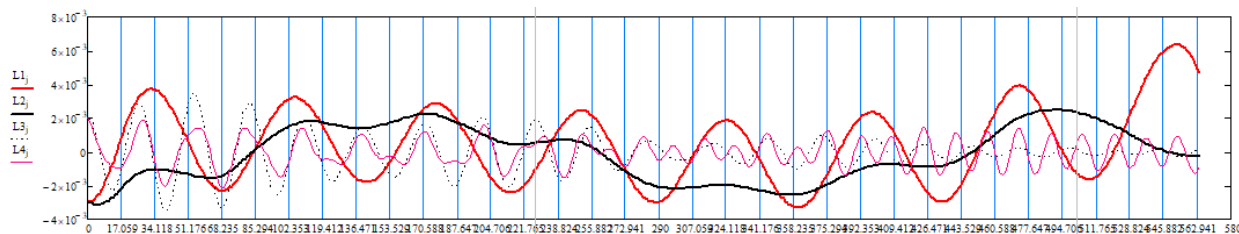


Рис.19. График компонент ряда, высота, станция SEST, относительный метод

Представленный на рисунке 19 график отражает выявленные периодики в высотных движениях станции. Временной ряд получен относительным способом.

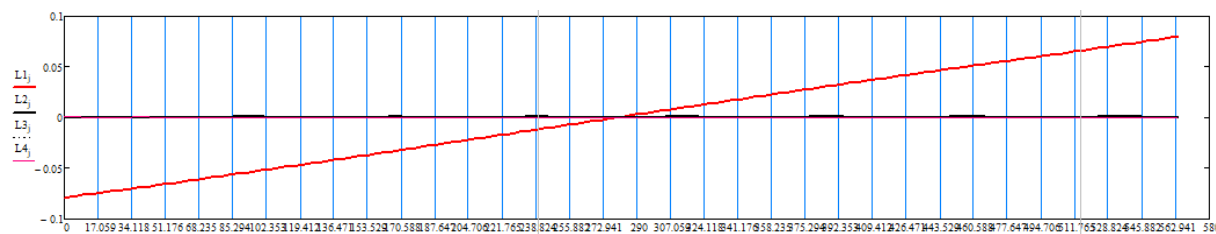


Рис.20. График компонент ряда координат станции SEST, относительный метод

Представленный выше график демонстрирует выявленный тренд в движении станций в плане в направлении запад-восток.

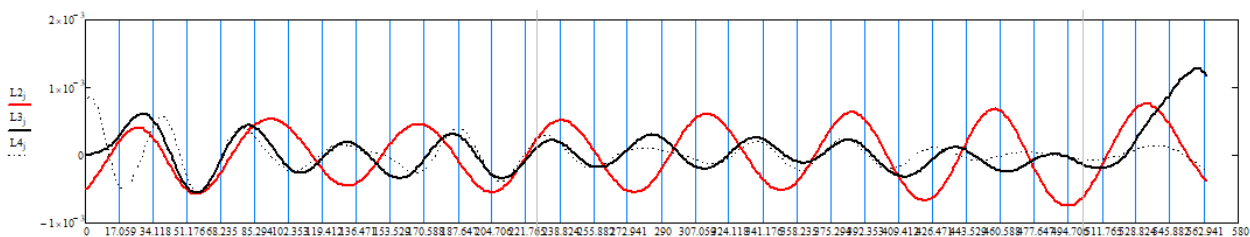


Рис.21. График периодических составляющих ряда координат станции SEST, относительный метод

График, представленный на рисунке 21, отражает полученные периодические составляющие ряда координат после исключения тренда и шума.

Таблица 9 отражает выявленные периодические составляющие движений станций в плане и по высоте.

Таблица 9. Периодические движения в плане и по высоте станций постоянно действующих сетей г. Санкт-Петербург, относительный метод

	GORN	KRON	KUP2	LOM2	SEST
Высотная составляющая	8 месяцев, 18 месяцев	4,5 месяца	8 месяцев	12 месяцев, 6 месяцев	12 месяцев, 6 месяцев
Плановая составляющая, направление С-Ю	12 месяцев	12 месяцев	12 месяцев	12 месяцев, 6 месяцев	15 месяцев
Плановая составляющая, направление З-В	12 месяцев	12 месяцев	-	12 месяцев, 6 месяцев	12 месяцев, 8 месяцев

В высотных движениях периодики различаются по продолжительности, длительность колеблется от 4,5 до 12 месяцев. В координатах в направлении юг-север были выделены составляющие с периодами 6, 12 и 15 месяцев. В координатах в направлении запад-восток выделились периодики длительностью 6,8 и 12 месяцев.

Амплитуды изменения в положении референчных станций составили в среднем по высоте 4-6 мм, в плане 1-3 мм.

Выявленный тренд показал тенденцию к движению всех пяти станций на северо-восток.

Таблица 10. Трендовые движения в плане станций постоянно действующих сетей г. Санкт-Петербург, относительный метод

	GORN	KRON	KUP2	LOM2	SEST
Перемещения станций в направлении Ю-С, см.	8,3	10,2	8,5	10,1	10,3
Перемещения станций в направлении З-В, см.	15,3	16,0	15,8	15,8	15,8

В таблицах ниже представлены сравнения полученных результатов с данными международного сервиса Plate Motion Calculator и предыдущими исследованиями.

Таблица 11. Сравнение результатов с предыдущими исследованиями, станция GORN

	Скорость движения в направлении юг-север, мм в год	Скорость движения в направлении запад-восток, мм в год
Движение ЕА плиты по данным международных организаций	+12,6	+20,2
Абсолютное движение станции	+10,4	+19,1
Движение станции, редуцированное за движение ЕА плиты	-2,2	-1,1
Среднее движение станции по исследованиям Пулковской обсерватории	+0,27±0,117	-0,91±0,117

Таблица 12. Сравнение результатов с предыдущими исследованиями, станция KRON

	Скорость движения в направлении юг-север, мм в год	Скорость движения в направлении запад-восток, мм в год
Движение ЕА плиты по данным международных организаций	+12,6	+20,1
Абсолютное движение станции	+12,8	+20,0
Движение станции, редуцированное за движение ЕА плиты	+0,2	-0,1

Таблица 13. Сравнение результатов с предыдущими исследованиями, станция KUP2

	Скорость движения в направлении юг-север, мм в год	Скорость движения в направлении запад-восток, мм в год
Движение ЕА плиты по данным международных организаций	+12,6	+20,2
Абсолютное движение станции	+10,6	+19,8
Движение станции, редуцированное за движение ЕА плиты	-2,0	-0,4
Среднее движение станции по исследованиям Пулковской обсерватории	-0,93±0,123	-0,96±0,132

Таблица 14. Сравнение результатов с предыдущими исследованиями, станция LOM2

	Скорость движения в направлении юг-север, мм в год	Скорость движения в направлении запад-восток, мм в год
Движение ЕА плиты по данным международных организаций	+12,6	+20,1
Абсолютное движение станции	+12,6	+19,8
Движение станции, редуцированное за движение ЕА плиты	0	-0,3
Среднее движение станции по исследованиям Пулковской обсерватории	+0,18±0,138	-0,26±0,126

Таблица 15. Сравнение результатов с предыдущими исследованиями, станция SEST

	Скорость движения в направлении юг-север, мм в год	Скорость движения в направлении запад-восток, мм в год
Движение ЕА плиты по данным международных организаций	+12,6	+20,1
Абсолютное движение станции	+12,8	+19,8
Движение станции, редуцированное за движение ЕА плиты	+0,2	-0,3
Среднее движение станции по исследованиям Пулковской обсерватории	+0,3±0,126	-0,85±0,139

На рисунке 22 представлена схема расположения станций, их перемещений и общий тренд без учета движения плиты, полученный из координат, обработанных относительным способом.



Рис.22. Схема расположения исследуемых станций и их перемещения, относительный способ

## 5.5. ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате обработки методом «Гусеница»-SSA временных рядов, полученных разными способами позиционирования, выявились различные периодики и амплитуды. Обобщая результаты, можно выделить следующие пункты:

- относительным способом и способом PPP при анализе движений станций выделилась 12-месячная компонента в плановом положении в направлении юг-север (за исключением станции SEST, обработанной относительным способом);
- относительным способом для всех станций (за исключением KUP2) в направлении запад-восток выявилась 12-месячная компонента, в то время как в методе PPP выявилась единая периодика длительностью 3 месяца;
- методом PPP при анализе взаимного положения в высотном отношении для всех станций выделились составляющие 3 и 12 месяцев. Для относительного метода позиционирования в высотном отношении были выявлены отличающиеся друг от друга составляющие: 4.5, 6, 8, 12 и 18 месяцев;
- амплитуды плановых движений станций сопоставимы друг с другом и находятся в пределах 1-3 мм. Амплитуды движений по высоте для метода

PPP оказались несколько больше амплитуд, полученных с помощью относительного метода;

- при анализе координат, полученных обоими методами позиционирования, был выявлен единый тренд, предполагающий движения станций на северо-восток. Числовые составляющие трендовых движений для обоих методов сопоставимы друг с другом.

Таким образом, исследование подтвердило, что для выявления периодических перемещений предпочтительнее использование координат, полученных абсолютным методом. Это связано с тем, что при обработке данным способом не происходит закрепление других станций, которые также двигаются, и данные получаются более достоверными.

Полученные в данной работе результаты подтверждаются предыдущими исследованиями на территории Балтийского региона, согласно которым пункты ГНСС двигаются в северо-восточном направлении со средней скоростью от 19,9 мм/год на севере до 23,9 мм/год на юге (Гусева, Крупенникова, 2020).

Полученные в результате исследования движения станций, редуцированные за движения литосферной плиты, подтверждаются предыдущими исследованиями, которые были выполнены Пулковской обсерваторией РАН о том, что отдельные части литосферной плиты локально двигаются относительно друг друга (Горшков, Мохнаткин, 2015). Согласно исследованиям, станции, расположенные в г. Санкт-Петербург в среднем двигаются в юго-западном направлении.

В результате проделанной работы были выявлены и проанализированы изменения в положении референчных станций ГНСС, заключающиеся в наличии периодических компонент и основного тренда. Метод «Гусеница»-SSA не дает объяснения причинам возникновения периодик. Траектовка движений станций и их периодик может быть получена путем исследования совокупности станций и каждой станции в отдельности.

Исследование периодов и трендов, а также их причин является очень важной задачей при проведении геодезического мониторинга. Данные исследования позволяют выявить движения, вызванные естественными процессами, и отличить их от изменений в поведении тренда, которые вызываются негативными процессами, а также предотвратить аварийные ситуации и повысить точность и достоверность измерений.



## Заключение

В ходе выполнения данной работы были изучены существующие методы спутникового позиционирования. Особое внимание было уделено методу точного позиционирования PPP и его разновидности PPP-AR. Были рассмотрены методы геодезического мониторинга с использованием ГНСС-технологий. При обработке файлов, полученных с сети РС СПб, были освоены принципы работы с онлайн сервисами для обработки данных CRSR-PPP и AUSPOS. Были изучен и применен на практике метод обработки временных рядов «Гусеница»-SSA. Полученные временные ряды были обработаны, были выявлены периодические движения и тренды. В работе приведено описание полученных результатов и графики движений станций. В завершении было проведено сравнение полученных результатов с предыдущими исследованиями.

Дальнейшее исследование может проводиться в двух направлениях. С одной стороны, важно провести работу по интерпретации полученных периодик и выявлению причин движений базовых референчных станций ГНСС. Для этого необходимо подробно изучить метеорологические, геологические и другие особенности местности для каждой из станций, так как условия могут быть отличны даже на коротких расстояниях. С другой стороны, необходимо провести исследование с использованием других программных продуктов.

Результаты данной работы были представлены на Национальной (Всероссийской) конференции по естественным и гуманитарным наукам «Наука СПбГУ – 2020», на Ежегодной Международной Научной Конференции МИИГАиК «Пространственные данные 2021» и в качестве статьи, опубликованной в сборнике статей «География: развитие науки и образования», отражающем результаты работы научно-практической конференции «74 Герценовские чтения» (Иванова, Тюрин, 2021).

## Список литературы

### *Монографии*

1. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии: в 2 т. М.: ФГУП «Картгеоцентр», 2006, 360 с

### *Учебники и учебные пособия*

2. Большой энциклопедический словарь: А-Я / Гл. ред. Прохоров А.М. - 2-е изд., перераб. и доп. М.;СПб: БСЭ, 2000, 1452 с.

3. Голяндина Н.Э. Метод «Гусеница»-SSA: анализ временных рядов: Учеб. пособие. СПб, 2004, 76 с.

4. Главные компоненты временных рядов: метод «Гусеница». Под. ред. Д.Л. Данилова, А.А. Жиглявского. СПб: Пресском, 1997, 307 с.

5. Жуков Б.Н. Геодезический контроль сооружений и оборудования промышленных предприятий. Новосибирск: СГГА, 2003, 356 с.

6. Жуков Б.Н., Карпик А.П. Геодезический контроль инженерных объектов промышленных предприятий и гражданских комплексов. Новосибирск: СГГА, 2006, 148 с.

7. Курошев Г.Д. Геодезия и география: Учебник. – СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 1999. – 372 с

8. Курошев Г.Д. Космическая геодезия и глобальные системы позиционирования: Учебное пособие. – СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2011. – 182 с.

9. Серапинас Б.Б. Глобальные системы позиционирования: Учеб. изд. - М.: ИКФ «Каталог», 2002. – 106 с.

10. Трофимов Д.А. Определение координат пунктов из ГНСС-наблюдений методом PPP. Учеб. пособие. 2019, 33 с.

### *Статьи в журналах*

11. Александров Ф.И. Выделение аддитивных компонент временного ряда при пакетной обработке методом «Гусеница»-SSA // Вестник СПбГУ. Сер. 1, 2006. №2. С. 71 – 74

12. Антонович К.М., Карпик А.П., Клепиков А.Н. Спутниковый мониторинг земной поверхности // Геодезия и картография, 2004. № 1. С. 4-11.

13. Вохмянин С.В. Испытание алгоритма метода «Гусеница-SSA» для восстановления временного ряда // Вестник СибГУ им. М.Ф. Решетникова. 2010. №2. С. 59 – 62.

14. Горшков В.Л., А.В. Мохнаткин, С.Д. Петров, С.С. Смирнов, Д.А. Трофимов, Н.В. Щербакова. Исследование геодинамики зоны сопряжения Балтийского щита с Восточно-Европейской платформой по данным ГНСС-наблюдений // Вестник СПбГУ. Сер. 1, Том 2(60), 2015. № 3. С. 482-491.

15. Горшков В.Л., Щербакова Н.В. Исследование случайных и систематических ошибок GPS-наблюдений на территории Пулковской обсерватории // Международный научно-технический и производственный электронный журнал «Науки о Земле», 2012. №4, С. 12-22
16. Куприянов А.О., Морозов Д.А. Экспериментальный мониторинг ионосферы с применением мультисистемной ГНСС-аппаратуры // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка, 2016. № 1. С. 29-33.
17. Малютина К.И., Шевчук С.О. Сравнение бесплатной программы RTKLib с коммерческим программным обеспечением для постобработки ГНСС измерений // Интерэкспо Гео-Сибирь, 2017. №2
18. Мельников А.Ю. Анализ точности метода Precise Point Positioning для оценки возможности его применения в геодинимических исследованиях // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2018. Т. 62. № 2. С. 605 – 616
19. Спутниковый мониторинг и сейсмическая активность северо-запада России/Т.В.Гусева, И.С.Крупенникова, А.Н.Мокрова, В.П.Передерин, Н.К.Розенберг // Геофизические исследования. 2020. №1. С. 24-32.
20. Терещенко В.Е., Лагутина Е.К. Сравнение относительных смещений пунктов сети постоянно действующих базовых станций Новосибирской области, полученных с использованием различных онлайн-сервисов обработки спутниковых измерений // Вестник СГУГиТ, 2019. №2. С. 76-94
21. Шевчук С.О., Малютина К.И., Липатников Л.А. Перспективы использования свободного программного обеспечения для постобработки ГНСС-измерений // Вестник СГУГиТ, 2018. №1. С. 65-84
22. Шевчук С.О., Мелеск А.Х., Косарев Н.С. Исследование точности метода PPP для навигационно-геодезического обеспечения геофизических работ // Геопрофи, 2016. №3. С. 10-15.
23. Шульц Р.В., Анненков А.А., Куличенко Н.В. Опыт использования современных технологий в задачах геодезического мониторинга высотных зданий // Вестник МГСУ, 2016. №1. С. 80-93
24. Assinovskaya V., Shchulin J., Gorshkov V., Shcherbakova N. On recent geodynamics of the Eastern Baltic Sea region // Baltica, 2011. № 24 (2). P. 61 – 70.
25. Chang Xu, Dongjie Yeu Monte Carlo SSA to detect time-variable seasonal oscillations from GPS-derived site position time series // Tectonophysics– 2015.–Vol.665. – P.118 – 126.
26. Garrett Seepersad, Sunil Bisnath. An assessment of the interoperability of PPP-AR network products // The Journal of Global Positioning Systems. – 2017. – Vol.15. – 4.

27. Georgia Katsigianni, Sylvain Loyer, Felix Perosanz. PPP and PPP-AR Kinematic Post-Processed Performance of GPS-Only, Galileo-Only and Multi-GNSS // Remote Sensing. – 2019. – Vol.11. - №21. – 2477.
28. Kouba J., Héroux P. Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products // GPS Solutions. – 2001.–Vol.5. – № 2. – P.12 – 28.
29. Liangke Huang, Weiping Jiang, Lilong Liu, Hua Chen, Shirong Ye. A new global grid model for the determination of atmospheric weighted mean temperature in GPS precipitable water vapor // Journal of Geodesy. – 2019. – Vol. 93. - № 2. – P.159-176
30. Peiliang Xu, Chuang Shi, Rongxin Fang, Jingnan Liu, Quan Zhang, Takashi Yanagidani. High-rate precise point positioning (PPP) to measure seismic wave motions: an experimental comparison of GPS PPP with inertial measurement units // Journal of Geodesy. – 2013. – Vol.87. - № 3. – P.361-372

*Статьи в сборниках*

31. Иванова В.В., Тюрин С.В. Выявление и анализ длиннопериодических движений постоянно действующих базовых станций ГНСС // География: развитие науки и образования. LXXIV Герценовские чтения 21-23 апреля 2021 г., Санкт-Петербург. С. 100-103

*Ресурсы сети Интернет*

32. Сайт международного сервиса Plate Motion Calculator: [электронный ресурс]. URL: <https://www.unavco.org> (дата обращения 11.04.2021)
33. Сайт проекта Ричарда Б. Энгли, посвящённый онлайн-сервисам PPP: [электронный ресурс]. URL: <http://www2.unb.ca/gge/Resources/PPP/OnlinePPPs.html> (дата обращения: 14.03.2021)
34. Сеть референчных станций г. Санкт–Петербург: [электронный ресурс]. URL: <http://ref.kgainfo.spb.ru/about/> (дата обращения: 04.11.2020).
35. 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).
36. Сайт Trimble. Использование точных GPS/ГЛОНАСС орбит при постобработке: [электронный ресурс]. URL: <https://trimble.club/ispolzovaniie-tochnykh-gps-glonass-orbit-pri-postobrabotkie/> (дата обращения 20.02.2021)

## Приложение А. Пример отчета online-сервиса CSRS-PPP



### CSRS-PPP 3.50.0 (2021-03-10)



**GORN011a.190**  
**GORN**

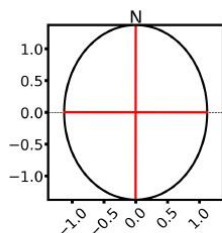
<b>Data Start</b>	<b>Data End</b>	<b>Duration of Observations</b>
2019-01-11 00:00:00.00	2019-01-15 23:59:30.00	4 days, 23:59:30
<b>Processing Time</b>		<b>Product Type</b>
10:49:01 UTC 2021/04/29		NRCan/IGS Final
<b>Observations</b>	<b>Frequency</b>	<b>Mode</b>
Phase and Code	Double	Static
<b>Elevation Cut-Off</b>	<b>Rejected Epochs</b>	<b>Fixed Ambiguities</b>
7.5 degrees	0.00 %	99.98 %
		<b>Estimation Steps</b>
		30.00 sec
<b>Antenna Model</b>	<b>APC to ARP</b>	<b>ARP to Marker</b>
LEIAR25.R4 LEIT	L1 = 0.159 m L2 = 0.155 m	H:0.000m / E:0.000m / N:0.000m

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

### Estimated Position for GORN011a.190

	Latitude (+n)	Longitude (+e)	Ell. Height
<b>ITRF14 (2019.0)</b>	59° 55' 50.46127"	30° 16' 0.35686"	50.308 m
<b>Sigmas(95%)</b>	0.001 m	0.001 m	0.004 m
<b>A priori*</b>	59° 55' 50.45948"	30° 16' 0.34975"	50.295 m
<b>Estimated - A priori</b>	0.055 m	0.110 m	0.013 m

**95% Error Ellipse (mm)**  
 semi-major: 1 mm  
 semi-minor: 1 mm  
 semi-major azimuth: 0° 2' 33.15"

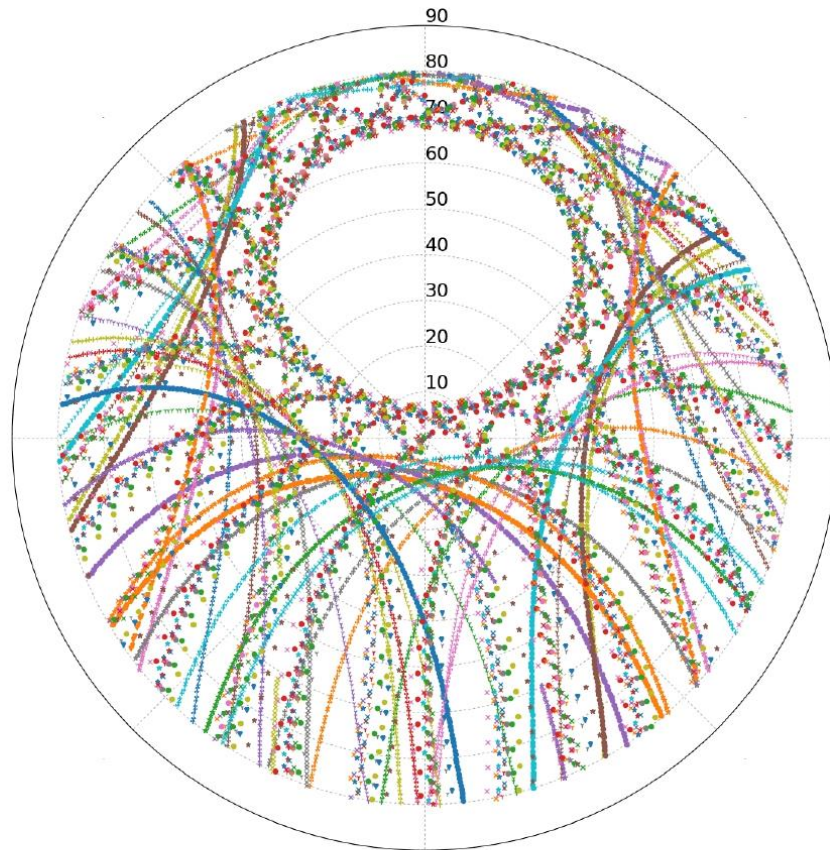


**UTM (North)**  
**Zone 36**

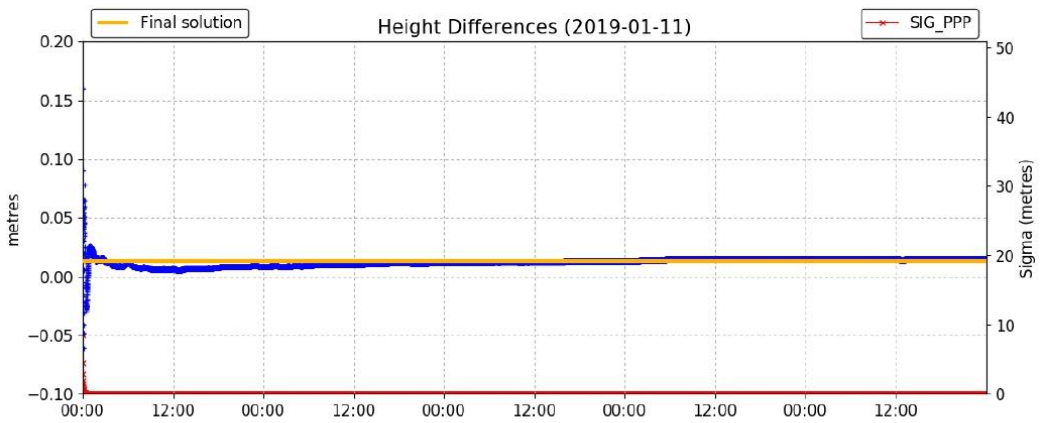
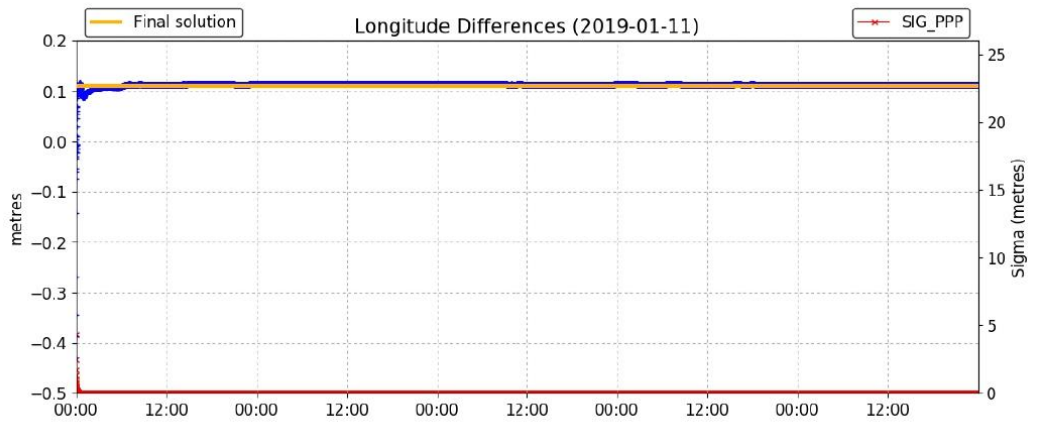
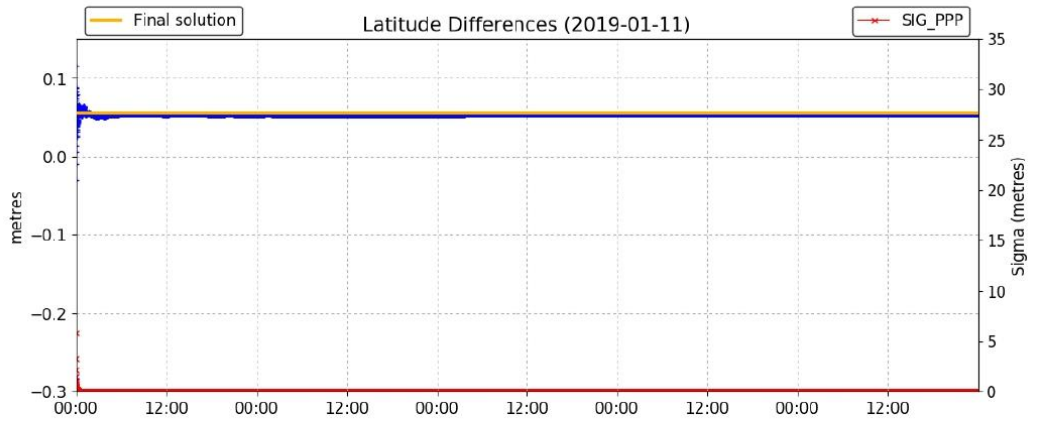
6646845.456 m (N)  
 347256.570 m (E)  
 Scale Factors  
 0.99988592 (point)  
 0.99987805 (combined)

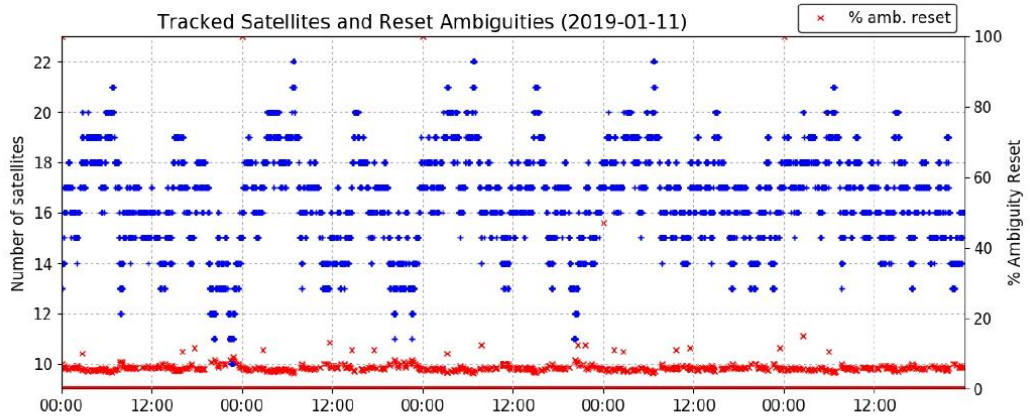
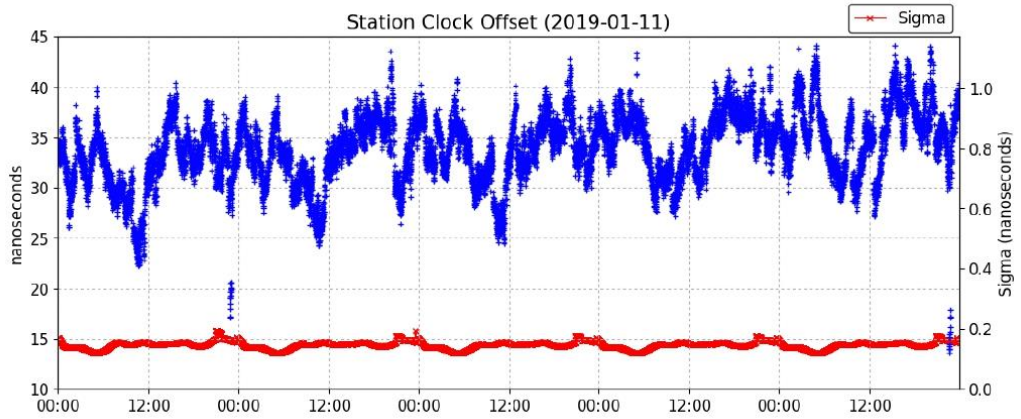
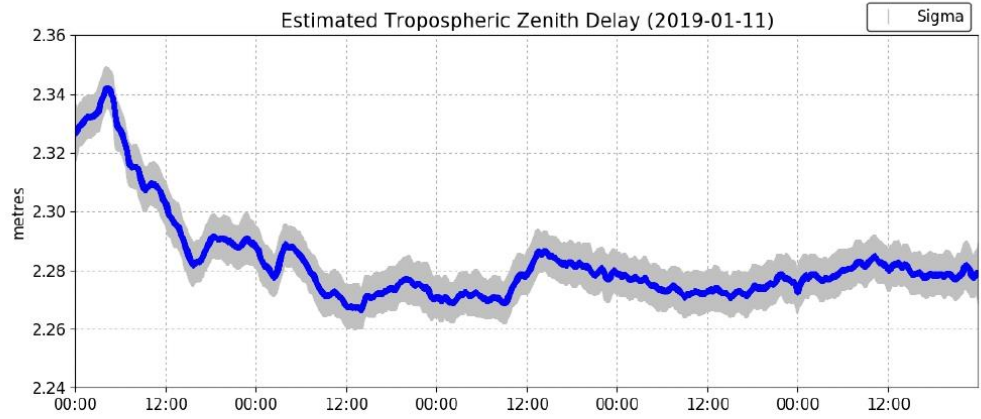
\*(Coordinates from RINEX header used as a priori position)

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

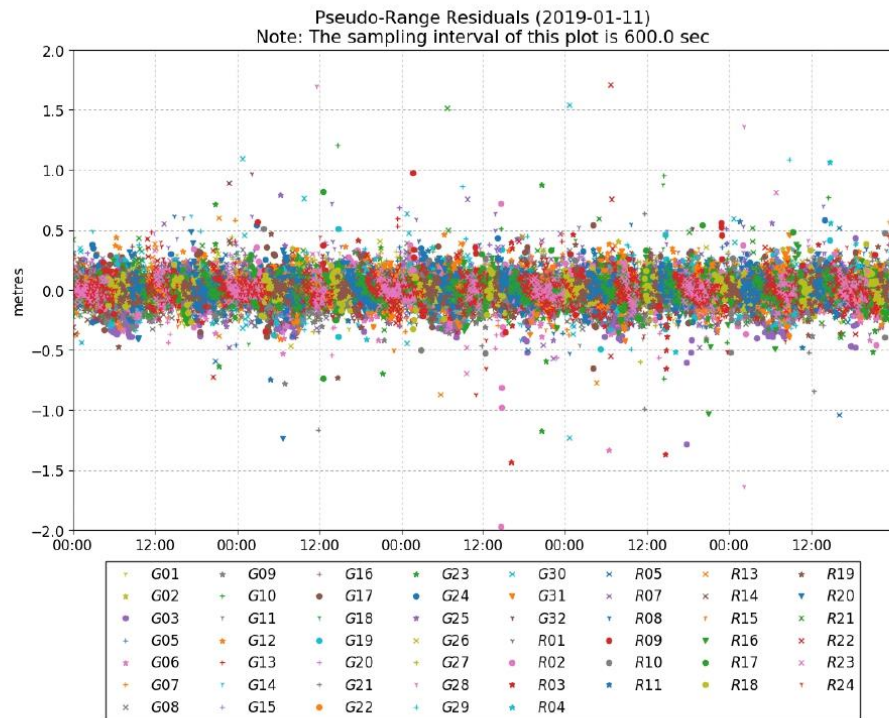
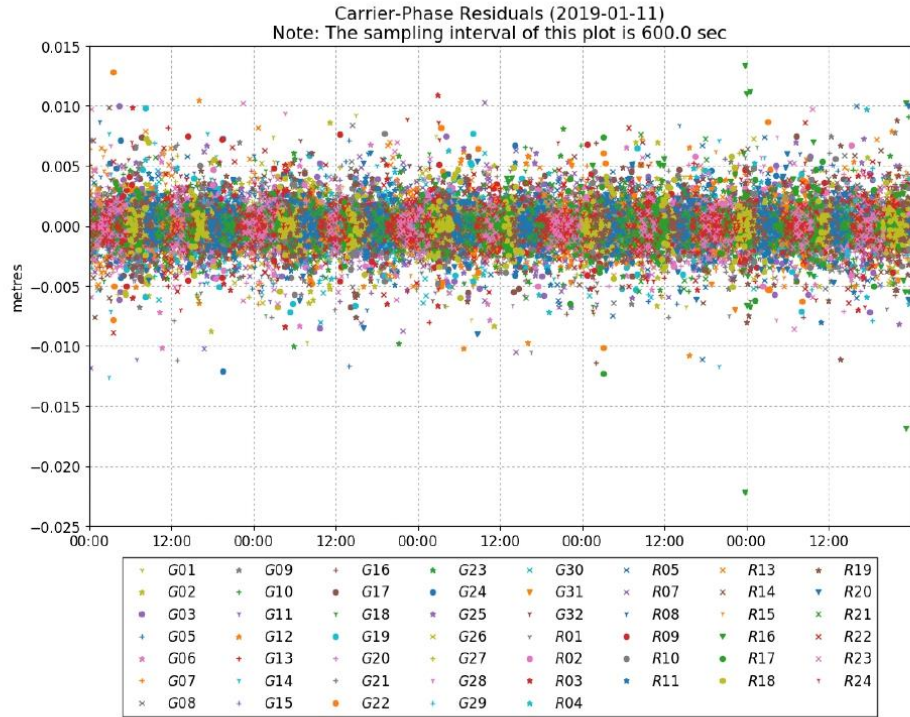


+	G01	+	G11	+	G20	+	G29	×	R07	•	R17
+	G02	+	G12	+	G21	+	G30	•	R08	•	R18
•	G03	+	G13	•	G22	+	G31	•	R09	•	R19
+	G05	+	G14	•	G23	+	G32	•	R10	•	R20
•	G06	+	G15	•	G24	+	R01	•	R11	×	R21
+	G07	+	G16	•	G25	•	R02	•	R13	×	R22
×	G08	•	G17	•	G26	•	R03	×	R14	×	R23
•	G09	•	G18	•	G27	•	R04	•	R15	•	R24
•	G10	•	G19	•	G28	•	R05	•	R16		

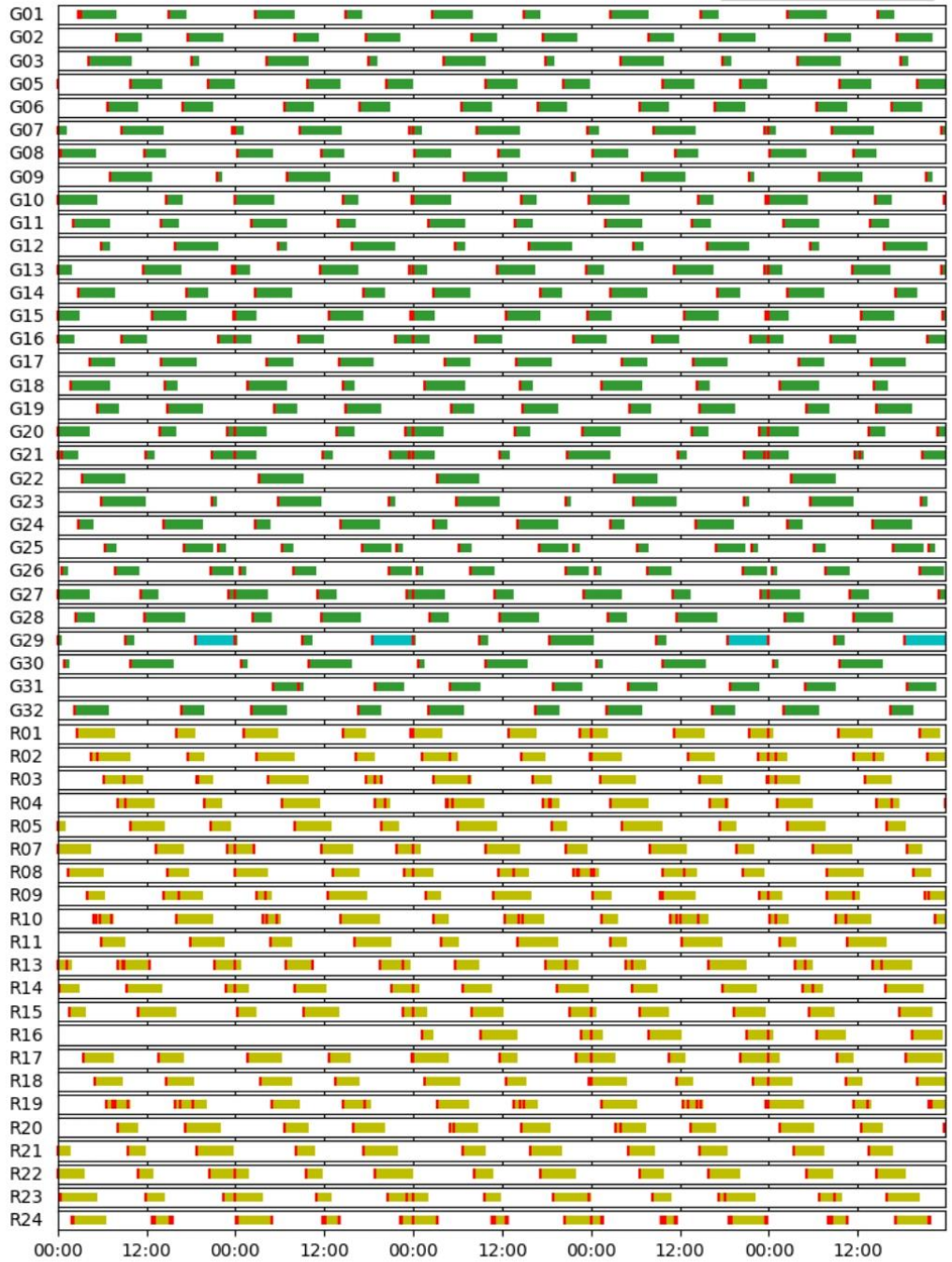
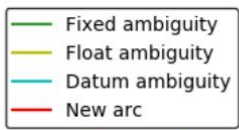








Phase Ambiguity Status (2019-01-11)  
Note: The sampling interval of this plot is 600.0 sec



~~~~ **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: [nrcan.geodeticinformation-informationgeodesique.rncan@canada.ca](mailto:nrcan.geodeticinformation-informationgeodesique.rncan@canada.ca)**



Natural Resources  
Canada

Ressources naturelles  
Canada

**Canada**

## Приложение В. Пример отчета online-сервиса AUSPOS



# AUSPOS GPS Processing Report

April 9, 2021

This document is a report of the GPS data processing undertaken by the AUSPOS Online GPS Processing Service (version: AUSPOS 2.4). The AUSPOS Online GPS Processing Service uses International GNSS Service (IGS) products (final, rapid, ultra-rapid depending on availability) to compute precise coordinates in International Terrestrial Reference Frame (ITRF) anywhere on Earth and Geocentric Datum of Australia (GDA) within Australia. The Service is designed to process only dual frequency GPS phase data.

An overview of the GPS processing strategy is included in this report.

Please direct any correspondence to [GNSSAnalysis@ga.gov.au](mailto:GNSSAnalysis@ga.gov.au)

Geoscience Australia  
Cnr Jerrabomberra and Hindmarsh Drive  
GPO Box 378, Canberra, ACT 2601, Australia  
Freecall (Within Australia): 1800 800 173  
Tel: +61 2 6249 9111. Fax +61 2 6249 9929  
Geoscience Australia  
Home Page: <http://www.ga.gov.au>

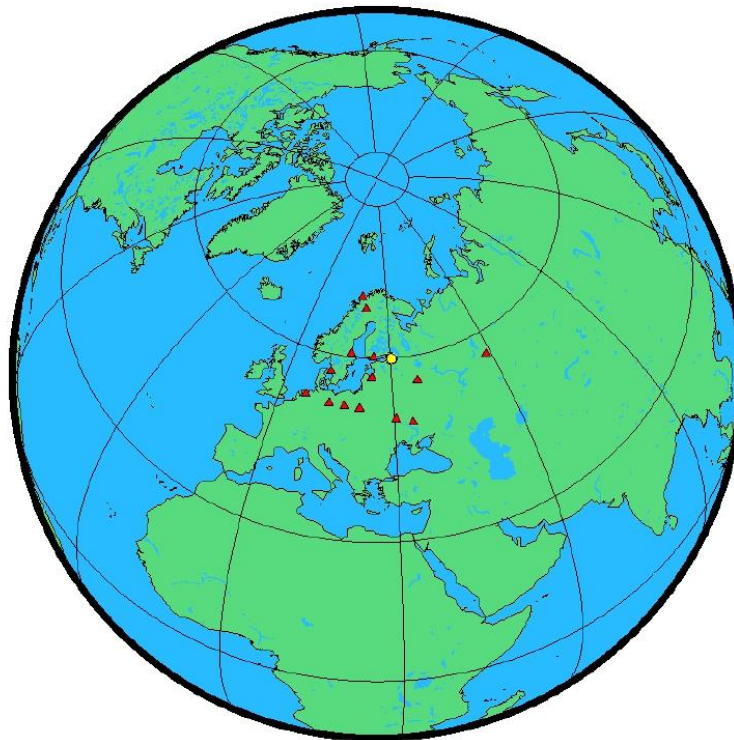


## 1 User Data

All antenna heights refer to the vertical distance from the Ground Mark to the Antenna Reference Point (ARP).

| Station (s) | Submitted File | Antenna Type | Antenna Height (m) | Start Time          | End Time            |
|-------------|----------------|--------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| GORN        | GORN211a.130   | NONE NONE    | 0.000              | 2013/07/30 00:00:00 | 2013/08/03 23:59:30 |
| KRON        | KRON211k.130   | NONE NONE    | 0.000              | 2013/07/30 10:00:00 | 2013/08/03 22:59:30 |
| KUP2        | KUP2211a.130   | NONE NONE    | 0.000              | 2013/07/30 00:00:00 | 2013/08/03 23:59:30 |
| LOM2        | LOM2211a.130   | NONE NONE    | 0.000              | 2013/07/30 00:00:00 | 2013/08/03 23:59:30 |
| SEST        | SEST211a.130   | NONE NONE    | 0.000              | 2013/07/30 00:00:00 | 2013/08/03 23:59:30 |

## 2 Processing Summary



| Date                | User Stations               | Reference Stations                                                          | Orbit Type |
|---------------------|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------|
| 2013/07/30 00:00:00 | GORN KRON KUP2 LOM2<br>SEST | ARTU BOR1 GLSV JOZ2 KIRU<br>MAR6 MDVJ METS ONSA POLV<br>POTS RIGA TRO1 WSRT | IGS final  |



### 3 Computed Coordinates, ITRF2014

All coordinates are based on the IGS realisation of the ITRF2014 reference frame. All the given ITRF2014 coordinates refer to a mean epoch of the site observation data. All coordinates refer to the Ground Mark.

#### 3.1 Cartesian, ITRF2014

| Station | X (m)       | Y (m)       | Z (m)       | ITRF2014 @ |
|---------|-------------|-------------|-------------|------------|
| GORN    | 2767097.315 | 1614808.609 | 5496655.432 | 30/07/2013 |
| KRON    | 2775646.821 | 1585307.480 | 5500884.679 | 30/07/2013 |
| KUP2    | 2767553.985 | 1622121.481 | 5494279.017 | 30/07/2013 |
| LOM2    | 2783846.492 | 1593451.478 | 5494457.556 | 30/07/2013 |
| SEST    | 2760132.027 | 1590488.952 | 5507184.463 | 30/07/2013 |
| ARTU    | 1843956.511 | 3016203.196 | 5291261.773 | 30/07/2013 |
| BOR1    | 3738358.307 | 1148173.844 | 5021815.845 | 30/07/2013 |
| GLSV    | 3512888.790 | 2068980.004 | 4888903.272 | 30/07/2013 |
| JOZ2    | 3664880.424 | 1409190.724 | 5009618.554 | 30/07/2013 |
| KIRU    | 2251420.649 | 862817.312  | 5885476.791 | 30/07/2013 |
| MAR6    | 2998189.299 | 931451.900  | 5533398.799 | 30/07/2013 |
| MDVJ    | 2845455.888 | 2160954.343 | 5265993.271 | 30/07/2013 |
| METS    | 2892570.636 | 1311843.564 | 5512634.211 | 30/07/2013 |
| ONSA    | 3370658.423 | 711877.262  | 5349787.042 | 30/07/2013 |
| POLV    | 3411557.166 | 2348464.088 | 4834396.947 | 30/07/2013 |
| POTS    | 3800689.501 | 882077.522  | 5028791.408 | 30/07/2013 |
| RIGA    | 3183899.038 | 1421478.610 | 5322810.869 | 30/07/2013 |
| TRO1    | 2102928.331 | 721619.540  | 5958196.326 | 30/07/2013 |
| WSRT    | 3828735.742 | 443305.096  | 5064884.812 | 30/07/2013 |

#### 3.2 Geodetic, GRS80 Ellipsoid, ITRF2014

Geoid-ellipsoidal separations, in this section, are computed using a spherical harmonic synthesis of the global EGM2008 geoid. More information on the EGM2008 geoid can be found at <http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/>.



| Station | Latitude<br>(DMS) | Longitude<br>(DMS) | Ellipsoidal<br>Height (m) | Derived Above<br>Geoid Height (m) |
|---------|-------------------|--------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| GORN    | 59 55 50.45964    | 30 16 00.35021     | 50.487                    | 34.525                            |
| KRON    | 60 00 24.36565    | 29 43 58.07247     | 35.275                    | 19.563                            |
| KUP2    | 59 53 17.72201    | 30 22 31.66544     | 42.958                    | 26.997                            |
| LOM2    | 59 53 28.21589    | 29 47 11.31682     | 61.012                    | 45.081                            |
| SEST    | 60 07 10.57277    | 29 57 07.62582     | 65.353                    | 49.598                            |
| ARTU    | 56 25 47.35927    | 58 33 37.65723     | 247.580                   | 253.904                           |
| BOR1    | 52 16 37.04843    | 17 04 24.45215     | 124.359                   | 88.829                            |
| GLSV    | 50 21 51.06140    | 30 29 48.24600     | 226.317                   | 200.775                           |
| JOZ2    | 52 05 52.21303    | 21 01 56.47335     | 152.527                   | 120.984                           |
| KIRU    | 67 51 26.46981    | 20 58 06.42191     | 391.016                   | 362.131                           |
| MAR6    | 60 35 42.52174    | 17 15 30.70537     | 75.510                    | 50.622                            |
| MDVJ    | 56 01 17.37578    | 37 12 52.22570     | 257.101                   | 241.406                           |
| METS    | 60 13 02.90349    | 24 23 43.16423     | 94.635                    | 75.791                            |
| ONSA    | 57 23 43.08005    | 11 55 31.87123     | 45.605                    | 8.999                             |
| POLV    | 49 36 09.41362    | 34 32 34.55902     | 178.351                   | 159.770                           |
| POTS    | 52 22 45.47488    | 13 03 57.93736     | 144.429                   | 104.004                           |
| RIGA    | 56 56 55.03470    | 24 03 31.59567     | 34.727                    | 13.603                            |
| TRO1    | 69 39 45.78957    | 18 56 22.73945     | 138.112                   | 106.666                           |
| WSRT    | 52 54 52.60441    | 6 36 16.22761      | 82.298                    | 40.535                            |

### 3.3 UTM Grid, GRS80 Ellipsoid, ITRF2014

| Station | East<br>(m) | North<br>(m) | Zone | Ellipsoidal<br>Height (m) | Derived Above<br>Geoid Height (m) |
|---------|-------------|--------------|------|---------------------------|-----------------------------------|
| GORN    | 347256.464  | 6646845.411  | 36   | 50.487                    | 34.525                            |
| KRON    | 652369.100  | 6655312.962  | 35   | 35.275                    | 19.563                            |
| KUP2    | 353141.496  | 6641877.045  | 36   | 42.958                    | 26.997                            |
| LOM2    | 655902.879  | 6642571.757  | 35   | 61.012                    | 45.081                            |
| SEST    | 664031.044  | 6668396.541  | 35   | 65.353                    | 49.598                            |
| ARTU    | 596234.991  | 6255011.309  | 40   | 247.580                   | 253.904                           |
| BOR1    | 641456.232  | 5793867.927  | 33   | 124.359                   | 88.829                            |
| GLSV    | 321967.664  | 5582119.540  | 36   | 226.317                   | 200.775                           |
| JOZ2    | 502216.254  | 5771920.502  | 34   | 152.527                   | 120.984                           |
| KIRU    | 498672.965  | 7526960.874  | 34   | 391.016                   | 362.131                           |
| MAR6    | 623689.453  | 6719818.313  | 33   | 75.510                    | 50.622                            |
| MDVJ    | 388711.273  | 6209909.864  | 37   | 257.101                   | 241.406                           |
| METS    | 355696.924  | 6678478.607  | 35   | 94.635                    | 75.791                            |
| ONSA    | 675798.512  | 6365172.411  | 32   | 45.605                    | 8.999                             |
| POLV    | 611484.122  | 5495592.444  | 36   | 178.351                   | 159.770                           |
| POTS    | 368367.629  | 5804986.116  | 33   | 144.429                   | 104.004                           |
| RIGA    | 321112.582  | 6315516.516  | 35   | 34.727                    | 13.603                            |
| TRO1    | 420097.301  | 7729608.465  | 34   | 138.112                   | 106.666                           |
| WSRT    | 338933.408  | 5865458.612  | 32   | 82.298                    | 40.535                            |



### 3.4 Positional Uncertainty (95% C.L.) - Geodetic, ITRF2014

| Station | Longitude(East) (m) | Latitude(North) (m) | Ellipsoidal Height(Up) (m) |
|---------|---------------------|---------------------|----------------------------|
| GORN    | 0.003               | 0.003               | 0.006                      |
| KRON    | 0.003               | 0.003               | 0.006                      |
| KUP2    | 0.003               | 0.003               | 0.006                      |
| LOM2    | 0.003               | 0.003               | 0.006                      |
| SEST    | 0.003               | 0.003               | 0.006                      |
| ARTU    | 0.004               | 0.002               | 0.006                      |
| BOR1    | 0.003               | 0.002               | 0.005                      |
| GLSV    | 0.003               | 0.002               | 0.005                      |
| JOZ2    | 0.003               | 0.002               | 0.005                      |
| KIRU    | 0.003               | 0.003               | 0.006                      |
| MAR6    | 0.003               | 0.002               | 0.005                      |
| MDVJ    | 0.003               | 0.002               | 0.006                      |
| METS    | 0.003               | 0.002               | 0.006                      |
| ONSA    | 0.003               | 0.002               | 0.006                      |
| POLV    | 0.003               | 0.002               | 0.005                      |
| POTS    | 0.003               | 0.002               | 0.005                      |
| RIGA    | 0.003               | 0.003               | 0.006                      |
| TRO1    | 0.003               | 0.003               | 0.006                      |
| WSRT    | 0.003               | 0.002               | 0.005                      |





## 4 Ambiguity Resolution - Per Baseline

| Baseline    | Ambiguities Resolved | Baseline Length (km) |
|-------------|----------------------|----------------------|
| GLSV - POLV | 93.9 %               | 302.242              |
| GLSV - JOZ2 | 94.0 %               | 687.747              |
| KIRU - TRO1 | 93.5 %               | 217.428              |
| POTS - RIGA | 78.2 %               | 870.535              |
| SEST - GORN | 98.3 %               | 27.401               |
| KIRU - GORN | 97.6 %               | 991.259              |
| BOR1 - POTS | 90.0 %               | 273.388              |
| LOM2 - GORN | 98.3 %               | 27.230               |
| JOZ2 - ONSA | 92.4 %               | 829.775              |
| JOZ2 - POTS | 89.3 %               | 544.665              |
| ARTU - GLSV | 96.8 %               | 1960.729             |
| KIRU - MAR6 | 92.8 %               | 828.452              |
| JOZ2 - METS | 94.6 %               | 926.803              |
| KRON - LOM2 | 99.7 %               | 13.224               |
| POTS - WSRT | 91.0 %               | 441.147              |
| GLSV - MDVJ | 90.1 %               | 772.090              |
| JOZ2 - MAR6 | 94.6 %               | 973.169              |
| KUP2 - GORN | 99.0 %               | 7.703                |
| AVERAGE     | 93.6%                | 594.166              |

Please note for a regional solution, such as used by AUSPOS, ambiguity resolution success rate of **50%** or better for a baseline formed by a user site indicates a reliable solution.



## 5 Computation Standards

### 5.1 Computation System

|                |                                    |
|----------------|------------------------------------|
| Software       | Bernese GNSS Software Version 5.2. |
| GNSS system(s) | GPS only.                          |

### 5.2 Data Preprocessing and Measurement Modelling

|                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Data preprocessing                       | Phase preprocessing is undertaken in a baseline by baseline mode using triple-differences. In most cases, cycle slips are fixed by the simultaneous analysis of different linear combinations of L1 and L2. If a cycle slip cannot be fixed reliably, bad data points are removed or new ambiguities are set up. A data screening step on the basis of weighted postfit residuals is also performed, and outliers are removed. |
| Basic observable                         | Carrier phase with an elevation angle cutoff of $7^\circ$ and a sampling rate of 3 minutes. However, data cleaning is performed a sampling rate of 30 seconds. Elevation dependent weighting is applied according to $1/\sin(e)^2$ where $e$ is the satellite elevation.                                                                                                                                                       |
| Modelled observable                      | Double differences of the ionosphere-free linear combination.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Ground antenna phase centre calibrations | IGS14 absolute phase-centre variation model is applied.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Tropospheric Model                       | A priori model is the GMF mapped with the DRY-GMF.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Tropospheric Estimation                  | Zenith delay corrections are estimated relying on the WET-GMF mapping function in intervals of 2 hour. N-S and E-W horizontal delay parameters are solved for every 24 hours.                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Tropospheric Mapping Function            | GMF                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Ionosphere                               | First-order effect eliminated by forming the ionosphere-free linear combination of L1 and L2. Second and third effect applied.                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Tidal displacements                      | Solid earth tidal displacements are derived from the complete model from the IERS Conventions 2010, but ocean tide loading is not applied.                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Atmospheric loading                      | Applied                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Satellite centre of mass correction      | IGS14 phase-centre variation model applied                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Satellite phase centre calibration       | IGS14 phase-centre variation model applied                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Satellite trajectories                   | Best available IGS products.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Earth Orientation                        | Best available IGS products.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |



### 5.3 Estimation Process

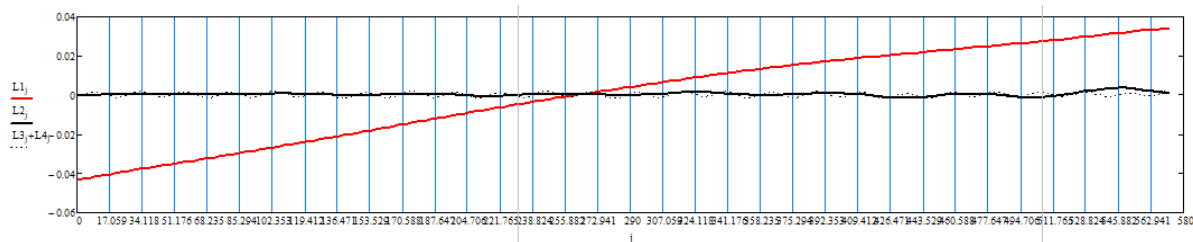
|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Adjustment             | Weighted least-squares algorithm.                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Station coordinates    | Coordinate constraints are applied at the Reference sites with standard deviation of 1mm and 2mm for horizontal and vertical components respectively.                                                                                                                                       |
| Troposphere            | Zenith delay parameters and pairs of horizontal delay gradient parameters are estimated for each station in intervals of 2 hours and 24 hours.                                                                                                                                              |
| Ionospheric correction | An ionospheric map derived from the contributing reference stations is used to aid ambiguity resolution.                                                                                                                                                                                    |
| Ambiguity              | Ambiguities are resolved in a baseline-by-baseline mode using the Code-Based strategy for 180-6000km baselines, the Phase-Based L5/L3 strategy for 18-200km baselines, the Quasi-Ionosphere-Free (QIF) strategy for 18-2000km baselines and the Direct L1/L2 strategy for 0-20km baselines. |

### 5.4 Reference Frame and Coordinate Uncertainty

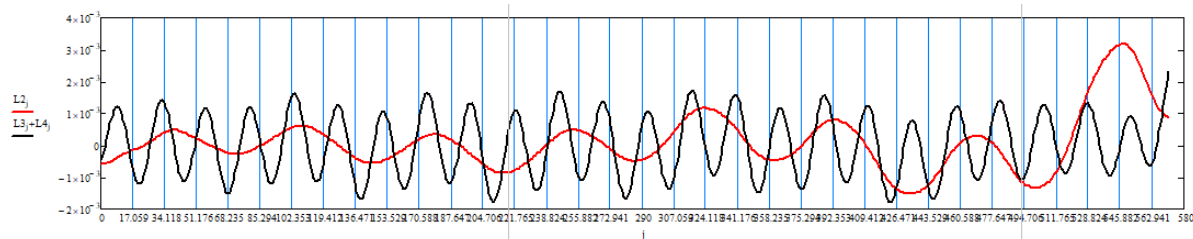
|                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Terrestrial reference frame | IGS14 station coordinates and velocities mapped to the mean epoch of observation.                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Australian datums           | GDA2020 and GDA94.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Derived AHD                 | For stations within Australia, AUSGeoid2020 (V20180201) is used to compute AHD. AUSGeoid2020 is the Australia-wide gravimetric quasigeoid model that has been a posteriori fitted to the AHD. For reference, derived AHD is always determined from the GDA2020 coordinates. In the GDA94 section of the report, AHD values are assumed to be identical to those derived from GDA2020. |
| Above-geoid heights         | Earth Gravitational Model EGM2008 released by the National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) EGM Development Team is used to compute above-geoid heights. This gravitational model is complete to spherical harmonic degree and order 2159, and contains additional coefficients extending to degree 2190 and order 2159.                                                          |
| Coordinate uncertainty      | Coordinate uncertainty is expressed in terms of the 95% confidence level for GDA94, GDA2020 and ITRF2014. Uncertainties are scaled using an empirically derived model which is a function of data span, quality and geographical location.                                                                                                                                            |

## Приложение С. Графики временных рядов

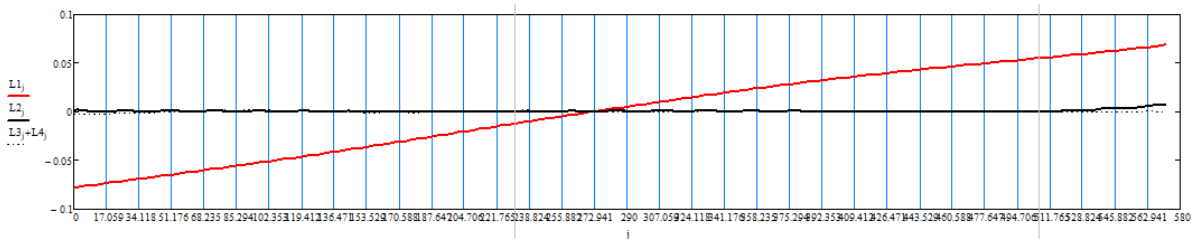
**GORN (направление Ю-С), период 2013-2020 гг., обработано методом PPP, тренд**



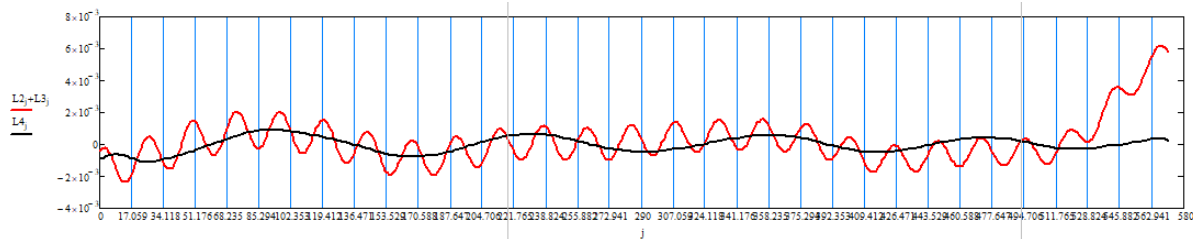
**GORN (направление Ю-С), период 2013-2020 гг., обработано методом PPP, период**



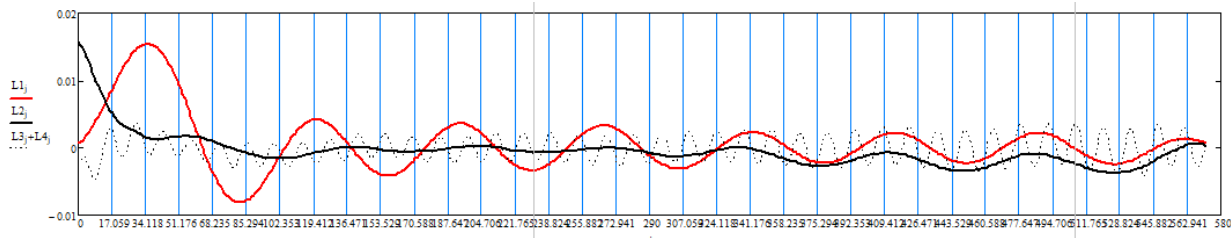
**GORN (направление З-В), период 2013-2020 гг., обработано методом PPP, тренд**



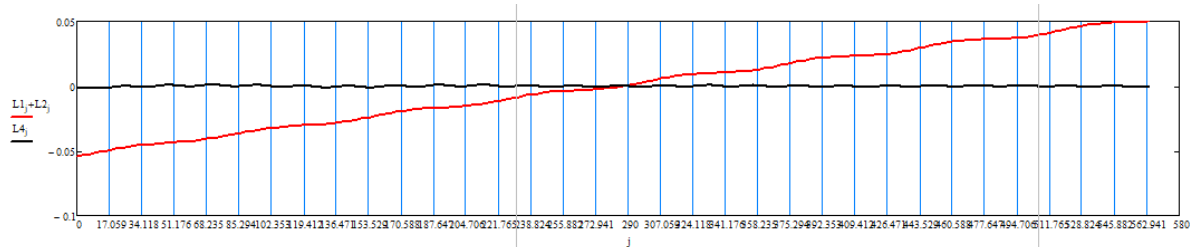
**GORN (направление З-В), период 2013-2020 гг., обработано методом PPP, период**



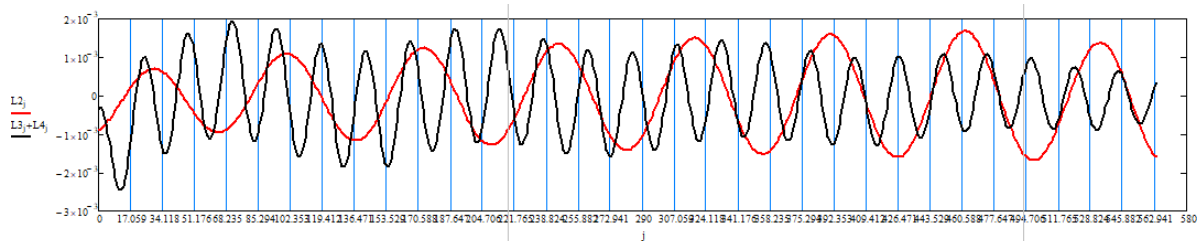
**GORN (высота), период 2013-2020 гг., обработано методом PPP**



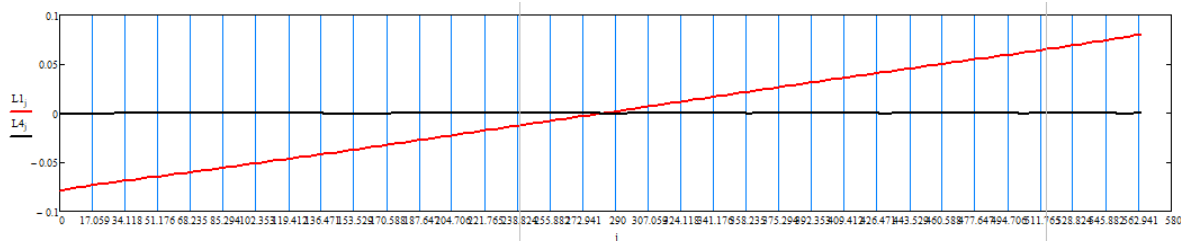
**KRON (направление Ю-С), период 2013-2020 гг., обработано методом PPP, тренд**



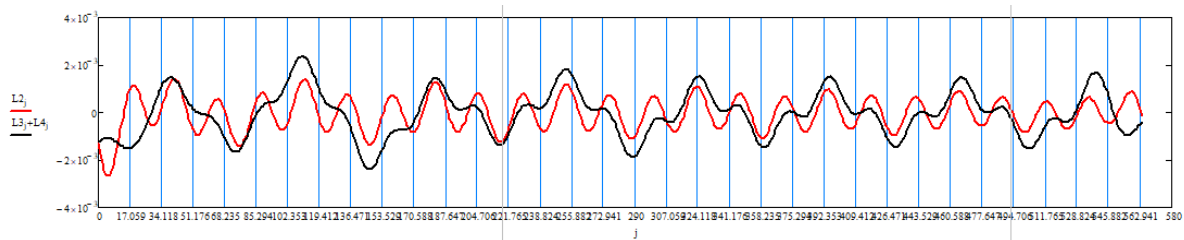
**KRON (направление Ю-С), период 2013-2020 гг., обработано методом PPP, период**



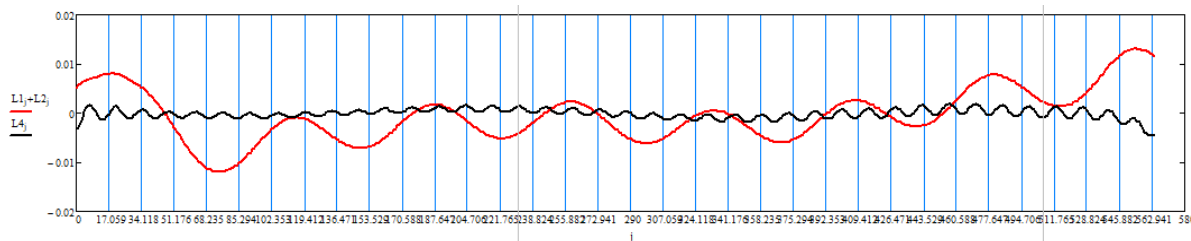
**KRON (направление З-В), период 2013-2020 гг., обработано методом PPP, тренд**



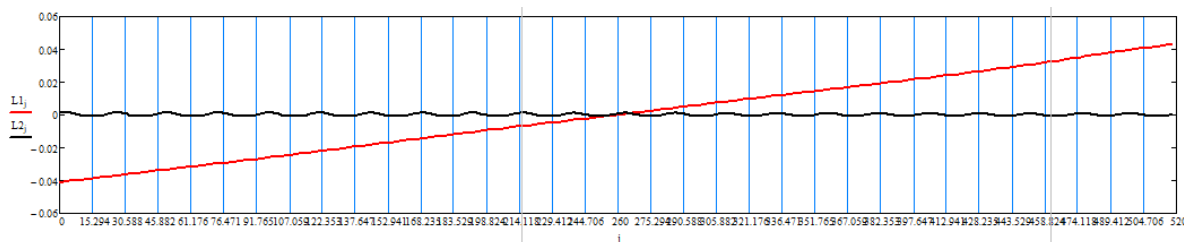
**KRON (направление З-В), период 2013-2020 гг., обработано методом PPP, период**



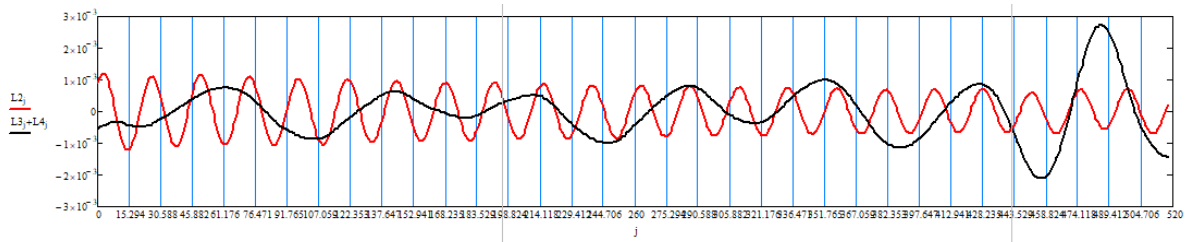
**KRON (высота), период 2013-2020 гг., обработано методом PPP**



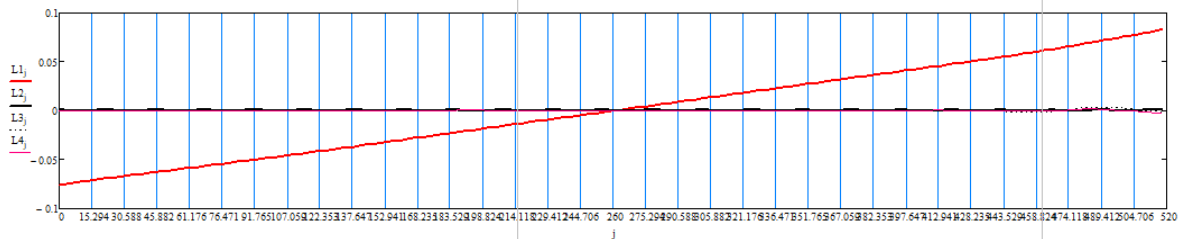
**KUP2 (направление Ю-С), период 2013-2020 гг., обработано методом PPP, тренд**



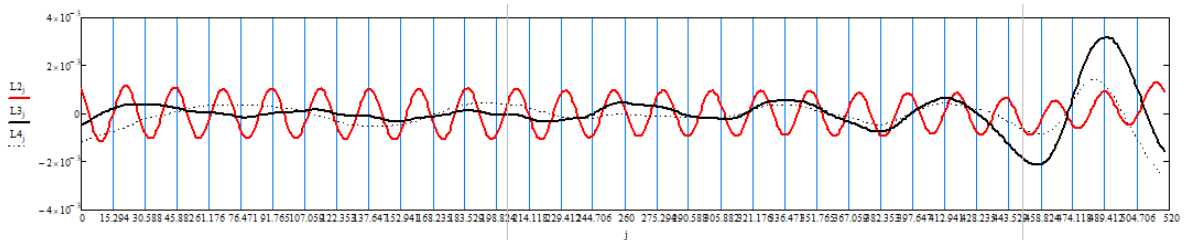
**KUP2 (направление Ю-С), период 2013-2020 гг., обработано методом PPP, период**



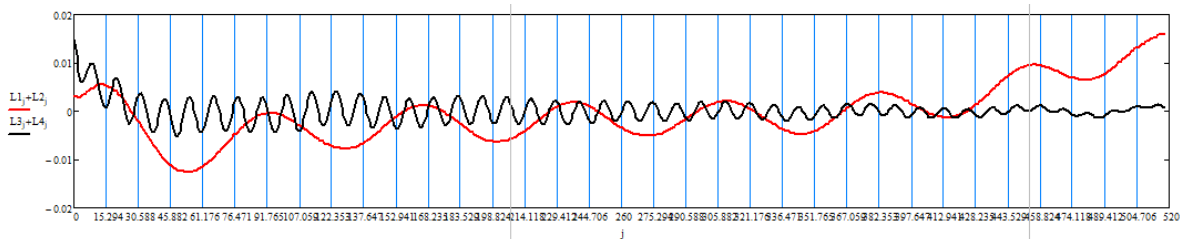
**KUP2** (направление 3-B), период 2013-2020 гг., обработано методом PPP, тренд



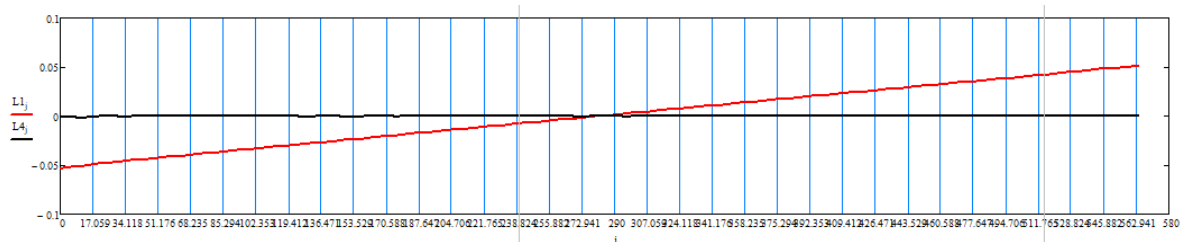
**KUP2** (направление 3-B), период 2013-2020 гг., обработано методом PPP, период



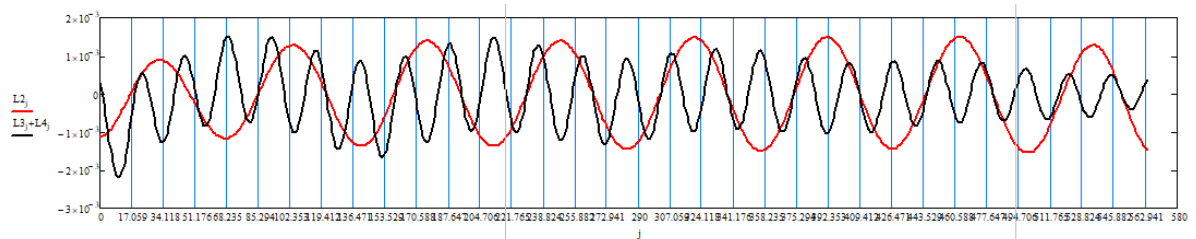
**KUP2** (высота), период 2013-2020 гг., обработано методом PPP



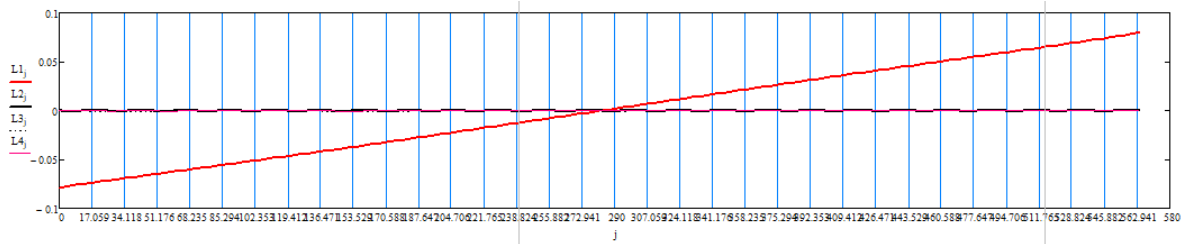
**LOM2** (направление Ю-С), период 2013-2020 гг., обработано методом PPP, тренд



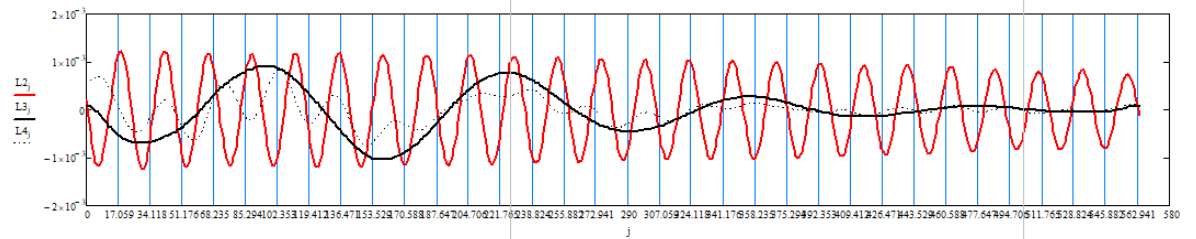
**LOM2** (направление Ю-С), период 2013-2020 гг., обработано методом PPP, период



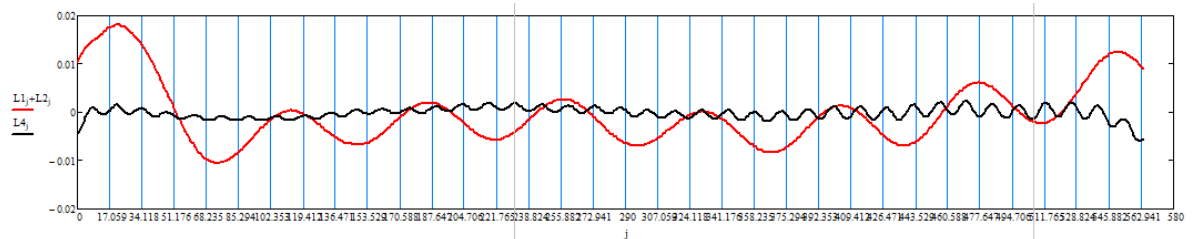
**LOM2** (направление 3-B), период 2013-2020 гг., обработано методом PPP, тренд



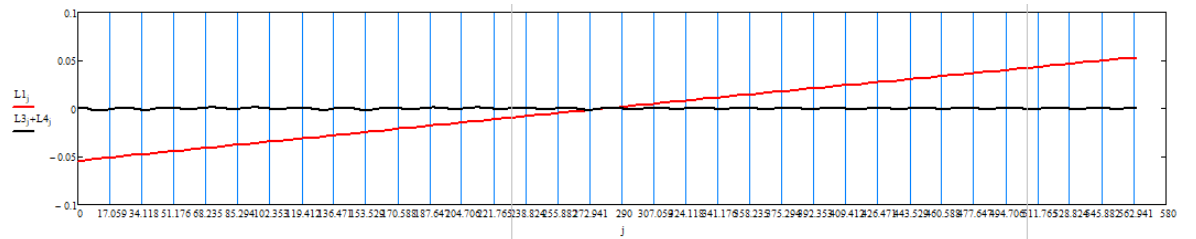
**LOM2 (направление 3-B), период 2013-2020 гг., обработано методом PPP, период**



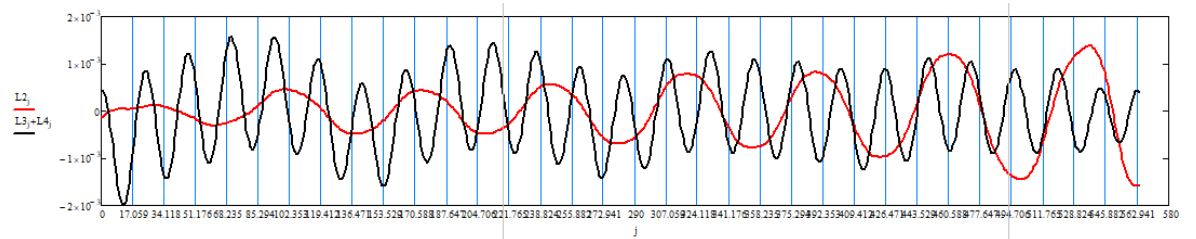
**LOM2 (высота), период 2013-2020 гг., обработано методом PPP**



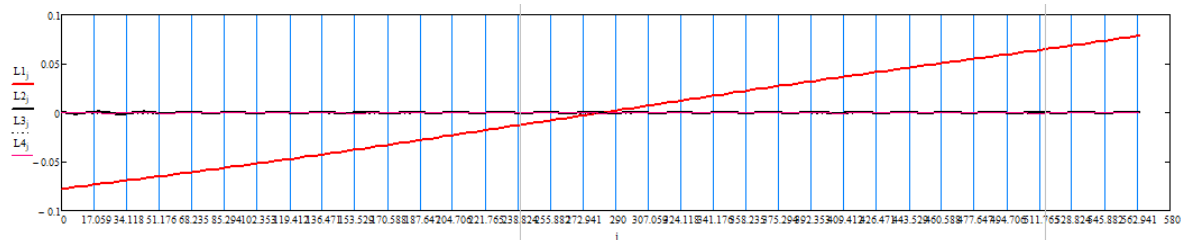
**SEST (направление Ю-С), период 2013-2020 гг., обработано методом PPP, тренд**



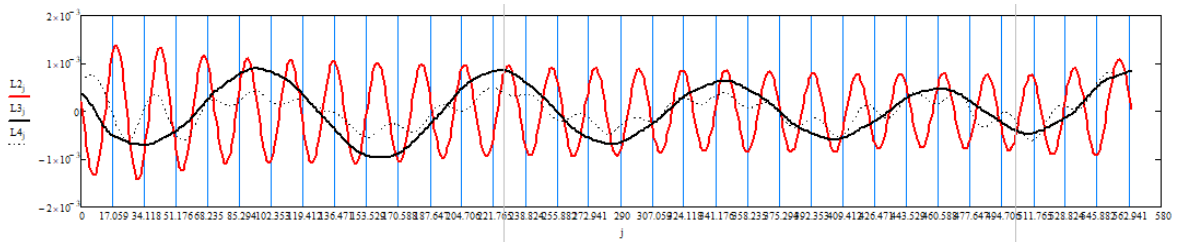
**SEST (направление Ю-С), период 2013-2020 гг., обработано методом PPP, период**



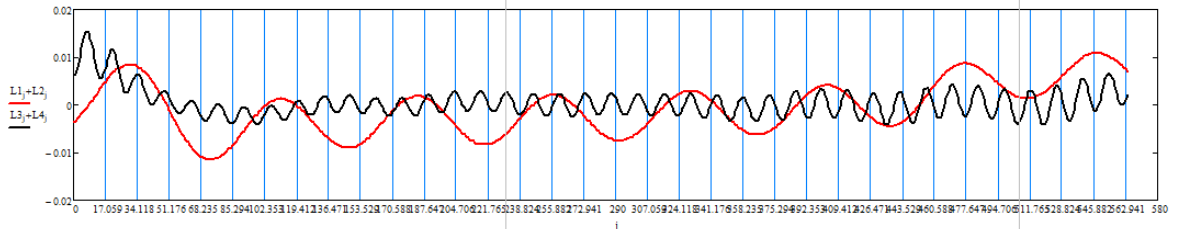
**SEST (направление 3-B), период 2013-2020 гг., обработано методом PPP, тренд**



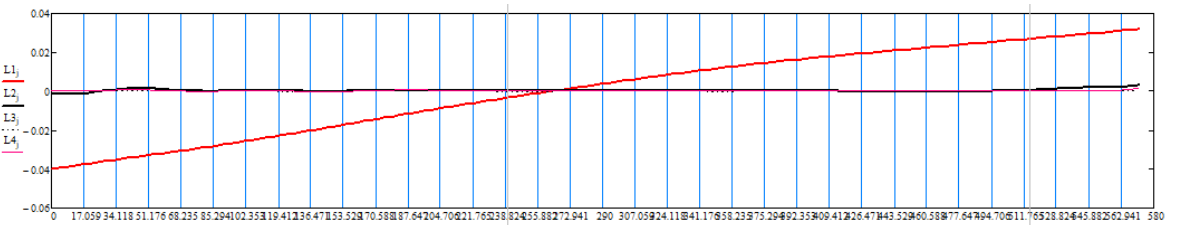
**SEST (направление 3-B), период 2013-2020 гг., обработано методом PPP, период**



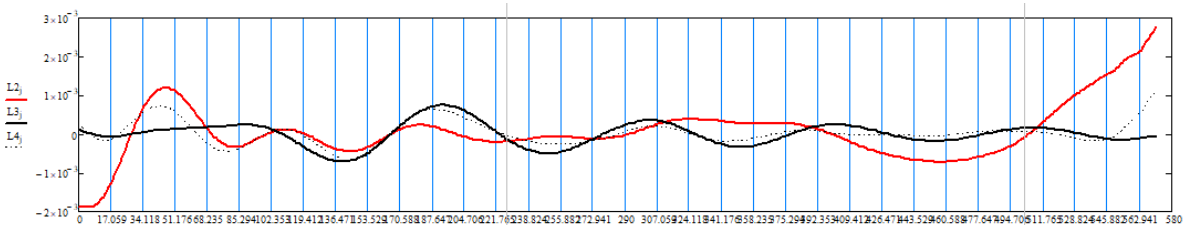
**SEST (высота), период 2013-2020 гг., обработано методом PPP**



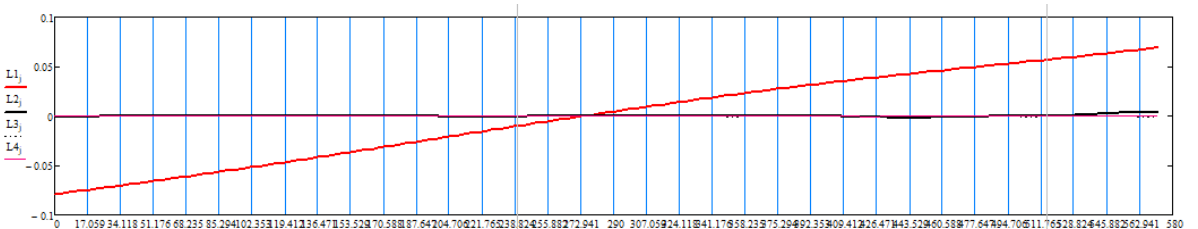
**GORN (направление Ю-С), период 2013-2020 гг., обработано относительным методом, тренд**



**GORN (направление Ю-С), период 2013-2020 гг., обработано относительным методом, период**

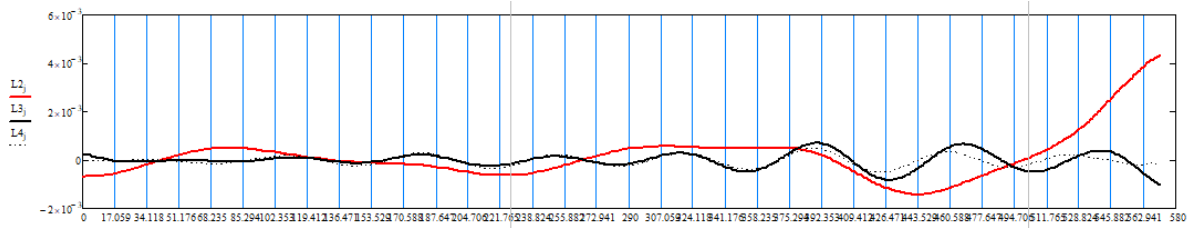


**GORN (направление З-В), период 2013-2020 гг., обработано относительным методом, тренд**

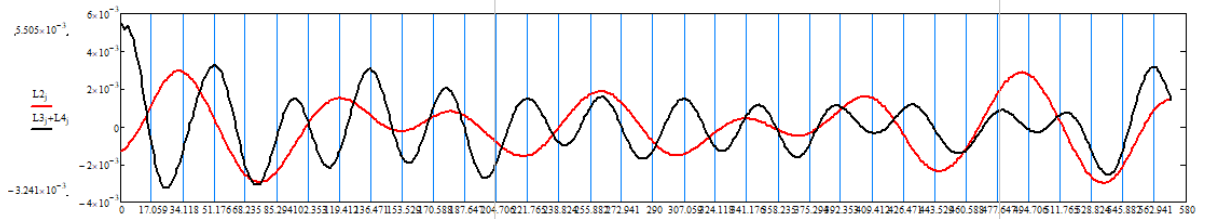


**GORN (направление З-В), период 2013-2020 гг., обработано относительным методом, период**

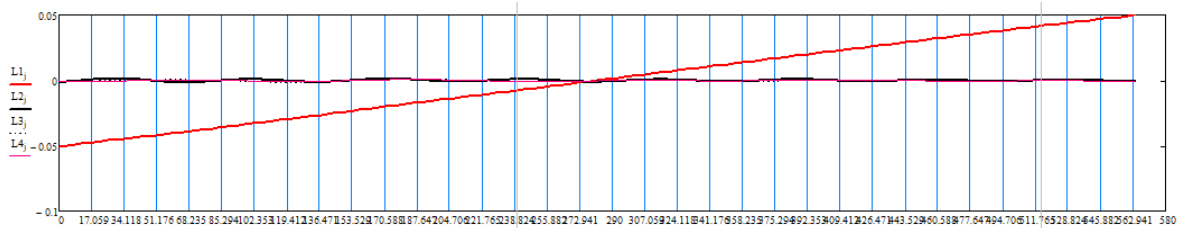




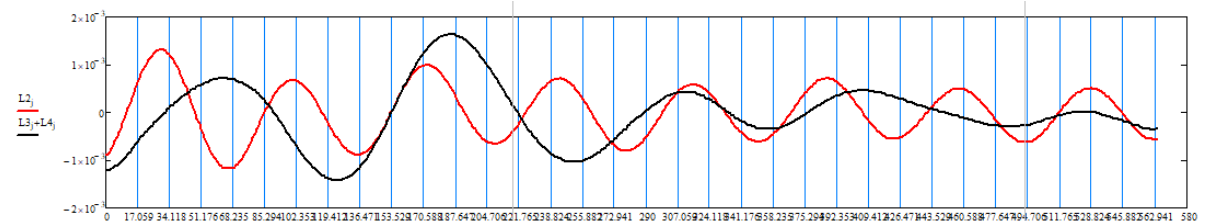
**GORN (высота), период 2013-2020 гг., обработано относительным методом**



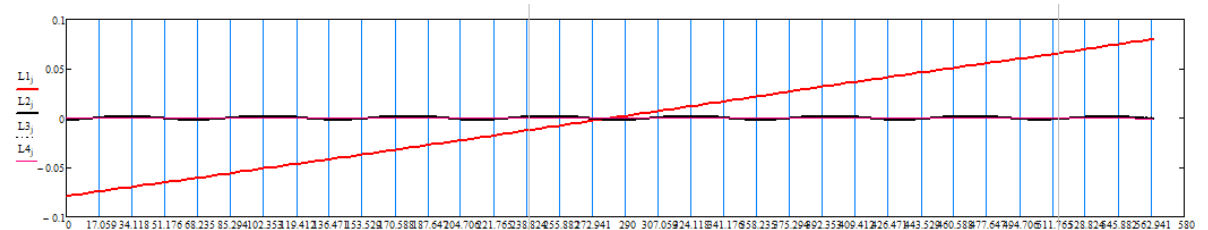
**KRON (направление Ю-С), период 2013-2020 гг., обработано относительным методом, тренд**



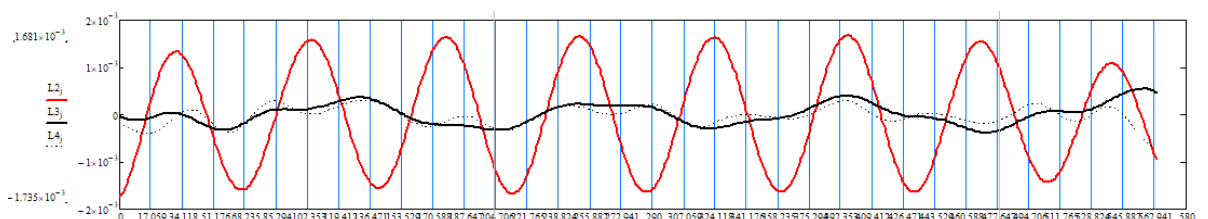
**KRON (направление Ю-С), период 2013-2020 гг., обработано относительным методом, период**



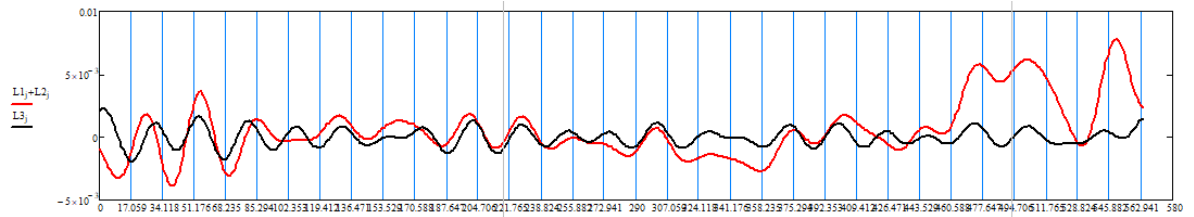
**KRON (направление З-В), период 2013-2020 гг., обработано относительным методом, тренд**



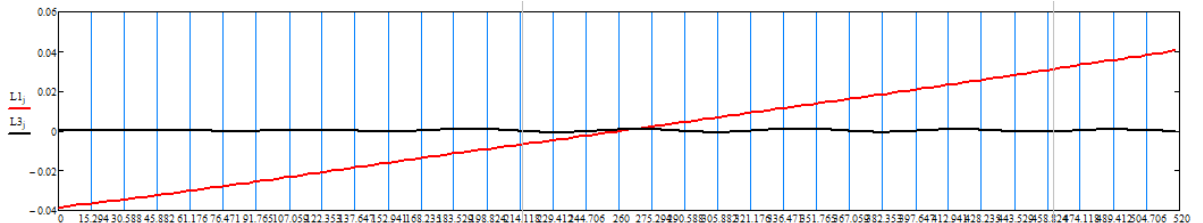
**KRON (направление З-В), период 2013-2020 гг., обработано относительным методом, период**



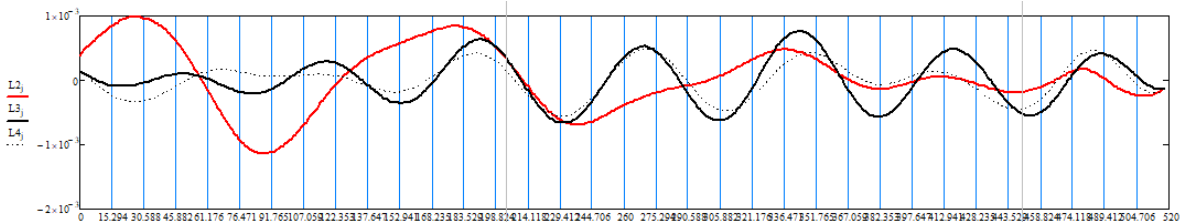
**KRON (высота), период 2013-2020 гг., обработано относительным методом**



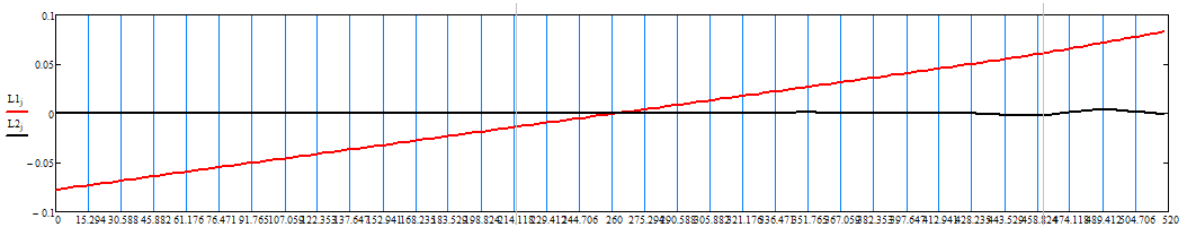
**KUP2 (направление Ю-С), период 2013-2020 гг., обработано относительным методом, тренд**



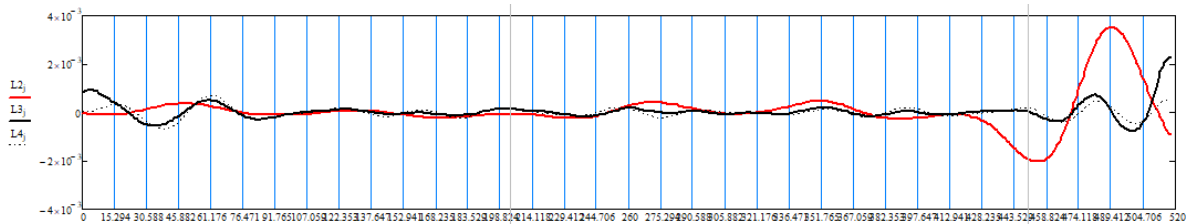
**KUP2 (направление Ю-С), период 2013-2020 гг., обработано относительным методом, период**



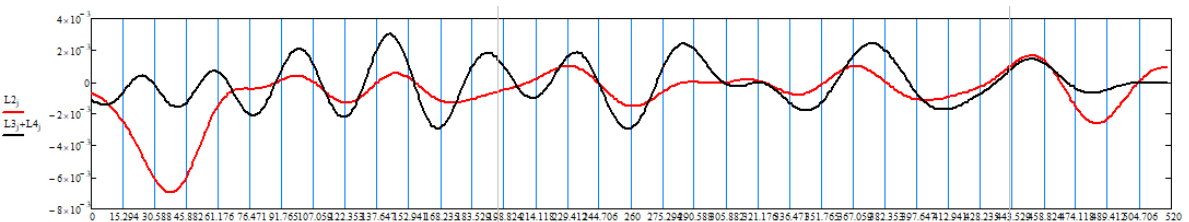
**KUP2 (направление З-В), период 2013-2020 гг., обработано относительным методом, тренд**



**KUP2 (направление З-В), период 2013-2020 гг., обработано относительным методом, период**

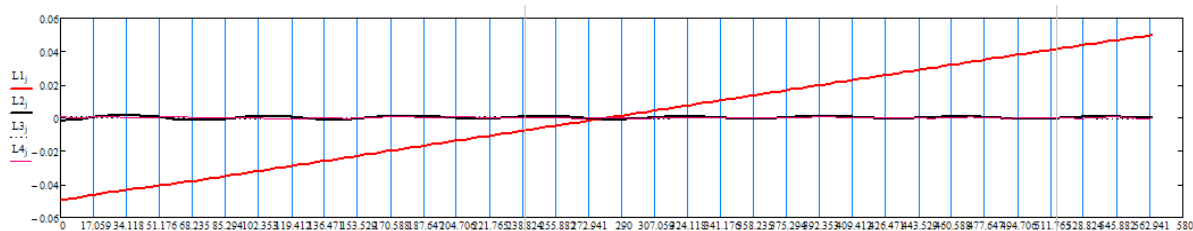


**KUP2 (высота), период 2013-2020 гг., обработано относительным методом**



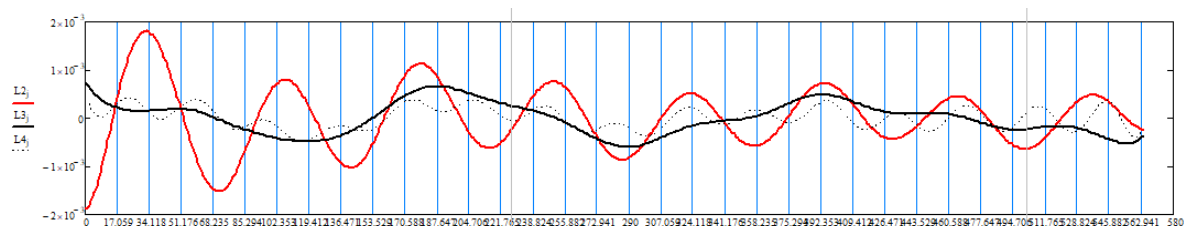
**LOM2** (направление Ю-С), период 2013-2020 гг., обработано относительным методом,

тренд

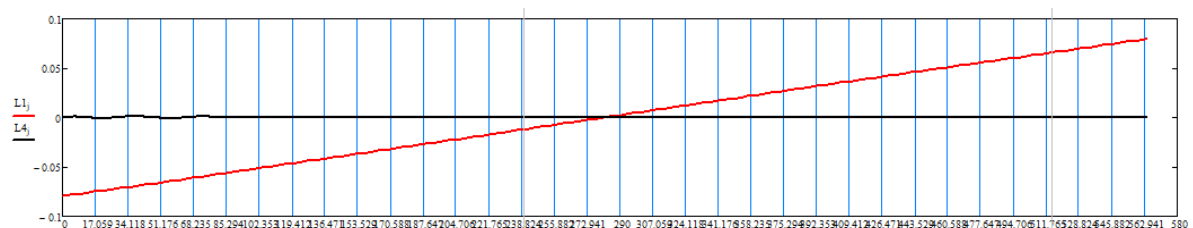


**LOM2** (направление Ю-С), период 2013-2020 гг., обработано относительным методом,

период

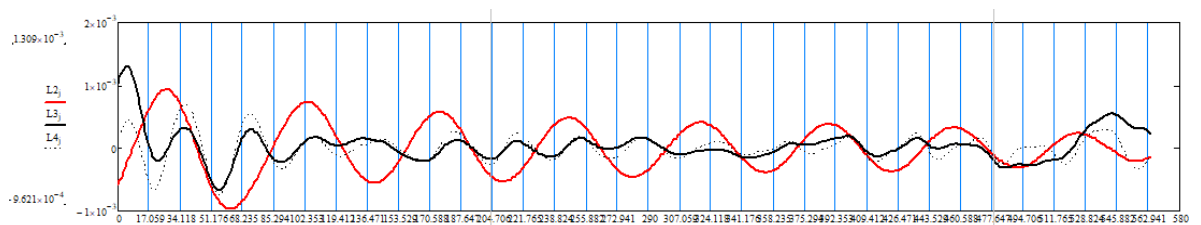


**LOM2** (направление З-В), период 2013-2020 гг., обработано относительным методом, тренд

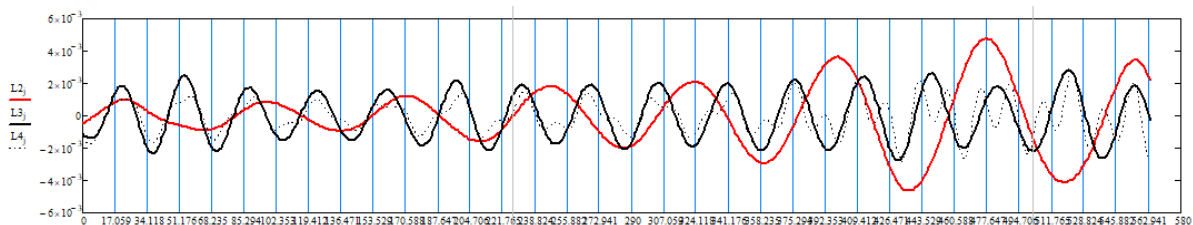


**LOM2** (направление З-В), период 2013-2020 гг., обработано относительным методом,

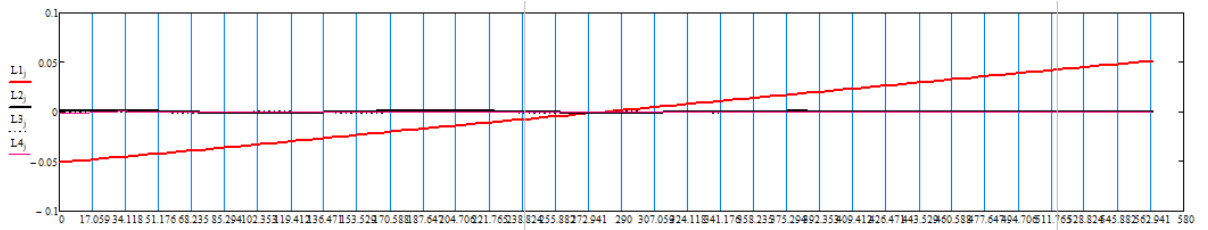
период



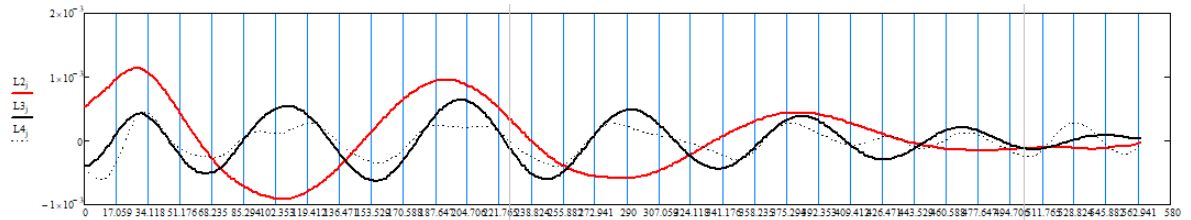
**LOM2** (высота), период 2013-2020 гг., обработано относительным методом



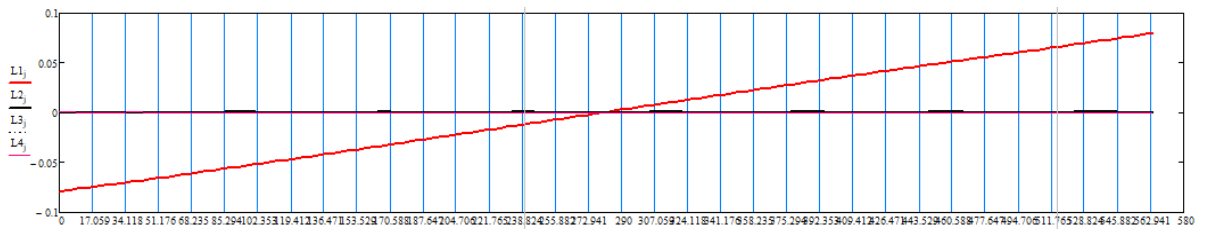
**SEST** (направление Ю-С), период 2013-2020 гг., обработано относительным методом, тренд



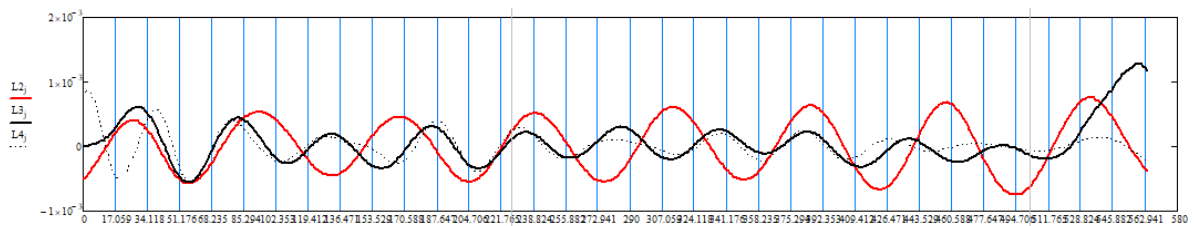
**SEST (направление Ю-С), период 2013-2020 гг., обработано относительным методом, период**



**SEST (направление З-В), период 2013-2020 гг., обработано относительным методом, тренд**



**SEST (направление З-В), период 2013-2020 гг., обработано относительным методом, период**



**SEST (высота), период 2013-2020 гг., обработано относительным методом**

