

Санкт-Петербургский государственный университет

СЮЗЮМОВ Арсений Алексеевич

Выпускная квалификационная работа

Анализ изменений в положении постоянно действующих станций ГНСС

Уровень образования: *бакалавриат*

Направление 05.03.03 *«Картография и геоинформатика»*

Основная образовательная программа СВ.5020.2015 *«Картография и геоинформатика»*

Профиль *«Геоинформатика»*

Научный руководитель:

Тюрин Сергей Вячеславович

доцент, кафедра картографии и

геоинформатики, кандидат технических

наук.

Рецензент:

Флёров Даниил Геннадьевич

начальник отдела обеспечения сети

референцных станций

СПб ГКУ ЦИОГД

Санкт-Петербург

2019

Оглавление

Введение.....	3
Глава 1. Обзор существующей литературы и программного обеспечения.....	5
1.1. Обзор литературы.....	5
1.2. Обзор существующего программного обеспечения.....	9
Глава 2. Геодезический мониторинг с применением ГНСС-технологий.....	12
Глава 3. Способы позиционирования.....	15
3.1. Абсолютный способ позиционирования.....	15
3.2. Относительный способ позиционирования.....	18
Глава 4. Метод анализа временных рядов «Гусеница»– SSA.....	22
Глава 5. Анализ изменений в положении постоянно действующих станций ГНСС.....	33
5.1. Подготовка данных для исследований.....	35
5.2. Обработка данных относительным методом.....	35
5.3. Обработка данных абсолютным методом.....	36
5.4. Обработка временных рядов методом «Гусеница» – SSA.....	38
5.4.1 Анализ взаимного положения станций относительным методом.....	39
5.4.2 Анализ взаимного положения станций по стратегии PPP.....	42
5.4.3 Анализ координат, полученных по стратегии PPP.....	46
5.5. Анализ периодических движений станций.....	48
Заключение.....	53
Литература.....	54
Приложение А.....	58
Приложение В.....	61
Приложение С.....	67

Введение

Современный этап развития геодезических работ невозможно представить без использования ГНСС-технологий (англ. GNSS, Global Navigation Satellite System). Внедрение такого рода технологий коренным образом повлияло на методы и подходы в построении государственных геодезических сетей, в строительстве и инженерных изысканиях; кроме того, не остались в стороне и научные исследования от наблюдений за движениями земной коры на региональных и глобальных уровнях (Курошев, 2011).

Геодезические наблюдения с использованием спутниковых измерений имеют несколько отличительных черт по сравнению с классическими методами. Главным и принципиальным отличием является непрерывность измерений. Применение спутниковых наблюдений позволяет в режиме реального времени с различным временным диапазоном получить высокочастотные колебания, тогда как классические методы не позволяют проводить измерения с такой периодичностью, чаще интервалы составляют год, полгода, месяц, что затрудняет выявление сезонных, месячных, суточных периодик или делает это вовсе невозможным. Следующим отличием является уровень автоматизации получения данных, фактор ошибки исполнителя сведён к минимальному значению. Ещё одним из достоинств можно считать снижение зависимости от климатических условий.

Геодезический мониторинг с применением ГНСС-технологий активно развивается во всём мире. Внедрение и совершенствование спутниковых измерений успешно проводится специалистами и учёными из Российской Федерации. Благодаря своим достоинствам, в том числе уровню автоматизации и непрерывности наблюдений, технологии геодезического мониторинга получили широкое применение во многих отраслях науки, промышленности и строительства.

Актуальность работы заключается в том, что изучение движений референцных станций и выявление их причин при организации геодезического мониторинга различных объектов ведёт к повышению точности результатов мониторинга и их достоверности.

Целью работы является выявление и анализ изменений в положении постоянно действующих станций ГНСС.

Для достижения поставленной цели в работе выдвинуто ряд задач, которые необходимо решить:

- изучение существующих методов геодезического мониторинга с использованием ГНСС-технологий и литературы, посвященной анализу изменений в положении постоянно действующих станций ГНСС;

- изучение существующих методик обработки спутниковых измерений (в частности, относительного метода и метода Precise Point Positioning);
- изучение существующего программного обеспечения и освоение навыков работы с ним;
- изучение методов обработки временных рядов (в частности, метод «Гусеница»-SSA)
- подготовка данных к дальнейшей обработке из архивов сети постоянно действующих станций ГНСС на территорию г. Санкт-Петербург;
- обработка результатов измерений с использованием различного программного обеспечения и методов;
- исследование колебаний в положении станций ГНСС постоянно действующих станций комитета по градостроительству и архитектуре г. Санкт-Петербург (далее КГА СПб);
- анализ изменений положения постоянно действующих станций ГНСС.

Объектом исследования в работе являются постоянно действующие станции ГНСС, а предметом исследования – положение постоянно действующих станций ГНСС.

Научная значимость работы заключается в том, что ГНСС-технологии, широко применяемые в различных областях деятельности человека, помогают выделить изменения в положении природных или антропогенных объектов исследований, обеспечивают проведение их дальнейшего анализа, определения критичных изменений и их причин, и, следовательно, предотвращения аварий различного рода, позволяют прогнозировать динамику изменений и меры по устранению факторов, негативно влияющих на объект. Следовательно, изучение движения постоянно действующих станций ГНСС и выявление причин этих колебаний является важным для повышения надёжности результатов и их достоверности.

Глава 1. Обзор существующей литературы и программного обеспечения

1.1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Материалами, используемыми при написании работы, послужили различные источники: публикации из периодических изданий; сборники трудов конференций; учебно-методическая литература и др.

Основополагающими источниками стали монография в двух томах Антоновича К.М. «Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии»; учебное пособие «Космическая геодезия и глобальные системы позиционирования» и учебник «Геодезия и география» Курошева Г.Д. Данные источники подробно описывают устройство спутниковых систем, аппаратуры пользовательских систем, в них приведены основы теории движения искусственных спутников Земли, также они содержат основные сведения о методах наблюдений и обработке спутниковых измерений.

В ходе работы были использованы публикации за последние пять лет из изданий, посвященных данной специальности. Для выявления основных направлений научных исследований и разработок были использованы отечественные и зарубежные журналы: «Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка», «Геодезия и картография», «Вестник СГУГиТ», «Геопрофи», «Journal of Geodesy», «Geodesy and Cartography», «Marine Geodesy», «Survey Review» и др.

Публикации, посвященные исследованию и применению спутниковых измерений, можно разделить на несколько групп:

- изучение влияния различных слоёв атмосферы на результаты спутниковых измерений и применение спутниковых измерений в исследованиях атмосферы: Антонович К.М., Косарев Н.С. и др.; Алпатов В.В., Васильев А.Е.; Куприянов А.О., Тихонов В.В. и др.; Вшивкова О.В.; Дударев В.И.; Khunphut Prakanrattana, Charlemchon Satirapod; Fei Li, Jentao Lei и др.; M. Abdelazeem, R.N. Çelik и др.; Liangke Huang, Weiping Jiang и др.; Fu Zheng, Yidong Lou и др.
- исследования геодинамики регионов и геодезический мониторинг с использованием спутниковых измерений: Горшков В.Л., Щербаков Н.В.; Уткин В.И. и др.; Устинов А.В., Кафтан В.И.; Билянский В.В. и др.; Гаврилов С.Г., Шаров К.В. и др.; Войтенко А.В.; Тимофеев В.Ю., Адрюков Д.Г. и др.; Басманов А.В.; Канушин В.Ф., Карпик А.П. и др.; Cemal Ozer Yigit, Eralp Gurlek; K.O. Hastaoglu, F. Poyarz и др.; H. Zhao, Q. Zhang и др.; D. Vrublová, R. Kapica.

- исследование референчных станций и особенностей их использования: Богданец Е.С., Черёмухина О.О.; H. Munekane; A. Mémin, C. Watson и др; Yanming Feng, Shengfeng Gu и др; M. Bloßfeld, M. Seitz и др.
- технологии и модернизация обработки спутниковых сигналов: Фялковский А.Л.; Мустафин М.Г., Юнес Ж.А.; Косарев Н.С., Щербаков А.С.; Шендрик Н.К.; Ялтыхов В.В., Маркович К.И.; Xing Wang, Wen Xiang Liu и др.; Z. Nie, Y. Gao и др.; O. Yanchuk, R. Shulgan и др.; Xingxing Li, Xinghan Chen и др.; A. Khodabanden, P.J.G. Teunissen.
- исследование метода точного дифференциального позиционирования (PPP): Шевчук С.О., Мелеск А.Х., Косарев Н.С.; Антонович К.М., Липатников Л.А.; Мельников А.Ю.; H. Yang, C. Xu, Y. Gao; Mohammad Ali Goudarzi, Simon Banville и др.; C. Aydin, S. Ö. Uygur; M. Deo, A. El – Mowaty; M. Abd Rabbou, A. El Shazly.
- исследование ГНСС-технологий как инструмента по созданию сетей координат: Красников Д.М., Серебряков С.В.; Сысолятина Л.В., Левитская Т.И.; Побединский Г.Г.; Мазурова Е.М., Антонович К.М. и др.; Шульц Р.В., Терещук А.И. и др.; M. Amin Alizadeh – Khameneh, E. Sjöberg и др.; J. Yu, G. Wang; T. Saari, M. Routanen и др.; A. Zakarevičius, S. Šliaupa и др.; S. Glasser, R. König и др.
- программное обеспечение и развитие рынка ПО для спутниковых измерений: Шевчук С.О., Косарев М.А., Антонович К.М.; Акулова Е.А., Назаров И.В.; Малютин К.И., Шевчук С.О.; Сохранов А.С.; Матухнов С.С.; Грохольский Д.В.; Seda Cetin, Cuneyt Aydin и др; X. Niu, Q. Zhang и др.
- применение ГНСС-технологий в различных научных областях: Мысленков С.А., Самсонов Т.Е.; Wu Chen, Congwei Hu, Zihua Li и др; F. Fund, F. Perosanz и др.; A.E. Sibois, S. D. Desai и др.

ГНСС-технологии широко исследуются отечественными и зарубежными авторами. Например, в своей публикации (Устинов, Кафтан, 2016) Устинов А.В. и Кафтан В.И. анализируют периодические изменения в приращениях координат в локальных сетях с частотой раз в сутки и выше. В экспериментальном исследовании было задействовано два участка: гидротехническое сооружение Саяно-Шушенская ГЭС и район разлома Сан-Андреас. Дополнительно был добавлен участок Нижнекамской ГЭС, контролируемый ГНСС, который установлен на гребне плотины, длина участка составила 3 метра. В первом случае измерения выполнялись аппаратурой NovAtel и Trimble, в работу были включены два береговых пункта и два пункта, расположенных на секциях плотины, положение реперов определялось в ПО Trimble 4D Control. Второй участок в районе сейсмически активного разлома Сан-Андреас был представлен пунктами, относящимся к сети ГНСС,

развёрнутой в рамках программы сейсмических исследований, проводимых USGS (Геологическая служба США), пункты оборудованы двухчастотными приёмниками. Третий участок оснащён приёмниками NovAtel DL-V3. Таким образом для анализа были использованы результаты, полученные в режиме статика с векторов базисных линий различной длины, от 3 м до 4 км, с частотой приёма сигнала не менее раз в 10 с, затем они были обработаны с целью выявления периодичностей тремя методами: вейвлет–функция, быстрое преобразование Фурье и последовательный анализ доминирующих гармоник (Устинов, Кафтан, 2016). Авторами обнаружены устойчивые суточные и полусуточные колебания амплитудой до 4 мм, наиболее вероятной причиной называются ионосферные эффекты, но также не исключается влияние ошибок ГНСС и реальные изменения объектов исследования (Устинов, Кафтан, 2016).

В работе (Богданец, Черёмухина, 2015) Богданец Е.С. и Черёмухиной О.О. исследуется влияние климатических факторов на высотное положение ГНСС-станций. Десять станций, вошедших в исследование, расположены в зоне действия нефтегазовых компаний (Ханты-Мансийский автономный округ - Югра). Поскольку станции чаще всего закрепляются на металлическом основании, в виду климатических особенностей района температура рассматривается, как ключевой фактор, влияющий на конструкцию станции (Богданец, Черёмухина, 2015). Температурные данные были получены с близлежащих федеральных и международных метеорологических станций, периоды наблюдений выбирались с максимальными перепадами значений, они составили 14 дней с 12 – часовыми интервалами. Для базовых станций были сформированы 12-часовые интервалы, состоящие из трёхчасовых наблюдений. Следующим этапом было определение степени влияния температурного фактора на высотное положение станции при помощи трёх показателей: отношение ошибки определения изменения положения станции по высоте и величине колебания высотной отметки; количество интервалов, удовлетворяющих условию прямого воздействия температуры на высотное положение станции и коэффициент связи колебания высотной отметки с изменением температуры (Богданец, Черёмухина, 2015). К сожалению, авторам не удалось выявить прямой взаимосвязи влияние температуры на положение станции, но в итоге работы был сформирован алгоритм определяющий использование поправки за изменение температуры, который опирался на значения показателей каждой станции.

Спутниковые измерения дали уникальную возможность при исследованиях геодинамики. Геодинамический мониторинг на основе глобального спутникового позиционирования при долговременном определении координат опорных точек позволяет получить с высокой точностью горизонтальные и вертикальные компоненты смещений

исследуемых пунктов во времени, другими словами изменения положения блоков земной коры, на которых закреплены реперные пункты. Так Уткин В.И., Белоусова А.А. и др. в своей работе (Уткин, Белоусов и др., 2010) проводят исследование геодинамики Северного и Среднего Урала. При помощи двухчастотного приёмника Trimble5700 с антенной Zephyr Geodetic, установленного на пункты триангуляции 2-го класса государственной геодезической сети, были проведены 36-часовые сеансы наблюдений. Геодезические пункты были привязаны к геологическим структурам Урала. Полученные данные обрабатывали в ПО GAMIT/GLOBK, разработанном в Массачусетском технологическом институте. В результате векторы смещений показывают, что Уфимский выступ, являющийся частью Восточно-Европейской плиты, в настоящее время продолжает движение на восток, вклиниваясь в Уральскую структуру (Уткин, Белоусов и др., 2010). Такое движение неизбежно будет приводить к накоплению напряжений на границах выступа, которые вызывают землетрясения, последнее из которых случилось в 1913 в районе г. Билимбай и имело магнитуду до 5 баллов (Уткин, Белоусов и др., 2010).

В своих работах (Горшков, Мохнаткин, 2016; Горшков, Смирнов и др., 2012; Assinovskaya, Shchulin и др., 2011) Горшков В.Л. и др. с помощью ГНСС-наблюдений исследуют геодинамику региона, охватывающего бассейн Финского залива. Наблюдения проводились с 1993 по 2015 год на сотни перманентных станций сетей национальных служб стран Балтийского региона. Для уплотнения сети использовались российские станции, например, станции Комитета по архитектуре и градостроительству Санкт-Петербурга, компании НАВГЕОКОМ. Срок наблюдений на таких станциях должен был составить не менее трёх лет. Обработка измерений проводилась в ПО GIPSY 6.3 в системе ITRF2008 методом PPP. Евразийская плита (ЕА) состоит из платформ и щитов различного геологического возраста, на северо-западе она включает в себя Балтийский щит (БЩ), граничащий с Русской плитой Восточно-Европейской платформы, их взаимодействие является объектом исследования работы (Горшков, Мохнаткин, 2016), в которой приведена оценка угловой скорости ЕА плиты, оценены угловые компоненты скоростей для РП и вычислены данные по вращению Балтийского щита относительно РП. В выводах подмечена схожесть параметров вращения РП и ЕА, но в кинематике вращения РП и БЩ имеются расхождения (Горшков, Мохнаткин, 2016). В работе (Assinovskaya, Shchulin и др., 2011) проводится изучение сейсмических опасностей Балтийского региона, сейсмическая активность которого считается довольно низкой по частоте и интенсивности. Сейсмические данные не обеспечивают достаточного количества информации для моделирования геологических процессов, спутниковые данные могут послужить полезным инструментом

при изучении геодинамики региона особенно после недавних землетрясений (например, Калининградское землетрясение, произошедшее 21 сентября 2004 года).

1.2. ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩЕГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Программное обеспечение для обработки спутниковых измерений активно развивается и совершенствуется различными научными и учебными организациями, коммерческими производителями и др.

Всё представленное на рынке ПО можно разделить на несколько больших групп (Шевчук и др., 2017):

- коммерческое ПО;
- некоммерческое ПО;
- научное ПО.

Программы первой группы чаще всего создаются под обработку данных, полученных с приёмников определенного типа. RINEX-формат содействует совместимости программы с данными других типов приёмников. В коммерческом ПО алгоритмы обработки скрыты от пользователя, доступ к коду и его редактирование невозможно, декомпиляция запрещена соглашением пользователя. Коммерческие программы позволяют решать инженерные задачи и обладают широким набором функций и инструментов, которые доступны для пользователя со средним уровнем инженерного образования в сфере спутниковых технологий (Антонович, 2005). Такие программы делают обработку измерений, как в статическом, так и в кинематическом режиме.

К этой группе ПО относятся такие программы, как:

- Astech Solutions (компания Magellan Navigation, ранее Thales Navigation, США);
- Leica Geo Office (Leica Geosystems Holdings AG, Швейцария);
- Pinnacle/Justin (группа компаний Javad GNSS, США);
- Topcon Magnet Tools (компания Topcon Corporation, Япония);
- Trimble Business Center (компания Trimble Navigation, США);
- Way Point GrafNav (компания NovAtel, Канада) и др.

Некоммерческое ПО успешно развивается, на рынке появляется всё больше программ бесплатных для пользователя со свободной лицензией, позволяющей пользователю просматривать исходный код и математический аппарат, а также его редактировать. Функционал такого рода программ по своим возможностям схож с группой коммерческой категории, некоторые возможности упрощены.

Разработкой такого рода программ занимаются научно-исследовательские центры и образовательные организации. Финансирование и поддержка разработки ведётся на средства грантов, инвестиций и краудфандинга. Некоммерческое ПО не имеет привязки к какому-либо конкретному производителю ГНСС-оборудования.

К категории некоммерческого ПО относятся:

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

ПО, относящиеся к третьей группе, научных программ, может иметь открытый исходный код, пользователю доступны математические модули, он вправе их модифицировать и добавлять свои фрагменты в код программного продукта. Распространение научных программ может проводиться на коммерческой и бесплатной основе.

Такие программные комплексы создаются в научных учреждениях или в учебных заведениях, они разрабатываются под различные операционные системы. Научное ПО имеет сложный интерфейс, который не подготовлен для среднестатистического пользователя, начало работы с оборудованием того рода требует существенных временных затрат и детального ознакомления с инструкциями (Антонович, 2005). Зачастую научные комплексы имеют в своём инструментарии расширенные и специфические функции для решения сугубо научных задач.

К научным программным продуктам относятся:

- 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);

Ряд программных продуктов ограничивается в использовании учреждениями, где они были разработаны (Антонович, 2005):

- GRAPE (Институт прикладной астрономии РАН, Российская Федерация);
- PAGES (Национальная геодезическая служба, США);
- PANDA или Position and Navigation Data Analyst (университет Уханя, КНР).

Сегодня активно развивается отдельный вид программ, предоставляющий возможность пользователю обрабатывать данные ГНСС-измерений онлайн во Всемирной сети (Интернет), некоторым для работы будет достаточно только браузера. Эти программы составляют отдельную группу онлайн-сервисов для обработки данных.

Такие сервисы могут предоставлять услуги платно или безвозмездно. Онлайн-сервисы могут быть ограничены по территории действия, так как они используют в обработке различные сети базовых станций. Благодаря использованию метода точного дифференциального позиционирования (PPP), пользователям доступна обработка на глобальном уровне.

Примеры онлайн-сервисов (Сайт проекта Ричарда Б. Энгли, посвящённый онлайн-сервисам PPP: [сайт]. URL: <http://www2.unb.ca/gge/Resources/PPP/OnlinePPPs.html>):

- APPS, Automatic Precise Positioning Services (Калифорнийский технологический институт, лаборатория реактивного движения, США);
- AUSPOS (Geoscience Australia, Правительство Австралии);
- CSRS-PPP (Министерство природных ресурсов Канады);
- GAPS, GPS Analysis and Positioning Software (университет Нью-Браунсуика, Канада);
- magicGNSS (компания GMV, Испания) и др.

В сети Интернет присутствуют всевозможные дополнительные утилиты, помогающие пользователям при обработке спутниковых измерений. Например, компания Trimble выпустила бесплатную утилиту GNSS Planning Online. Приложение даёт пользователю возможность в режиме реального времени получить информацию по спутниковому покрытию конкретной территории на определенную дату (Сайт сервиса GNSS Planning Online: [сайт]. URL: www.gnssplanning.com).

При обработке спутниковых измерений для уменьшения затрат на производство работ пользователи могут использовать некоммерческое ПО, бесплатные онлайн-сервисы или программы научно-учебных центров.

Обработка данных в рамках выпускной квалификационной работы будет производиться в коммерческих программах Trimble Business Center и Topcon Magnet Tools, так как кафедра картографии и геоинформатики Санкт-Петербургского государственного университета имеет лицензию на использование данного ПО. К сожалению, доступные коммерческие комплексы не позволяют обрабатывать спутниковые измерения в абсолютном режиме по стратегии PPP, поэтому в работе будет использован онлайн-сервис CSRS-PPP.

Глава 2. Геодезический мониторинг с применением ГНСС-технологий

Современный этап развития науки и техники привёл к новому методу сбора информации, сочетающий в себе эмпирические и теоретические знания об явлениях и объектах окружающего мира, который называется мониторингом, важная черта которого – это функция управления, а именно возможность воздействовать на процесс во время его отслеживания, контроль и прогнозирование дальнейшего развития (Селиверстов, 2004).

Оперативность мониторинга может составлять от долей секунды до нескольких недель и более, по охвату территории мониторинг можно разделить на несколько групп (Жуков, Карпик, 2010):

- глобальный;
- региональный;
- локальный.

Спутниковые технологии в полной мере вошли в применение при геодезическом мониторинге, главной целью которого является пространственное фиксирование местоположения объекта. Точность определения координат с помощью ГНСС-технологий за последнее время сильно возросла, если наилучшим достижением космической геодезии в 70–е годы XX века была точность до нескольких десятков метров, то уже в 1986 г. по средствам спутника «Лагос» точность составила 10 см (Курошев, 2011).

Мониторинг может применяться к любому роду систем: техногенным, социальным, природным и т.д. Среди различных видов мониторинга можно выявить (Жуков, Карпик, 2010):

- мониторинг земной поверхности;
- мониторинг окружающей среды;
- мониторинг состояния и положения объектов.

Все виды мониторинга земной поверхности с применением спутниковых систем можно разделить на три большие группы (Антонович, 2005):

- мониторинг земной геодезической основы Международной службы вращения Земли (ITRF), содержащий параметры движениями литосферных плит, характеристики спутниковых систем, изменения параметров ориентировки Земли;
- региональный мониторинг, размеры сети которого составляют 100 – 1000 км;
- локальный мониторинг, размеры таких сетей чаще всего не превышают 100 км, такой вид мониторинга включает в себя работы по слежению за уровнем воды, сейсмические и гляциологические работы.

При мониторинге окружающей среды спутниковый метод может играть роль дополнительного инструмента для географической привязки полученных результатов измерения среды, а может выполнять функцию приёмника сигнала, несущего информацию о среде, через которую он прошёл. Вторым вариантом рассматривается как метод дистанционного зондирования. Большое количество работ посвящено такому виду мониторинга (Алешин и др., 2014; Куприянов и др., 2018; Мысленков и др., 2016).

История использования спутникового оборудования в мониторинге за деформациями различных типов инженерных сооружений ведёт своё начало с 1986-87 гг., объектами работ становились различные типы строений: мосты; газопроводы; высотные здания и т.д. (Иодис и др., 2016; Chen, Yeu и др., 2019; Tang, Li и др., 2019) Широкое применение ГНСС-технологии получили в различных сферах деятельности, пользователями стали военные ведомства, коммерческие и муниципальные организации, производственные и научные центры. Анализ положения объектов широко применяется в транспортной инфраструктуре и в научной деятельности, например, изучение местообитания и перемещений отдельных видов животных (Рожков и др. 2013, Шубкина и др., 2008).

Основные требования, предъявляемые к работам, проводимым на основе высокоточных спутниковых измерений, остаются такими же, как и при использовании традиционных геодезических методов (Жуков, 2003):

- поиск пунктов не должен вызывать затруднений у исполнителей;
- точки, закреплённые на местности, не должны усложнять или препятствовать центрировки прибора;
- различные типы центров, установленные сигналы или пирамиды, их оформление не должны мешать установке технических средств и приведения их в рабочее положение при выполнении геодезических работ различными методами.

Важным этапом при работе, проводимой с использованием спутниковых измерений, является выбор места расположения пункта наблюдения. Особое внимание должно быть уделено отсутствию объектов, создающих помехи для спутникового оборудования, например, высокие здания и постройки, большие деревья с густой кроной. Пункт должен быть расположен далеко от источников мощного электрического поля, также является нежелательным проводить измерения внутри металлических конструкций.

Спутниковые измерения при геодезическом мониторинге могут основываться на относительном или абсолютном способе позиционирования. Для повышения точности измерения рекомендуется проводить в статическом режиме, суть которого заключается в неподвижной установке станции на длительный сеанс наблюдений.

Геодезический мониторинг с применением ГНСС–технологий имеет ряд преимуществ перед классическими геодезическими методами (Антонович, Карпик, 2004; Жуков, Карпик, 2010):

- широкий охват точностей измерений: от десятых миллиметра до десятков метров;
- непрерывный и долговременный характер измерений;
- более высокий показатель производительности труда;
- уровень автоматизации процесса, как следствие минимизация ошибок исполнителя;
- низкая зависимость от метеорологических условий местности;
- измерения могут производиться как для статических объектов, так и для объектов, находящихся в движении;
- экономическая эффективность производства;
- возможность получать результат измерений не только мгновенно, но и в течение длительного периода времени.

К недостаткам относятся (Антонович, Карпик, 2004):

- высокая стоимость оборудования и ПО;
- недостаточная точность для некоторых видов мониторинга;
- необходимость различного рода преобразования и расчётов, например, проблема получения значений нормальных высот;
- необходимость выбора места для наблюдений без помех, препятствующих прохождению спутникового сигнала.

Сегодня теоретические аспекты исследований, основанных на применении спутниковых технологий, отстают в своём развитии по сравнению с уровнем разработки методов и средств наблюдений (Курошев, 2011). Для анализа изменений положения точек земной поверхности привлекаются различные теории: движения литосферных плит; приливных явлений; вращения и гравитационного поля Земли и др. Для качественного объединения полученных результатов измерений с теоретической базой необходимы обширные знания о географической оболочке с привлечением различных научных дисциплин: океанологии; метеорологии; геологии и т.д.

Глава 3. Способы позиционирования

Способы позиционирования можно разделить на относительные и абсолютные. Суть первого способа заключается в определении приращений координат базовых векторов, которые соединяют пункты наблюдений, в этом случае для работы необходимо минимум два приёмника, один из которых устанавливается на определяемый пункт, а второй на опорный пункт, его координаты являются неизменяемыми («жесткими») (Курошев, 2011). В абсолютных методах определение координат пунктов по принятым спутниковым сигналам производится с помощью одного приёмника. Эту группу способов можно назвать автономной, так как определение координат производится независимо от измерений на других станциях. В процессе развития и применения спутниковых измерений был разработан «дифференциальный» метод (Курошев, 1999). Авторы относят «дифференциальный» метод к одной из разновидностей абсолютного способа позиционирования (Курошев, 2011; Серапинас, 2002).

Общая схема деления способов позиционирования выглядит следующим образом (Серапинас, 2002):

- абсолютные способы определения геоцентрических координат:
 - автономные;
 - дифференциальные;
- относительные способы определения положения базовых линий:
 - статические, включающие в себя псевдостатические способы наблюдения и метод ускоренной кинематики;
 - кинематические, в том числе способ кинематики реального времени (RTK) и способ «стой–иди».

Выбор того или иного метода зависит от целей, технической обеспеченности и особенностей территории, требуемой точности результата и т.д.

3.1 АБСОЛЮТНЫЙ СПОСОБ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Особенностью абсолютного способа позиционирования является возможность определения местоположения пункта в независимости от измерений на других станциях. В основе определения координат пункта лежит пространственная линейная засечка, роль опорных пунктов выполняют искусственные спутники Земли, их должно быть не менее четырёх.

Основой определения координат в абсолютном способе позиционирования является уравнение псевдодальности (Курошев, 2011):

$$P_{Ai} = \rho_{Ai} + cdt_A - cdt_i + I_{Ai} + T_{Ai} + d_A + d_i + dm_{Ai} + e_{Ai}, \quad (3.1.1)$$

где нижний индекс A указывает на пункт наблюдений, а индекс i относится к номеру наблюдаемого искусственного спутника; ρ_{Ai} – геометрическая дальность; dt_A и dt_i – поправки, относящиеся к часам приёмника и спутника соответственно; I_{Ai} и T_{Ai} – задержки сигнала, вызванные влиянием ионосферы и тропосферы; задержки в приёмнике d_A и спутнике d_i ; c – скорость света в вакууме; dm_{Ai} – влияние помехи при наблюдениях, вызванной интерференцией сигнала (влияние многопутности) и случайная погрешность измерений или шум e_{Ai} .

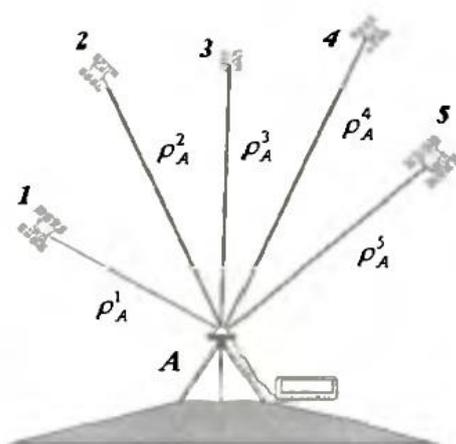


Рисунок 1. Абсолютный способ спутникового позиционирования (Антонович, 2006)

По сравнению с относительным способом позиционирования абсолютный уступает в точности, средняя квадратическая погрешность (СКП) определения координат абсолютным способом достигает 5 м и более, но качество измерений значительно повышается при использовании точных апостериорных параметров орбит искусственных спутников (эфемерид) и поправок к часам спутников (Шевчук и др., 2016). Это является основой методики точного позиционирования (PPP). Стратегия PPP на сегодняшний день является одним из наиболее передовых подходов в обработке ГНСС – измерений по нескольким причинам (Антонович, Липатников, 2013):

- автономность и повсеместная доступность;
- высокая точность определения местоположения в общеземной системе координат с СКП в плановом положении до 1 см, в высотном от 1 до 3 см;
- высокая степень автоматизации процесса и снижение затрат при проведении полевых работ.

Уравнения ионосферно–свободной комбинации (P) кодовых измерений (псевдодальности) и ионосферно–свободной комбинации (Φ) фазовых измерений, связанные с параметрами положения пользовательской системы, задержкой часов, влиянием тропосферы, выглядят в упрощённом виде следующим образом (Kouba, Héroux, 2001):

$$l_P = \rho + c(dt - dT) + T_r + \varepsilon_P, \quad (3.1.2)$$

$$l_\Phi = \rho + c(dt - dT) + T_r + N\lambda + \varepsilon_\Phi, \quad (3.1.3)$$

где левые части уравнений ионосферно-свободная комбинация псевдодальностей l_P и ионосферно-свободная комбинация несущих фаз l_Φ ; dt и dT – смещение часов приёмника и спутника относительно времени GPS; c – скорость света в вакууме; T_r – задержка прохождения сигнала через нейтральные слои атмосферы (прежде всего тропосферу); λ – несущая комбинация длины волны; N – число, определяющее неоднозначность измерения псевдодальности; ε_P и ε_Φ – влияние многопутности на измерения и остаточный шум; ρ – вычисленная по приближённым координатам наземного измерительного пункта геометрическая дальность между центрами антенн спутника и приёмника на станции. Выражение тропосферной задержки (T_r) через функцию зенитного расстояния (zpd) с функцией отображения (M), связанную с местоположением спутника и смещением спутниковых часов (dT), даёт следующую математическую модель уравнений наблюдения (Kouba, Héroux, 2001):

$$f_P = \rho + cdt + Mzpd + \varepsilon_P - l_P = 0, \quad (3.1.4)$$

$$f_\Phi = \rho + cdt + Mpzd + N\lambda + \varepsilon_\Phi - l_\Phi = 0, \quad (3.1.5)$$

Методика точного позиционирования PPP требует ряда специфических поправок, которые не используются при относительном способе позиционирования. Одним из примеров такого рода поправок может послужить поправка за взаимную ориентацию спутниковой и приёмной антенн. Вращение антенны вокруг своей оси приёмника или спутника может приводить к изменениям несущей фазы, такой эффект называют эффектом наложения фаз (английский вариант «carrier phase wind-up effect») (Kouba, Héroux, 2001). Зачастую приёмник неподвижен, однако спутник подвергается медленному вращению, поскольку его солнечные батареи должны быть ориентированы на Солнце, таким образом геометрия местоположения спутника меняется. Кроме того, во время затмений спутник подвергается быстрым поворотам, пренебрежение таким видом поправок может привести к ошибке определения положения до дециметров. Следующий вид поправки – это поправка за смещение спутниковой антенны. Поскольку модели положения спутников рассчитываются относительно его центра масс, точные спутниковые эфемериды IGS и поправки часов также относятся к центру масс спутника, но передаваемые параметры орбит

в навигационном сообщении относятся к фазовому центру антенны. Также учитываются параметры вращения Земли, влияние океанической нагрузки, геодинамических процессов, атмосферной и снеговой нагрузки и т.д.

На точность результатов измерений по стратегии PPP влияет продолжительность наблюдений. Отмечается, что для достижения предельной погрешности 10 см требуется провести наблюдения непрерывно в течение 30 минут (Шевчук и др., 2016; Chasaghe, 2012). Точность результатов измерений также зависит от используемых моделей тропосферных и ионосферных поправок. Для достижения максимальных точностей следует использовать поправки к часам спутников и параметры их местоположения из файлов точных эфемерид, которые предоставляются Международной службой ГНСС (IGS, International GNSS Service), имеющую сеть из 400 пунктов, расположенных по всему миру. Пользователь имеет возможность безвозмездно получить информацию с сервисов IGS, однако во Всемирной сети также существуют и коммерческие сервисы.

Следует отметить недостатки точного метода позиционирования (PPP) (Шевчук и др., 2016):

- постоянный и надёжный доступ ко Всемирной сети;
- метод очень чувствителен к срыву измерения фаз;
- проведение измерений непрерывно, минимум 30 минут;
- для перехода из WGS-84 в другие системы координат требуются точные параметры перехода.

На сегодняшний день качество определения координат по стратегии PPP с учётом эфемеридно-временной информации, тропосферных и ионосферных моделей и т.д. достигает относительного способа (Мельников, 2018).

3.2 ОТНОСИТЕЛЬНЫЙ СПОСОБ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Простейшим построением при выполнении работ относительным способом является «геодезическая база», термин база пришёл из радиоинтерферометрического метода (Курошев, 1999). Базовая линия включает в себя две разделенные станции, на которых проводятся синхронные наблюдения одних и тех же искусственных спутников Земли. В геометрическом понимании базовая линия является отрезком прямой или трёхмерным вектором между двумя точками, вычисленным по одновременным спутниковым наблюдениям. В результате измерений получают координаты одной станции базовой линии относительно другой станции, имеющей закреплённые, неизменяемые координаты, другими словами получают компоненты вектора базовой линии (Курошев, 2011).

Точка А является опорным пунктом с известными координатами, координаты точки В следует определить, тогда D_{AB} – вектор базовой линии. Тогда уравнение вектора положения станции В примет вид (Курошев, 2011):

$$R_B = R_A + D_{AB}, \quad (3.2.1)$$

где вектор базовой линии состоит из компонент:

$$D_{AB} = \begin{bmatrix} X_B - X_A \\ Y_B - Y_A \\ Z_B - Z_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X_{AB} \\ \Delta Y_{AB} \\ \Delta Z_{AB} \end{bmatrix}, \quad (3.2.2)$$

Синхронные спутниковые наблюдения, проведённые на пунктах, образуют различные линейные комбинации, вызывающие одинарные, двойные и тройные разности (Антонович, 2006; Курошев, 2011):

- Одинарные (первые или простые) – разности, образованные при одновременных измерениях с двух пунктов на один спутник или с одного пункта на два спутника. Уравнение первого случая (более предпочтительного при измерениях) принимает вид:

$$P_{(A-B)i} = (\rho_{Ai} - \rho_{Bi}) - (N_{Ai} - N_{Bi})\lambda + (D_{pA} - D_{pB}) + d_{(A-B)i}, \quad (3.2.3)$$

В одинарных разностях фаз отсутствуют искажения, полученные аппаратурой спутника (влияние начальной фазы генератора, поправки часов и запаздывание в спутниковом оборудовании). В значительной степени уменьшается влияние тропосферной и ионосферной задержки, а также погрешность определения эфемерид. Во втором случае исключаются погрешности из-за часов спутникового приёмника.

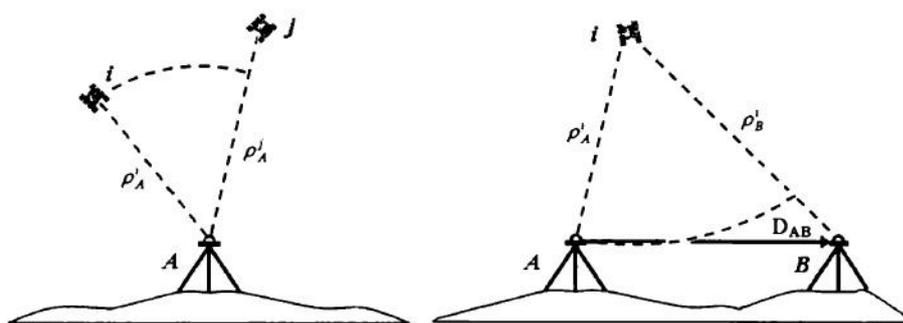


Рисунок 2. Одинарные разности между спутниками (слева), между станциями (справа) (Антонович, 2006).

- Двойные разности (вторые или сдвоенные) – разности, которые получаются при синхронных измерениях, выполненных с двух пунктов, на два спутника в одну эпоху. Уравнение двойных разностей принимает вид:

$$P_{(A-B)ij} = [(\rho_{Ai} - \rho_{Bi}) - (\rho_{Aj} - \rho_{Bj})] - N_{ABij}\lambda + d_{(A-B)ij}, \quad (3.2.4)$$

Двойные разности фаз не содержат ошибки часов спутников и приёмников, а именно исключаются поправки часов, влияние начальной фазы генератора и запаздывания в аппаратуре. Уровень влияние остальных видов ошибок продолжает снижаться, при этом шум измерений возрастает.

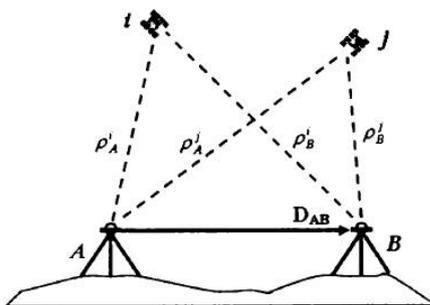


Рисунок 3. Двойная разность фаз (Антонович, 2006).

- Тройные разности фаз образуются двойными разностями фаз, относящимся к разным эпохам. Тройные разности или разность эпох наблюдений принимают уравнение следующего вида:

$$P(t_2 - t_1)_{ij} = [(\rho_{Ai} - \rho_{Bi}) - (\rho_{Aj} - \rho_{Bj})]_{12} - [(\rho_{Ai} - \rho_{Bi}) - (\rho_{Aj} - \rho_{Bj})]_{12} + d_{(A-B)ij12}, \quad (3.2.5)$$

Тройные разности исключают ошибки часов и целое число неоднозначности фаз. Ошибки влияния ионосферы и тропосферы сохраняются, влияние эфемерид на результат спутниковых измерений уменьшается, но количество шума увеличивается.

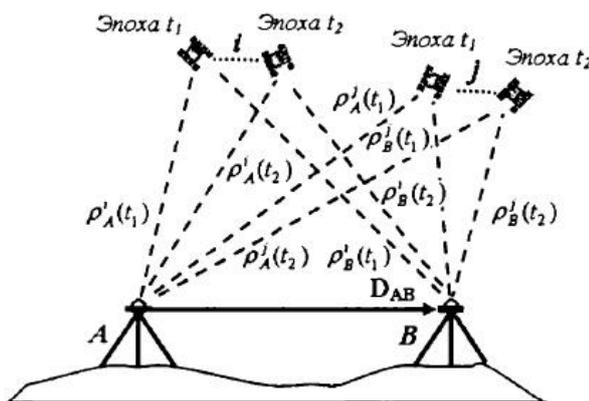


Рисунок 4. Тройные разности фаз между наблюдениями двух спутников с двух станций в две эпохи (Антонович, 2006)

Большое количество программных продуктов поддерживает все эти три вида измерений.

Наиболее трудоёмким является метод статики, приёмники устанавливаются на две станции, одна из которых является базовой или референцной станцией, её координаты известны. Из названия следует, что приёмники не перемещаются длительное время,

точность результатов зависит от продолжительности наблюдений. В результате получают вектор, который соединяет две станции в пространстве (Курошев, 2011):

$$D = (X_B - X_A, Y_B - Y_A, Z_B - Z_A)^T, \quad (3.2.6)$$

Метод статики является наиболее популярным у геодезистов, и большинство программных продуктов поддерживает обработку именно этим методом определения координат, так как он позволяет достичь больших точностей.

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

Координаты пунктов, получающиеся в результате спутниковых измерений, можно представить в виде временных рядов. Для дальнейшего анализа изменения в положении постоянно действующих станций ГНСС можно применить математические алгоритмы для выявления тренда и шума. Одним из таких алгоритмов является активно развивающийся метод «Гусеница»-SSA (Singular Spectrum Analysis), его развитие и усовершенствование ведётся во многих странах, в том числе и в России, например, на математико-механическом факультете СПбГУ (Голяндина, 2004; Данилов, 1997).

На сегодняшний день метод «Гусеница»-SSA зарекомендовал себя в качестве удобного инструмента, применяемого во многих отраслях науки и техники, в том числе и геодезии (Chang Xu и др., 2015; Chen, 2013; Khazraei, Amiri-Simkooie, 2019).

Метод Гусеница – SSA можно разделить на два основных этапа (Голяндина, 2004):

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

Подробно разберём каждый этап работы метода, все формулы, приведённые ниже, и понятия базируются на учебном пособии (Голяндина, 2004).

Дан вещественный временной ряд $F = (f_0, \dots, f_{N-1})$, где $N > 2$ – длина ряда. Ряд F является ненулевым, т.е. существует хотя бы один член ряда отличный от нуля ($f_i \neq 0$). Чаще всего считается, что $f_i = f(i\Delta)$ для некоторой функции $f(t)$, где t – время, а Δ – это некоторый интервал времени.

Первым шагом разложения является вложение, преобразующее исходный ряд в последовательность многомерных векторов. Важным моментом является выбор числа L ($1 < L < N$), являющимся длиной окна. В результате вложения образуются вектора вложения, их количество $K = N - L + 1$, а размерность L :

$$X_i = (f_{i-1}, \dots, f_{i+L-2})^T \quad 1 \leq i \leq K, \quad (4.1)$$

Вектора образуют траекторную матрицу, состоящую из скользящих отрезков длины L , которые в свою очередь являются столбцами матрицы. Траекторная матрица X принимает вид:

$$X = [X_1: \dots: X_K], \quad (4.2)$$

более подробно:

$$X = (x_{ij})_{i,j=1}^{L,K} = \begin{pmatrix} f_0 & f_1 & \dots & f_{K-1} \\ f_1 & f_2 & & f_K \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ f_{L-1} & f_L & \dots & f_{N-1} \end{pmatrix}, \quad (4.3)$$

Матрица X является ганкелевой, её элементы, лежащие на диагоналях перпендикулярной главной, одинаковые ($i + j = const$).

Вторым шагом работы алгоритма является сингулярное разложение (английский термин Singular Value Decomposition), матрица X представляется в виде суммы элементарных матриц:

$$X = X_1 + X_2 + \dots + X_d, \quad (4.4)$$

Пусть $S = XX^T$, тогда обозначение собственных чисел матрицы S , взятых в неубывающем порядке, примет вид $\lambda_1, \dots, \lambda_L$, а ортонормированная система собственных векторов матрицы S будет выглядеть следующим образом U_1, \dots, U_L . Если принять $V_i = X^T U_i / \sqrt{\lambda_i}$, где $i = 1, \dots, d$, а $d = \max\{i : \lambda_i > 0\}$, то каждый элемент X_i матрицы X примет вид:

$$X_i = \sqrt{\lambda_i} U_i V_i^T, \quad (4.5)$$

Набор $(\sqrt{\lambda_i}, U_i, V_i)$ – i -ая собственная тройка сингулярного разложения. В стандартной терминологии $\sqrt{\lambda_i}$ называют сингулярным числом, U_i, V_i – левыми и правыми сингулярными векторами матрицы X (или собственными и факторными векторами, соответственно), сингулярное разложение является основой математической части метода (Голяндина, 2004).

Этап восстановления начинается с группировки, которая проводится на основе сингулярного разложения. В сгруппированном виде разложение матрицы (4.4) примет вид:

$$X = X_{I_1} + X_{I_2} + \dots + X_{I_m}, \quad (4.6)$$

Процедура группировки разделяет всё множество индексов $\{1, \dots, d\}$ на m пересекающихся подмножеств I_1, \dots, I_m . Если $I = \{i_1, i_2, \dots, i_p\}$, матрица X_I группы I примет вид:

$$X_I = X_{i_1} + X_{i_2} + \dots + X_{i_p}, \quad (4.7)$$

Во время группировки происходит идентификация собственных троек с их группировкой (Александров, 2010; Голяндина, 2004). Именно на этом шаге происходит определения основного тренда временного ряда, периодик и шумов (Вохмянин, 2010).

Последним шагом работы метода «Гусеница»-SSA является диагональное усреднение, итогом работы которого является создание нового ряда длины N на основе матриц сгруппированного разложения (4.6).

Диагональное усреднение преобразует матрицу Y (размером $L \times K$ с элементами u_{ij}) в ряд (g_0, \dots, g_{N-1}) по формуле:

$$g_k = \begin{cases} \frac{1}{k+1} \sum_{m=1}^{k+1} y_{m,k-m+2}^* & \text{для } 0 \leq k < L^* - 1 \\ \frac{1}{L^*} \sum_{m=1}^{L^*} y_{m,k-m+2}^* & \text{для } L^* - 1 \leq k < K^* \\ \frac{1}{N-k} \sum_{m=k-K^*+2}^{N-k^*+1} y_{m,k-m+2}^* & \text{для } K^* \leq k < N \end{cases}, \quad (4.8)$$

В результате работы диагонального усреднения из результирующих матриц получают ряды $F^{(k)} = (f_0^{(k)}, \dots, f_{N-1}^{(k)})$, исходный ряд преобразуется в сумму рядов:

$$f_n = \sum_{k=1}^m f_n^{(k)}, \quad (4.9)$$

На результат работы метода «Гусеница»-SSA влияют не только характеристики и особенности исследуемого временного ряда, но и выбор двух важных параметров, а именно длины окна L , и способа группировки компонент сингулярного разложения (вторая характеристика является структурной).

Важнейшим параметром работы метода анализа временных рядов является длина окна. Неверный подбор L может привести к неудовлетворительным результатам, при выборе длины окна должны учитываться известные характеристики ряда, его особенности или предварительные свойства, требования к решаемой задаче и т.п. Важно, что синтезирующих правил, применимых ко всем вариантам существующих временных рядов, нет, но определены основные теоретические и практические принципы выбора параметра L (Голяндина, 2004):

- положение, касающиеся выбора параметра L и значения длины ряда N , указывает на то, что не рекомендуется брать длину окна больше значения половины ряда, т.к. «сингулярные разложения траекторных матриц одного и того же ряда длины N , соответствующие выбору длины окна L и $N-L+1$ эквиваленты (с точностью до симметрии: левые сингулярные векторы \leftrightarrow правые сингулярные векторы)»;
- второе положение, основанное на первом, говорит, что при больших параметрах L алгоритм становится более чувствительным к изменениям во временном ряду, результат разложения становится более детальным;
- длина окна влияет на слабую делимость ряда, рекомендуется выбирать большую длину окна, т.к. меньшее значение L при разложении может привести к объединению интерпретируемых компонент;
- в противовес предыдущему пункту, при достаточно больших значениях параметра L метод становится устойчив к небольшим изменениям, отметим, что для небольших значений L и N существуют конкретные указания и примеры из практики;
- близкие значения собственных чисел, относящиеся к разным компонентам временных рядов, также вносят свои коррективы, например, для временного

ряда, имеющего достаточно сложную структуру, большое значение L может привести к неправильному разложению компонент ряда, например, к их слиянию.

Малейшие изменения параметра L могут привести к лучшему разделению ряда, следовательно, при анализе временного ряда методом «Гусеница»-SSA необходимо экспериментировать с несколькими вариантами параметров обработки.

Одна из главных задач анализа временного ряда заключается в выявлении периодических компонент. При выделении периодических составляющих временного ряда важно учитывать значение задаваемого параметра L , принципы его выбора приведены ниже (Голяндина, 2004):

- при выявлении периодических компонент рекомендуется измерить длину ряда и длину окна в числе периодов, например, если одна составляющая компонента $F^{(1)}$ отделяется от второй $F^{(2)}$, для наилучшего результата длина ряда должна составить несколько периодов;
- для коротких временных рядов лучше учитывать условия точной делимости, но если временной ряд содержит периодическую составляющую с известным периодом T , рекомендуется установить значение длины окна пропорционально периоду;
- при больших значениях длины ряда требования пропорциональности отношения длины окна к периоду не столь обязательны, в таком случае для повышения эффективности работы значение L берётся близкое к половине длины ряда, с учётом периода известной компоненты (т.е. L должны была нацело делиться на T).

После сингулярного разложения траекторной матрицы исходного ряда происходит группировка членов сингулярного разложения, этот этап работы алгоритма сложно полностью формализовать. Процедура группировки заключается в исследовании сингулярных векторов V_i , U_i и собственных чисел λ_i . Каждый элемент матрицы характеризуется собственной тройкой, существуют общие правила группировки (Голяндина, 2004):

- при восстановлении компонента ряда с использованием одной собственной тройки и при условии, что оба сингулярных вектора имеют общие черты, то и аналогичную форму будет иметь восстанавливаемая компонента, например, сингулярные вектора собственных троек имеют схожесть с линейными рядами, тогда и составляющая ряда будет иметь компоненту близкую к линейной;

- результат восстановления может быть спрогнозирован по виду факторного вектора при длине окна на много меньшей, по сравнению с количеством векторов вложения (K);
- собственное число может являться главной характеристикой вклада восстановленной компоненты при большем сингулярном значении в собственной тройке.

При определении шума важно понимать уровень неопределённости этого понятия в строгой математической модели. В исследовании временных рядов с применением метода «Гусеница»-SSA шум состоит из собственных троек, которые в свою очередь не содержат тренды и периодик, при этом в теории разработаны принципы работы с шумовыми компонентами (Голяндина, 2004):

- зачастую возникает эффект пересечения диапазонов сигнала и шума, это происходит по причине включения гармонических компонент сигнала в шумовую составляющую, как следствие, восстановленная по собственным тройкам компонента, будет содержать шумовую составляющую;
- в некоторых случаях гармоники не отделяются от шума по причине малых амплитуд гармонических компонент и большого шума, эффект исчезает при $N \rightarrow \infty$;
- при больших значениях K , L , N сингулярное разложение матрицы чистого шума чаще всего будут содержать несколько собственных троек, схожих с порождёнными гармониками, компоненты восстановления аналогично образом будут напоминать гармоники.

Основываясь на вышеизложенном, метод «Гусеница»-SSA был разработан в ПО MathCad 15 (PTC Inc., США).

На первом этапе программа запрашивает внешний файл формата (.xlsx), содержащий временные ряды, с помощью встроенной функции, затем задаётся траекторная матрица с помощью векторов преобразованного центрированного ряда с параметром длины окна L . Длина окна по умолчанию задаётся равной половине длины ряда.

На следующем шаге вычисляются вектора собственных чисел λ и матрицы собственных и факторных векторов (U , V), при установке параметра $L = N/2$ матрицы U и V будут одинаковыми.

По формулам (4.6) производится сингулярное разложение, на основе которого производится группировка раскладываемых компонент, основанная на анализе собственных чисел и сингулярных векторов.

В ходе выполнения работ был проведён эксперимент по исследованию работы метода «Гусеница»-SSA с помощью временных рядов, включающих себя сгенерированный шум различной величины. Целью являлось выявить устойчивость алгоритма к разноплановым помехам. Были созданы временные ряды F по формуле:

$$F = f(x) + m, \quad (4.10)$$

где $f(x)$ – задаваемая функция, содержащая в себе периодические составляющие, m – сгенерированные помехи, созданные с помощью инструмента «генератор случайных чисел» в ПО Microsoft Office Excel.

Первый пример содержал в себе одну сезонную периодику и относительно низкий шум. Основная функция задавалась по формуле:

$$f(x) = \sin(x), \quad (4.11)$$

где $x = 0, 30, 60, \dots, 5970$, длина ряда N составила 200, параметр длины окна L брался согласно выше описанной теории и составил половину длины ряда ($L = N/2$), m – нормально распределённая величина, среднее значение которой составило 1, а стандартное отклонение $\sigma = 0,1$.

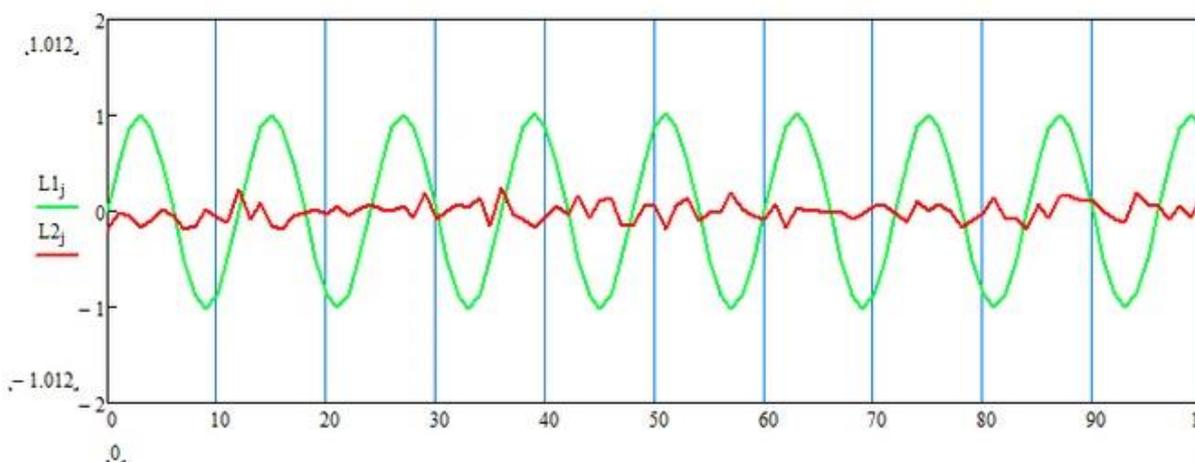


Рисунок 5. График компонент ряда первого примера (приведена только половина результирующего разложения)

В результате работы алгоритма чётко выделилась первая компонента $L1$ и остаточный шум $L2$ (Рис. 5). Матрица ковариации имеет затухающий вид, что говорит о «белом» шуме или близком к нему по характеристикам, его составляющая равномерно распределена по всему диапазону (Рис. 6). Согласно работе Горшкова В.Л. шумы, возникающие в результате спутниковых измерений, близки к фликер-шумам или занимают промежуточное значение между белым и розовым (Горшков, 2012).

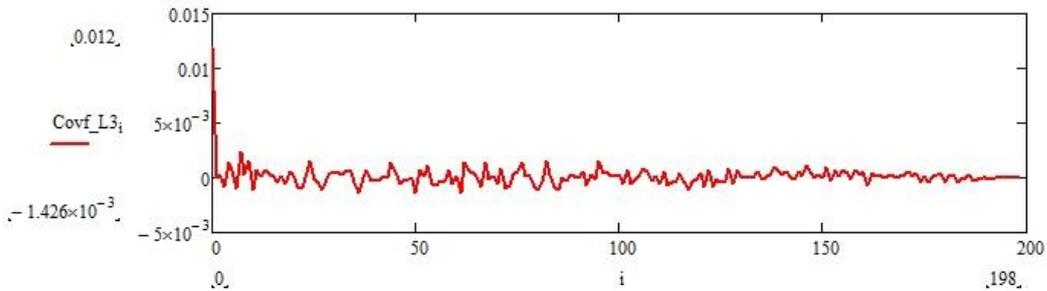


Рисунок 6. График ковариационной матрицы для первого примера

Зашумлённый график функции выглядел следующим образом, шумовая составляющая настолько невелика, что график практически не изменился (Рис. 7). Средняя амплитуда колебаний составляет $A_{cp1} \approx 1,00$, при средней амплитуде не зашумлённых данных $A_{cp} \approx 1,00$.

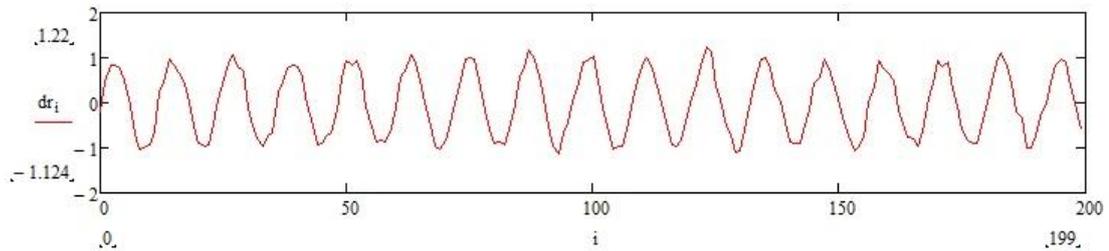


Рисунок 7. График функции с шумовой составляющей, при стандартном отклонении 0,1

Последующие примеры были проведены аналогично с использованием формулы (4.11), но с различным уровнем шума. Во втором примере стандартное отклонение составило $\sigma = 0,3$, уровень шума повысился, это прослеживается на общем графике функции $F = \sin(x) + t$ (Рис.8).

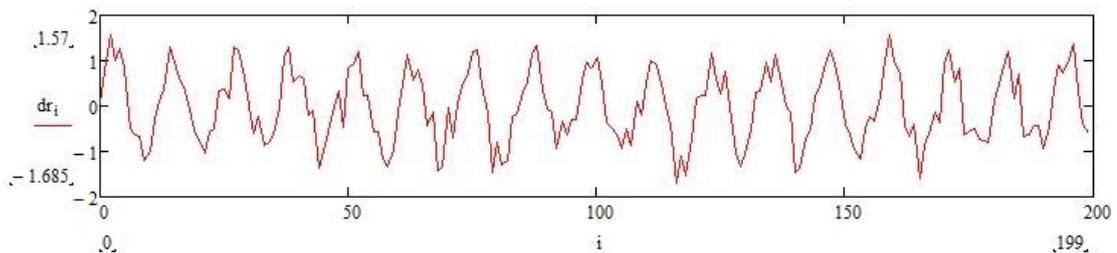


Рисунок 8. График функции с шумовой составляющей, при стандартном отклонении 0,3

В результате работы метода «Гусеница»-SSA аналогично первому примеру чётко выделилась основная компонента $L1$ и остаточный шум $L2$ (Рис.9). Ковариационная матрица также имеет затухающий тип. Средняя амплитуда колебаний составляет $A_{cp2} \approx 1,02$, при средней амплитуде не зашумлённых данных $A_{cp} \approx 1,00$.

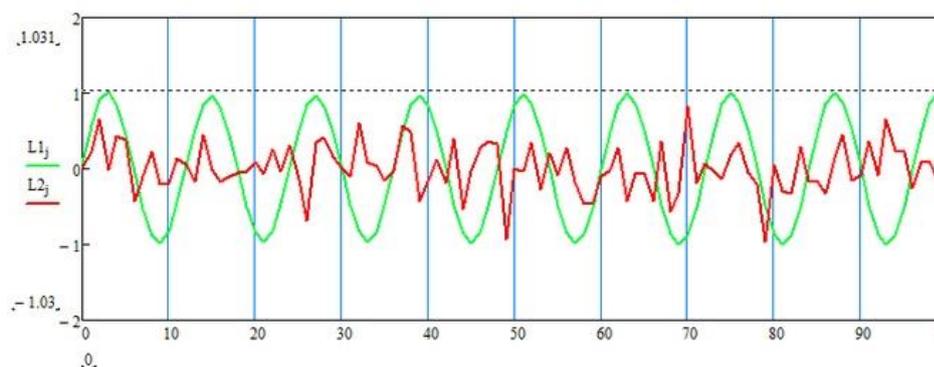


Рисунок 9. График компонент ряда второго примера (приведена только половина результирующего разложения)

В третьем примере стандартное отклонение $\sigma = 0,6$, уровень шума по амплитуде равен изменениям основной функции, местами шум превышает значение A_{cp} , это прослеживается на общем графике функции $F = \sin(x) + m$ (рис.10).

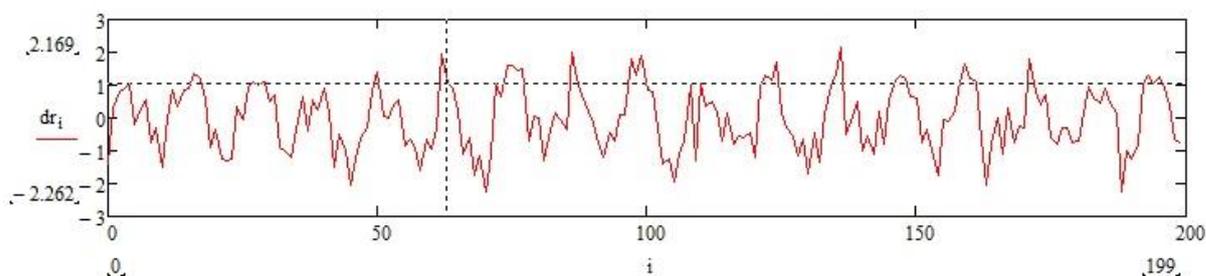


Рисунок 10. График функции с шумовой составляющей, при стандартном отклонении 0,6

Алгоритм отлично справился с поставленной задачей, выделилась основная компонента ряда $L1$ и шумовая составляющая $L2$ (Рис. 11).

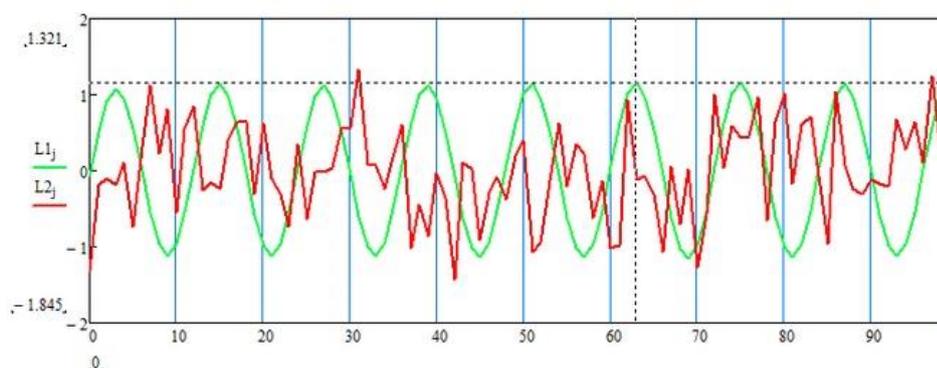


Рисунок 11. График компонент ряда третьего примера (приведена только половина результирующего разложения)

Средняя амплитуда колебаний составляет $A_{cp3} \approx 1,11$. С повышением стандартного отклонения влияние шума на значение периодичности функции начинает возрастать.

В четвёртом примере стандартное отклонение $\sigma = 0,9$, уровень шума по амплитуде превышает изменения основной функции, это прослеживается на общем графике функции $F = \sin(x) + m$ (Рис.12).

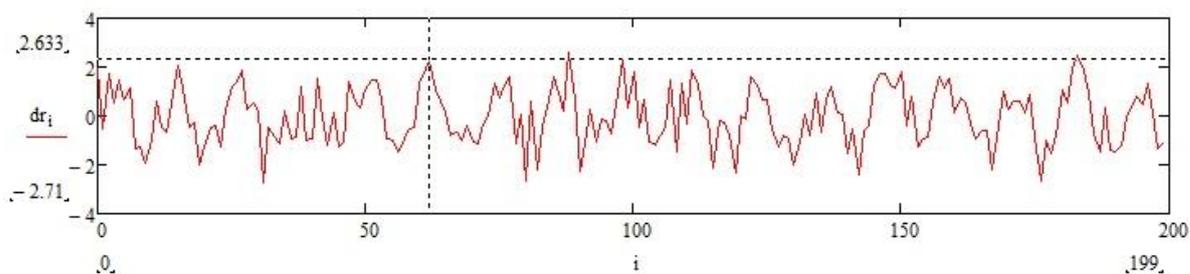


Рисунок 12. График функции с шумовой составляющей, при стандартном отклонении 0,9

Алгоритм справился с поставленной задачей, выделилась основная компонента ряда $L1$ и шумовая составляющая $L2$ (Рис. 13). Средняя амплитуда колебаний составляет $A_{cp4} \approx 1,12$, что говорит о влиянии шума на истинные значения изменения функции.

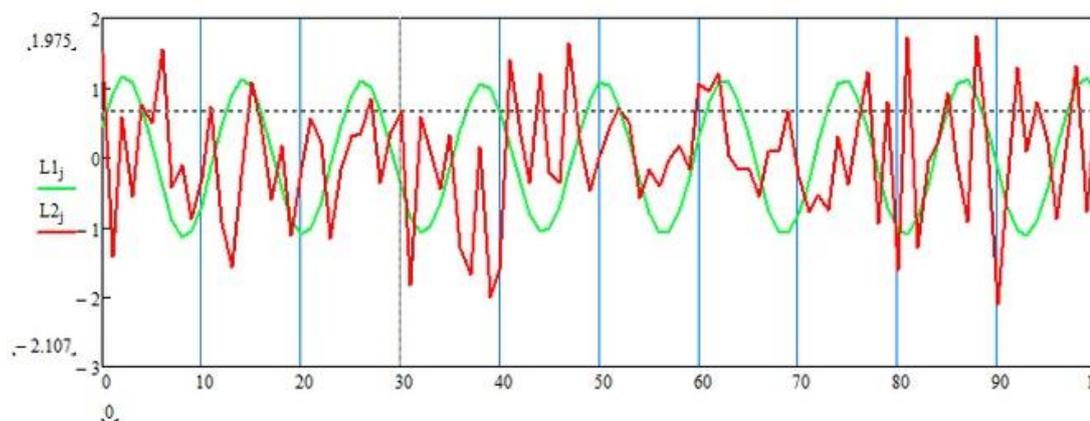


Рисунок 13. График компонент ряда четвёртого примера (приведена только половина результирующего разложения)

В пятом примере стандартное отклонение $\sigma = 1,5$, уровень шума по амплитуде превышает изменениям основной функции на всём диапазоне, это прослеживается на общем графике функции $F = \sin(x) + m$ (Рис.14).

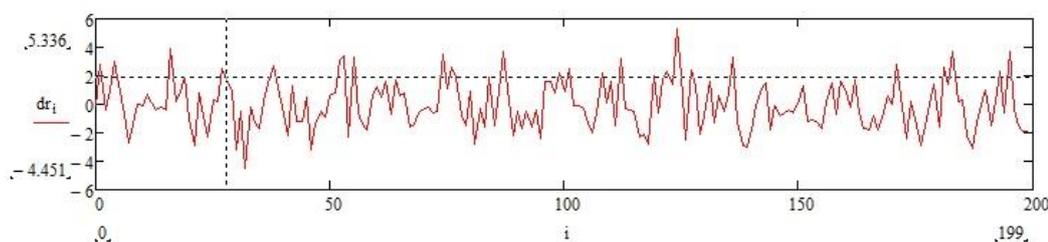


Рисунок 14. График функции с шумовой составляющей, при стандартном отклонении 1,5

В результате выделилась основная компонента $L1$, важно отметить, что средняя амплитуда колебаний составляет $A_{cp5} \approx 1,15$. Также выделилась компонента $L2$, являющаяся шумовой составляющей (Рис. 15).

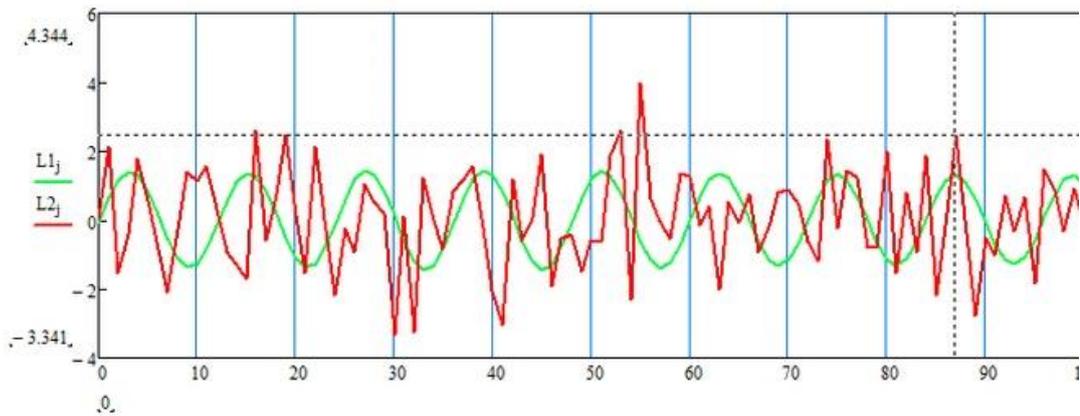


Рисунок 15. График компонент ряда пятого примера (приведена только половина результирующего разложения)

В шестом примере стандартное отклонение $\sigma = 2,0$, уровень шума по амплитуде превышает изменениям основной функции на всём диапазоне, это прослеживается на общем графике функции $F = \sin(x) + m$ (Рис.16).

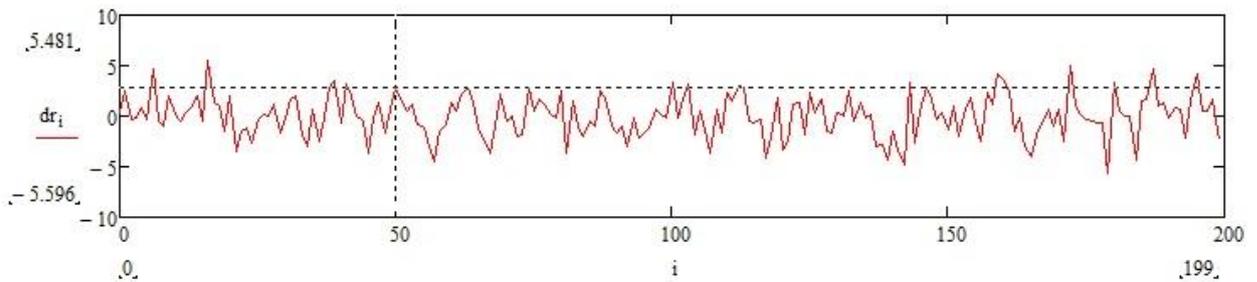


Рисунок 16. График функции с шумовой составляющей, при стандартном отклонении 2,0

В результате выделилась основная компонента $L1$, важно отметить, что средняя амплитуда колебаний составляет $A_{cp5} \approx 1,20$. Также выделилась компонента $L2$, являющиеся шумовой составляющей (Рис. 17).

По итогам проведённого эксперимента можно сделать вывод, что метод «Гусеница»-SSA устойчив к различным уровням шума, но уровень шума оказывает непосредственное влияние на конечный результат.

В заключении можно сделать вывод, что метод «Гусеница»-SSA является удобным инструментом для анализа временных рядов и разбиения их на аддитивные составляющие. Плюсом метода является то, что отсутствует строгая необходимость наличия сведений о характеристиках, особенностях ряда и его структуры. Но полученные результаты абсолютно ничего не говорят о причинах их возникновения, поэтому требуется дополнительный анализ каждой полученной компонент на всех участках, исходя из её периода.

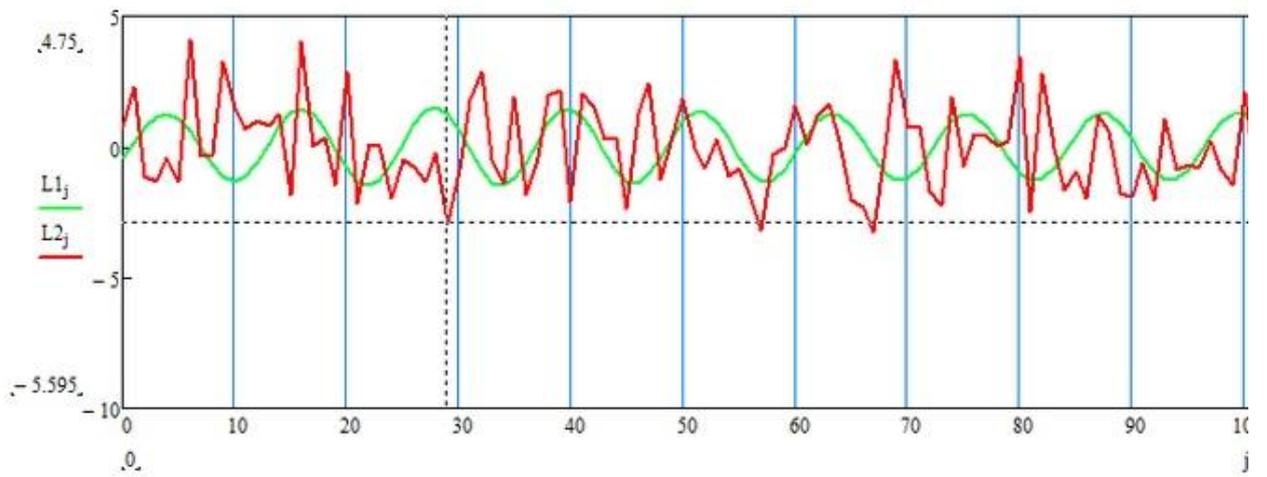


Рисунок 17. График компонент ряда шестого примера (приведена только половина результирующего разложения)

Глава 5. Анализ изменений в положении постоянно действующих станций ГНСС

Для анализа изменений в положении постоянно действующих станций ГНСС использовались данные, полученные с сети референчных станций Комитета по градостроительству и архитектуре г. Санкт–Петербург (далее сеть РС СПб).

Сеть РС СПб – система, состоящая из постояннодействующих референчных станций, координаты местоположения которых определены с высокой точностью. Наблюдения на станциях ведётся круглосуточно, поэтому приёмное оборудование должно быть установлено таким образом, чтобы воздействие внешних факторов, препятствующих нормальному приёму спутникового сигнала, было сведено к минимальному значению. Задача сети закрепить и распространить пространственную местную систему координат (далее ПМСК) на территорию г. Санкт–Петербург и близлежащих районов.

Базовая или референчная станция (далее РС) – это аппаратно-программный комплекс, состоящий из постоянно действующих приёмников спутникового сигнала с фиксированными в пространстве антеннами, имеющих возможность дистанционного управления. Базовые станции работают в автономном режиме и имеют возможность непрерывно передавать в центр управления навигационную информацию со спутников.

РС закреплены на крышах строений по возможности на капитальной стене. Создание сети РС СПб проводилось в период 2010-2013 гг. Работы по введению в эксплуатацию сети БС велись по специально созданному техническому проекту, в котором подробно разбирались каждый этап работ, рассматривались особенности закрепления станций и свойства выбранных строений, характеристики приёмного оборудования, вопросы, связанные с инженерным оборудованием (электропитание, заземление, устройство связи и сигнализации и т.д.) и уровнем воздействия на окружающую среду и т.п.

Определение координат РС проводилось по результатам наблюдений на референчных базовых станциях и пунктах IGS, для учёта влияния тектонических движений земной коры проводились трёхсуточные измерения на пунктах IGS и РС СПб в период 22.05.2013-24.05.2013 (Сеть референчных станций г. Санкт–Петербург: [сайт]. URL: <http://ref.kgainfo.spb.ru/about/>).

Геодезическая сеть в своём основании имеет трёхступенчатую систему (Сеть референчных станций г. Санкт – Петербург: [сайт]. URL: <http://ref.kgainfo.spb.ru/about/>):

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

Обработка результатов спутниковых измерений велась в два этапа (Сеть референционных станций г. Санкт–Петербург: [сайт]. URL: <http://ref.kgainfo.spb.ru/about/>):

- свободное уравнивание с фиксацией координат в геоцентрической системе координат;
- свободная пространственная сеть подверглась параллельному переносу для достижения минимальных невязок в плановом и высотном положении базовых станций относительно пунктов IGS.

Сеть РС СПб устанавливает высокоточную координатную систему на территорию г. Санкт–Петербург и его окрестностей. С помощью каркасной сети и спутниковой геодезической сети 1 класса сеть РС СПб связана с государственной системой координат СК–95, эллипсоид WGS–84 принят в качестве отсчётного для вычисления геодезических координат и высот, это позволило установить надёжную связь ПМСК с Международной единой системой координат ITRF–08 (Сеть референционных станций г. Санкт–Петербург: [сайт]. URL: <http://ref.kgainfo.spb.ru/about/>). Невязки после совмещения не превышали в плане 3 мм, а по высоте 7 мм, местоположения РС рассчитывалось в Международной системе координат ITRF–08 (эпоха 23.05.2013).

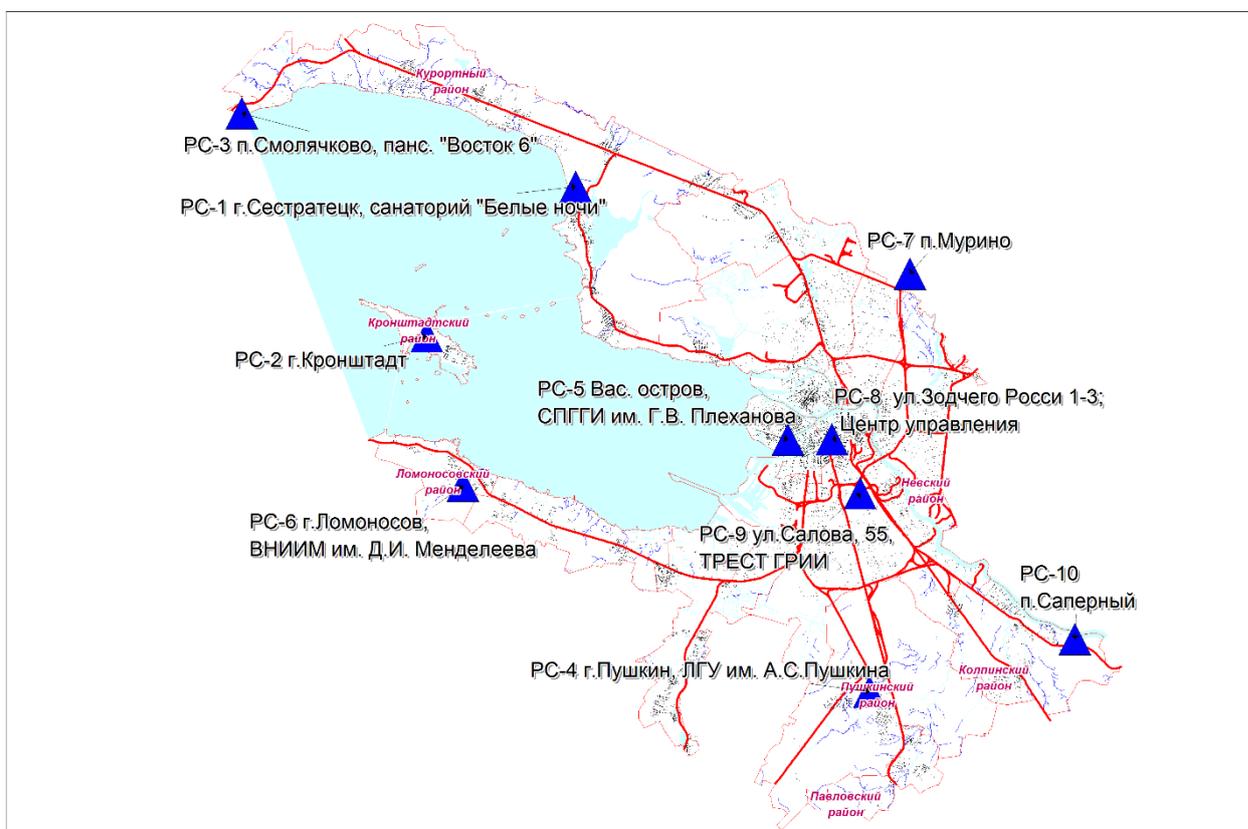


Рисунок 18. Схема расположения референционных станций сети РС СПб

В состав сети входит 10 РС, расположенных в центральной части г. Санкт–Петербург, в Кронштадтском, Ломоносовском, Курортном районе и т.д. (Рис. 18). На каждом пункте установлены приёмники Leica GR10 GNSS с антеннами Leica AR25. Модель Leica GR10 GNSS отличается простотой использования, многофункциональностью и надёжностью работы, приёмник имеет 120 каналов, способен наблюдать до 60 спутников, приёмник поддерживает одновременную работу со спутниками GPS, ГЛОНАСС, Galileo. Он позволяет создавать до 10 параллельных сеансов записи в различные форматы с частотой до 50 Гц. Управление сетью РС СПб ведётся с использованием ПО Leica Центром информационного обеспечения градостроительной деятельности (СПб ГКУ ЦИОГД).

5.1 ПОДГОТОВКА ДАННЫХ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Первый этап работы по анализу изменений в положении постоянно действующих станций ГНСС заключался в подготовке данных для дальнейшего исследования.

Для анализа суточных периодик были использованы часовые RINEX–файлы, полученные со станций сети РС СПб GORN, KUP2, ROSI, расположенных в Василеостровском, Фрунзенском и Центральном районах г. Санкт–Петербург. Частота записи в RINEX–файлах составила раз в 5 секунд. Используя ПО Topcon Magnet Tools, формировались четырёхчасовые файлы наблюдений для дальнейшей отправки на онлайн–сервис CSRS–PPP и получения результатов обработки методом абсолютным методом по стратегии PPP. А для обработки относительным методом в работе использовалось ПО Trimble Business Centre.

5.2 ОБРАБОТКА ДАННЫХ ОТНОСИТЕЛЬНЫМ МЕТОДОМ

Для обработки часовых данных, полученных с референчных станций, создавался проект в ПО Trimble Business Centre, с заранее установленными параметрами (проекция: UTM 36 зона; параметры эллипсоида: ITRF–08).

Архивные данные импортировались в проект и формировались в четырёхчасовые группы наблюдений (Рис. 19). Так как относительный метод подразумевает получения компонентов вектора базовой линии, соединяющих две станции, один из пунктов закреплялся как опорный в плане и по высоте. На весь период наблюдений с помощью встроенной функции «Скачать данные из Интернета» загружались финальные орбиты с ресурса IGS.

После чего проводилась процедура обработки базовой линии. Обработка велась совместно по спутникам системы ГЛОНАСС и GPS.

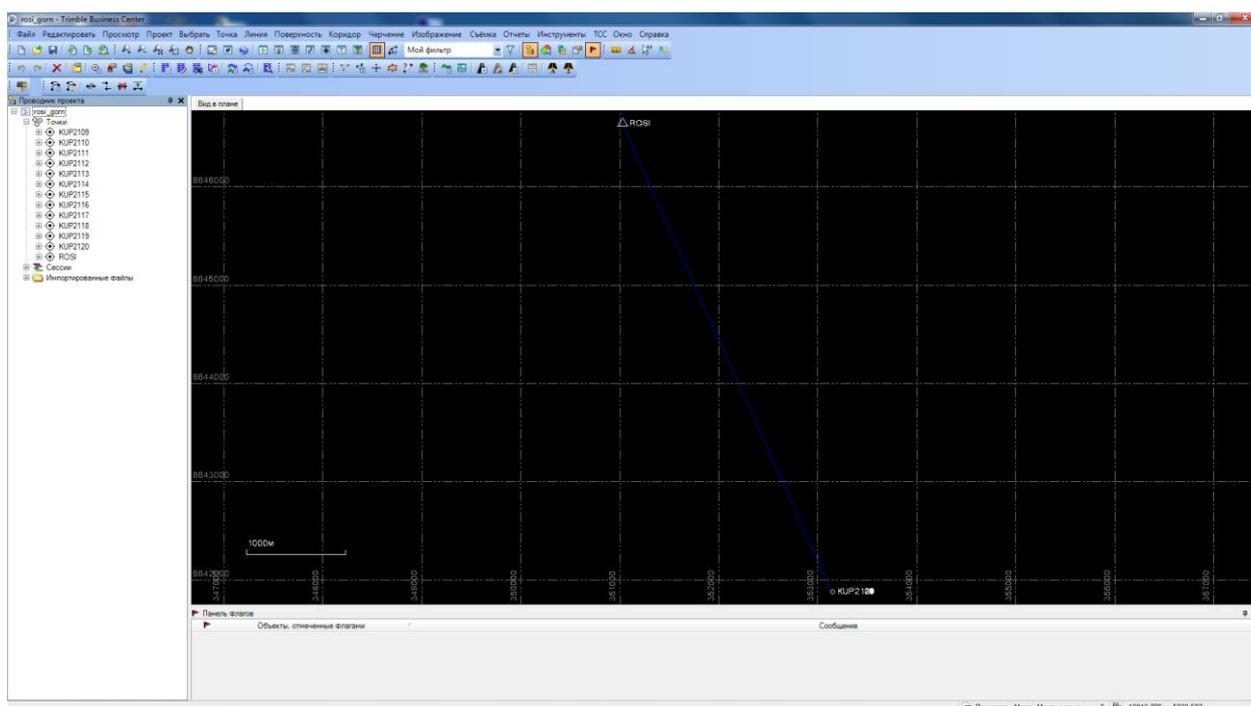


Рисунок 19. Вид рабочего стола при обработке относительным методом в ПО Trimble Business Centre

По окончании работы формировались отчёты по обработке, содержащие в себе общее заключение (тип решения, точность в плане и по высоте, приращения координат, разность высот между точками и расстояние на эллипсоиде) и более подробные выписки по каждой базовой линии (использованная частота, СКО, максимальный PDOP, используемые эфемериды, модель антенны, интервалы обработки, компоненты вектора базовой линии на плоскости, референц–эллипсоиде и глобальные, таблица стандартных ошибок и др.). Средние квадратические погрешности в плане не превышали значений 0,003 м, а по высоте находились в диапазоне 0,006-0,009 м. Полный вид отчёта представлен в Приложении А. Данные из отчётов формировались во временные ряды координат в ПО Microsoft Office Excel в файлы формата (.xlsx) для дальнейшей обработки их методом «Гусеница»-SSA.

5.3 ОБРАБОТКА ДАННЫХ АБСОЛЮТНЫМ МЕТОДОМ

Обработка данных велась методом точного позиционирования (PPP) при помощи онлайн–сервис CSRS–PPP.

Часовые файлы перед отправкой на сервис импортировались в ПО Topcon Magnet Tools и сохранялись в четырёхчасовые RINEX–файлы (сырые данные GPS+) (Рис.20). Затем архивы загружались на сервис для дальнейшей обработки в статическом режиме. В

качестве системы отсчёты выходных данных были заданы параметры международной системы координат ITRF-08.

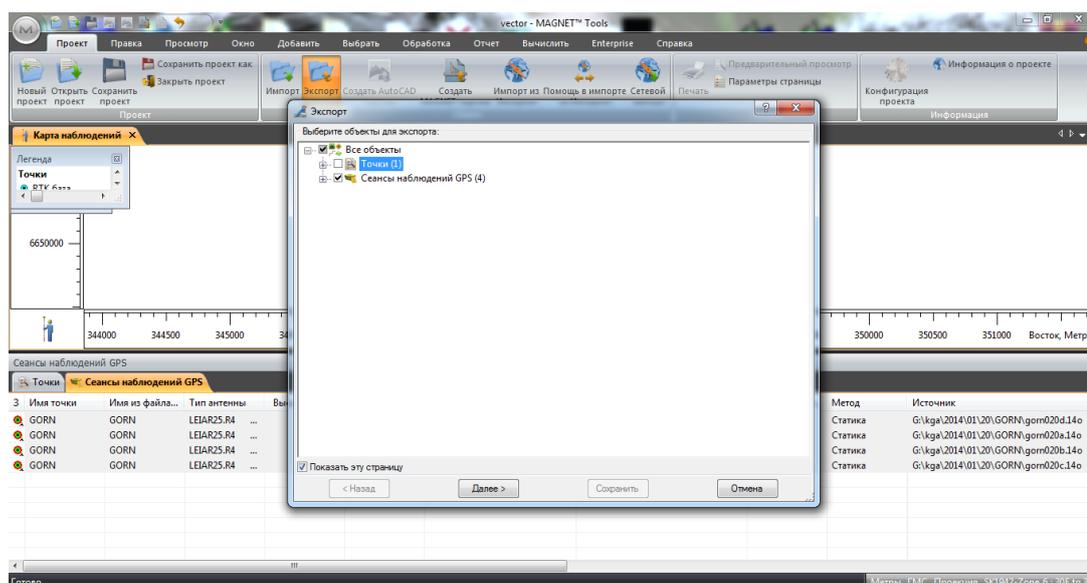


Рисунок 20. Подготовка RINEX файлов в ПО Topcon Magnet Tools

Сервис CSRS-PPP был обновлён в августе 2018 года. Модернизированный портал имеет новые возможности коррекции смещения по высоте, поддержку RINEX v3, машиночитаемый формат текстового файла на выходе, упрощающий автоматизацию дальнейшей обработки. Также сервис способен обрабатывать все созвездия и сигналы ГНСС. Существует возможность отдельной загрузки файлов OTL, которые вносят поправки в измерения за влияние океанических приливов, пользователь имеет возможность самостоятельно отправить файлы OTL или в автоматическом режиме.

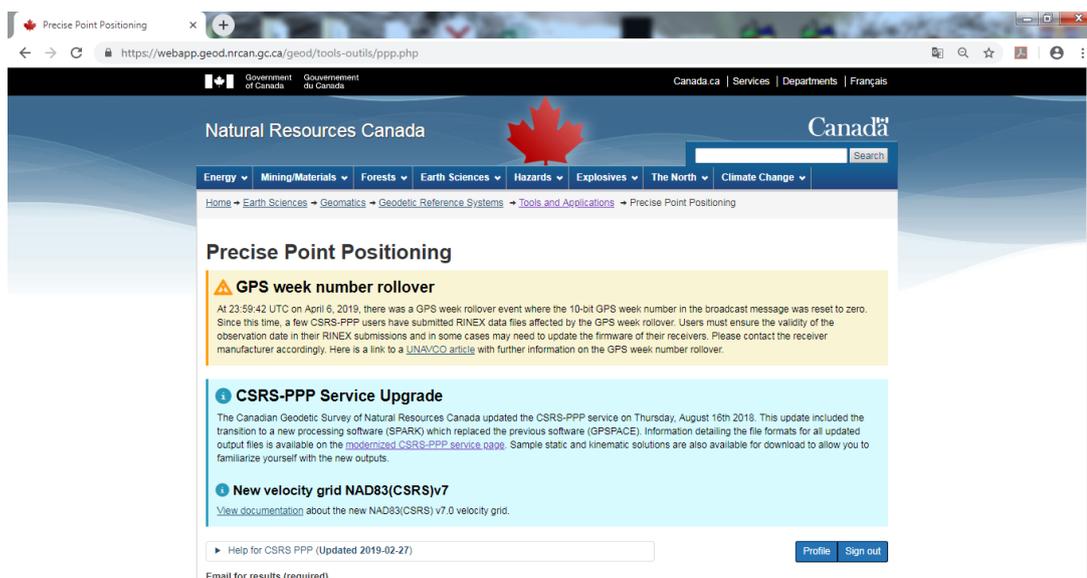


Рисунок 21. Вид начальной страницы онлайн-сервиса CSRS-PPP (Министерство природных ресурсов Канады)

Средние квадратические погрешности в плане не превышали значений 0,014 м, а по высоте находились в диапазоне 0,009-0,022 м.

В результате работы сервиса пользователь получает конечные абсолютные координаты положения пункта. Отчёт работы сервиса содержит в себе:

- отчёт о решении в формате (.pdf), содержащий текстовую и графическую информацию, пример отчёта представлен в Приложении В;
- файлы (.sum), содержащие параметры и результаты обработки в (машиночитаемом) текстовом формате;
- файлы (.pos), содержащие информацию о местоположении для каждой обработанной эпохи;
- текстовый файл в формате (.csv), содержащий информацию о расположении и часах для каждой обработанной эпохи;
- файл формате JSON (.res), содержащий остатки решения для каждой пары эпох / сигналов;
- файл ошибок в текстовом (.txt) формате, содержащий любые ошибки или предупреждения, возникшие во время обработки.

Полученные значения плановых координат и высоты формировались во временные ряды в ПО Microsoft Office Excel в файлы формата (.xlsx) для дальнейшей обработки их методом «Гусеница»-SSA.

5.4 ОБРАБОТКА ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ МЕТОДОМ «ГУСЕНИЦА»-SSA

На следующем этапе временные ряды, полученные на предыдущем шаге, были обработаны с помощью метода «Гусеница»-SSA, реализованного в ПО MathCad 15. В результате обработки временных рядов были выделены аддитивные компоненты ряда, которые можно разделить на три группы (все полученные графики представлены в приложении С):

- тренд;
- периодические составляющие, имеющие различные амплитуды;
- шумовая компонента.

Опираясь на выводы главы 4 и проведённый эксперимент, был сделан выбор параметров длины окна L и способ группировки сингулярного разложения. В пункте 5.4.1 приведены результаты обработки временных рядов, полученных относительным способом. В пункте 5.4.2 приведены результаты анализа изменений взаимного положения станций, полученных абсолютным способом (по стратегии PPP). В пункте 5.4.3 приведены результаты обработки временных рядов координат пунктов, полученных абсолютном

способом (по стратегии PPP). Во всех таблицах в скобках указаны значения размаха колебаний, т.е. величина напряжения от пика до пика (в мм).

5.4.1 АНАЛИЗ ВЗАИМНОГО ПОЛОЖЕНИЯ СТАНЦИЙ ОТНОСИТЕЛЬНЫМ МЕТОДОМ

	GORN-ROSI (Направление З-В)	GORN-ROSI (Направление Ю-С)	GORN-ROSI (Высота)
24-часовой период	+ (3,04 – 4,26 мм)	+ (0,40 – 1,00 мм)	-
12-часовой период	+ (1,82 – 2,70 мм)	-	+ (2,36 – 5,47 мм)
Другие периодики	-	-	-

Таблица 1. Результаты относительного способа на период 01.01.14-20.01.14 (GORN-ROSI)

Экстремумы функции 24-часового периода по направлению Ю-С выпадают на 8.00 и 20.00 (минимум и максимум, соответственно). Экстремумы функции 24-часового периода по направлению З-В выпадают на 8.00 и 20.00 (минимум и максимум, соответственно). Полусуточная компонента по З-В имеет минимумы в 8.00 и 20.00, а максимумы в 4.00 и 16.00. По высоте были выявлены только полусуточные колебания, максимумы и минимумы соответствуют 4.00 и 16.00 (min), 12.00 и 00.00 (max).

	GORN-KUP2 (Направление З-В)	GORN-KUP2 (Направление Ю-С)	GORN-KUP2 (Высота)
24-часовой период	+ (2,89 – 5,53 мм)	+ (6,10 – 6,26 мм)	-
12-часовой период	+ (2,03 – 2,76 мм)	+ (0,7 – 2,47 мм)	-
Другие периодики	-	-	10-часовая (3,11-3,85 мм)

Таблица 2. Результаты относительного способа на период 01.01.14-20.01.14 (GORN-KUP2)

На базовой линии GORN-KUP2 в плановом положении были выявлены суточные и полусуточные компоненты, а в высотном положении только 10-часовая компонента. Экстремумы функции 24-часового периода по направлению Ю-С выпадают на 8.00 и 20.00 (минимум и максимум, соответственно). Экстремумы функции 24-часового периода по направлению З-В выпадают на 00.00 и 12.00 (минимум и максимум, соответственно). Полусуточные составляющие отличны друг от друга, по З-В компонента имеет минимумы в 8.00 и 20.00, а по Ю-С в 4.00 и 16.00, максимумы приходятся на 4.00 и 16.00 по З-В, и на 4.00 и 20.00 по Ю-С.

	ROSI-KUP2 (Направление 3-В)	ROSI- KUP2 (Направление Ю-С)	ROSI - KUP2 (Высота)
24-часовой период	+ (1,96 – 2,03 мм)	+ (7,03 – 8,38 мм)	-
12-часовой период	+ (1,27 – 1,64 мм)	+ (0,09 – 3,61 мм)	+ (2,43 – 3, 51 мм)
Другие периодики	-	-	10-11 часовая (2,48 – 5,19 мм)

Таблица 3. Результаты относительного способа на период 01.01.14-20.01.14 (ROSI-KUP2)

На базовой линии ROSI-KUP2 в плановом положении были выявлены суточные и полусуточные компоненты, а в высотном положении полусуточная компонента и также 10-часовая. Экстремумы функции 24-часового периода по направлению Ю-С выпадают на 20.00 и 08.00 (минимум и максимум, соответственно). Экстремумы функции 24-часового периода по направлению 3-В выпадают на 12.00 и 00.00 (минимум и максимум, соответственно). Полусуточные составляющие отличны друг от друга, по направлению 3-В компонента имеет минимумы в 8.00 и 20.00, а по Ю-С в 4.00 и 16.00, максимумы приходятся на 4.00 и 16.00 по 3-В, и на 4.00 и 20.00 по Ю-С, что повторяет результат полусуточной компоненты базовой линии GORN-KUP2. По высоте были выявлены полусуточные колебания, максимумы и минимумы соответствуют 8.00-12.00 и 20.00-00.00 (min), 12.00 и 00.00-04.00 и 16.00-20.00 (max).

	GORN-ROSI (Направление 3-В)	GORN-ROSI (Направление Ю-С)	GORN-ROSI (Высота)
24-часовой период	+ (1,51 – 1,90 мм)	-	+/- (0,83 – 2,85 мм)
12-часовой период	-	-	-
Другие периодики	224-часовая (≈2,15 мм)	36-40 часовая (0,42 –1,83 мм)	-

Таблица 4. Результаты относительного способа на период 01.06.14-20.06.14 (GORN-ROSI)

Экстремумы функции 24-часового периода по направлению 3-В выпадают на 4.00 и 16.00 (минимум и максимум, соответственно), а по высоте на 8.00 и 20.00.

	GORN-KUP2 (Направление 3-В)	GORN-KUP2 (Направление Ю-С)	GORN-KUP2 (Высота)
24-часовой период	-	-	+ (1,03 – 10,39 мм)
12-часовой период	-	-	-
Другие периодики	52-часовая (0,77 – 2,53 мм)	172-часовая (≈2,72 мм)	76-часовая (2,71 – 11,81 мм)

Таблица 5. Результаты относительного способа на период 01.06.14-20.06.14 (GORN-KUP2)

На базовой линии GORN-KUP2 за период 01.06.14-20.06.14 была выделена только суточная компонента в изменениях высотного положения, максимумы и минимумы соответствуют 8.00 (min), 20.00 (max).

	ROSI-KUP2 (Направление 3-В)	ROSI- KUP2 (Направление Ю-С)	ROSI - KUP2 (Высота)
24-часовой период	-	-	-
12-часовой период	-	-	-
Другие периодики	7-часовая ($\approx 0,75$ мм)	164-часовая ($\approx 3,08$ мм)	76-часовая (3,76 – 9,82 мм)

Таблица 6. Результаты относительного способа на период 01.06.14-20.06.14 (ROSI-KUP2)

В период с 01.06.14 по 20.06.14 суточных и полусуточных компонент в изменениях положения базовой линии ROSI-KUP2 выявлено не было.

	GORN-ROSI (Направление 3-В)	GORN-ROSI (Направление Ю-С)	GORN-ROSI (Высота)
24-часовой период	+ (2,84 – 5,28 мм)	-	+ (5,39 – 6,02 мм)
12-часовой период	-	+ (0,69 – 1,56 мм)	+ (2,19 – 2,79 мм)
Другие периодики	8-часовая (0,93 – 1,36 мм)	20-часовая (0,63 – 1,32 мм)	-

Таблица 7. Результаты относительного способа на период 01.10.14-20.10.14 (GORN-ROSI)

За период 01.10.14-20.10.14 по направлению 3-В выявлена суточная компонента, максимум которой соответствует 20.00, а минимум 8.00. Восьмичасовая периодика имеет минимумы в 4.00/12.00/20.00, а максимумы 8.00/16.00/00.00. Полусуточная компонента направления Ю-С к концу наблюдений имеет смещение экстремумов функции на 4 часа, максимумы и минимумы соответствуют 4.00 и 16.00 (min), 12.00 и 00.00 (max) в начале.

Экстремумы функции 24-часового периода по высоте выпадают на 4.00 и 16.00 (минимум и максимум, соответственно). По высоте были выявлены также полусуточные колебания, минимумы и максимумы соответствуют 4.00-8.00 и 16.00-20.00 (min), 4.00-8.00 и 16.00-20.00 (max).

	GORN-KUP2 (Направление 3-В)	GORN-KUP2 (Направление Ю-С)	GORN-KUP2 (Высота)
24-часовой период	+ (4,04 – 5,90 мм)	+ ($\approx 6,34$ мм)	-
12-часовой период	-	-	-
Другие периодики	+	-	28-часовая и 56- часовая ($\approx 11,59$ мм)

			и 9,68 мм соответственно)
--	--	--	------------------------------

Таблица 8. Результаты относительного способа на период 01.10.14-20.10.14 (GORN-KUP2)

В плановом положении выделилась суточная динамика, максимум который соответствует 20.00, а минимум 8.00. Стоит отметить, что в направлении 3-В периодами проявляются 8-часовые компоненты различной амплитуды (min 4.00/12.00/20.00, max 8.00/16.00/00.00).

	ROSI-KUP2 (Направление 3-В)	ROSI- KUP2 (Направление Ю-С)	ROSI - KUP2 (Высота)
24 – часовой период	+ (2,58 – 3,62 мм)	+ (\approx 9,57 мм)	-
12- часовой период	-	-	-
Другие периодики	-	-	-

Таблица 9. Результаты относительного способа на период 01.10.14-20.10.14 (ROSI-KUP2)

Экстремумы функции 24-часового периода по направлению 3-В выпадают на 8.00 и 20.00 (минимум и максимум, соответственно), а по высоте на 20.00 и 8.00.

5.4.2 АНАЛИЗ ВЗАИМНОГО ПОЛОЖЕНИЯ СТАНЦИЙ ПО СТРАТЕГИИ PPP

	GORN-ROSI (Направление 3-В)	GORN-ROSI (Направление Ю-С)	GORN-ROSI (Высота)
24 – часовой период	+ (2,09 – 2,51 мм)	-	+ (\approx 3,20 мм)
12- часовой период	-	-	+ (5,50 – 10,30 мм)
Другие периодики	8-часовая (2,59 – 6,2 мм)	8-часовая (1,07 – 1,52 мм)	-

Таблица 10. Результаты абсолютного способа на период 01.01.14-20.01.14 (GORN-ROSI)

По направлению 3-В выделилась суточная динамика, максимум который соответствует 4.00, а минимум 20.00. В плановом положении зафиксирована восьмичасовая компонента, максимумы которой соответствуют 8.00/16.00/00.00, а минимумы 4.00/12.00/20.00.

По высоте выявлена суточная и полусуточная периодики. Экстремумы функции 24-часового периода по высоте выпадают на 16.00 и 4.00 (минимум и максимум, соответственно). По высоте были выявлены также полусуточные колебания, минимумы и максимумы соответствуют 12.00 и 00.00 (min), 8.00 и 20.00 (max), на графике наблюдается дальнейшее смещение максимумов на четыре часа 4.00 и 16.00, соответственно.

	GORN-KUP2 (Направление З-В)	GORN-KUP2 (Направление Ю-С)	GORN-KUP2 (Высота)
24-часовой период	+ (1,69 – 2,33 мм)	+ (1,39 – 2,64 мм)	+ (4,20 – 4,50 мм)
12-часовой период	-	-	-
Другие периодики	8-часовая (2,41 – 4,7 мм)	8-часовая (0,70 – 1,83 мм)	8-часовая (3,11 – 3,85 мм)

Таблица 11. Результаты абсолютного способа на период 01.01.14-20.01.14 (GORN-KUP2)

По направлению З-В выделилась суточная динамика, максимум который соответствует 12.00, а минимум 20.00. По направлению Ю-С также определена суточная периодика, максимум который соответствует 8.00, а минимум 20.00. В плановом положении прослеживается восьмичасовая периодическая составляющая, амплитуда которой в направлении Ю-С сильно варьируется, но экстремумы которых выпадают на одни и те же сроки: 8.00/16.00/00.00 (max); 4.00/12.00/20.00 (min).

В высотном положении прослеживается суточная периодика с максимумом в 16.00, а минимумов в 8.00 и слабая восьмичасовая составляющая.

	ROSI-KUP2 (Направление З-В)	ROSI- KUP2 (Направление Ю-С)	ROSI - KUP2 (Высота)
24 – часовой период	+ (2,21 – 3,96 мм)	-	+ (5,21 – 11,03 мм)
12- часовой период	+ (2,07 – 2,87 мм)	+ (0,96 – 1,85 мм)	-
Другие периодики	-	-	-

Таблица 12. Результаты абсолютного способа на период 01.01.14-20.01.14 (ROSI-KUP2)

По направлению З-В выделилась суточная динамика, максимум который соответствует 12.00, а минимум 00.00, и полусуточная, экстремумы которой выпадают на сроки: 00.00/12.00 (max); 8.00/16.00 (min), направление Ю-С содержит аналогичную полусуточную составляющую.

Высота содержит суточную компоненту, максимумы фиксируются в 12.00, минимумы в 8.00.

	GORN-ROSI (Направление З-В)	GORN-ROSI (Направление Ю-С)	GORN-ROSI (Высота)
24 – часовой период	-	-	-
12- часовой период	-	-	+ (7,23 – 7,50 мм)
Другие периодики	8-часовая (0,24 – 2,54 мм)	8-часовая (0,36 – 3,72 мм)	8-часовая (0,27 – 2,80 мм)

Таблица 13. Результаты абсолютного способа на период 01.06.14-20.06.14 (GORN-ROSI)

Высота содержит полусуточную компоненту, максимумы фиксируются в 8.00 и 20.00, минимумы в 12.00 и 00.00. Метод «Гусеница»-SSA выделил восьмичасовую компоненту с различной амплитудой в плановом и высотном положении.

	GORN-KUP2 (Направление З-В)	GORN-KUP2 (Направление Ю-С)	GORN-KUP2 (Высота)
24-часовой период	-	-	+ (1,31 – 11,90 мм)
12-часовой период	+ (3,27 – 3,93 мм)	-	+ (\approx 3,36 мм)
Другие периодики	-	-	-

Таблица 14. Результаты абсолютного способа на период 01.06.14-20.06.14 (GORN-KUP2)

Полусуточная компонента по направлению З-В имеет минимумы в 8.00 и 20.00, а максимумы в 4.00 и 12.00.

В высотном положении имеется две составляющие компоненты: суточная и полусуточная. Максимумы суточной динамики приходятся на 8.00, а минимумы на 20.00. Полусуточная компонента имеет максимумы в 8.00 и 20.00, а минимумы в 00.00 и 12.00.

	ROSI-KUP2 (Направление З-В)	ROSI- KUP2 (Направление Ю-С)	ROSI - KUP2 (Высота)
24 – часовой период	+ (2,45 – 2,82 мм)	-	-
12- часовой период	+ (5,10 – 6,37 мм)	-	+ (5,91 – 12,72 мм)
Другие периодики	-	8-часовая (0,23 – 2,34 мм)	8-часовая (0,41 – 2,80 мм)

Таблица 15. Результаты абсолютного способа на период 01.06.14-20.06.14 (ROSI-KUP2)

В направлении З-В чётко выделяются суточная и полусуточная компоненты. Максимум суточной компоненты соответствует 16.00, а минимум 4.00, экстремумы полусуточной соответствуют: 00.00/12.00 (max); 4.00/16.00 (min).

В высотном положении имеется полусуточная компонента и восьмичасовая. Полусуточная компонента имеет максимумы в 12.00 и 00.00, минимумы в 8.00 и 20.00.

	GORN-ROSI (Направление З-В)	GORN-ROSI (Направление Ю-С)	GORN-ROSI (Высота)
24 – часовой период	+ (3,03 – 3,57 мм)	-	-
12- часовой период	+ (2,23 – 4,53 мм)	+ (0,74 – 1,22 мм)	-
Другие периодики	-	8-часовая (1,36 – 3,81 мм)	8-часовая (2,92 – 6,26 мм)

Таблица 16. Результаты абсолютного способа на период 01.10.14-20.10.14 (GORN-ROSI)

В 3-В направлении присутствуют суточная и полусуточная периодики. Максимум суточной компоненты соответствует 20.00, а минимум 12.00, экстремумы полусуточной соответствуют: 8.00/20.00 (max); 4.00/16.00 (min).

В направлении Ю-С выделилась 12-часовая периодика, максимумы которой соответствуют 4.00 и 16.00, а минимумы 8.00 и 20.00.

В высотном положении и направлении Ю-С присутствует восьмичасовая компонента.

	GORN-KUP2 (Направление 3-В)	GORN-KUP2 (Направление Ю-С)	GORN-KUP2 (Высота)
24-часовой период	-	-	-
12-часовой период	+ (1,61 – 4,07 мм)	-	-
Другие периодики	-	8-часовая (0,56 – 2,42 мм); 20-часовая (0,79 – 1,05 мм)	8-часовая (4,07 – 7,90 мм)

Таблица 17. Результаты абсолютного способа на период 01.10.14-20.10.14 (GORN-KUP2)

В 3-В направлении присутствует полусуточная периодика с различной амплитудой, экстремумы полусуточной компоненты соответствуют: 4.00/16.00 (max); 12.00/00.00 (min).

В высотном положении и направлении Ю-С выделилась восьмичасовая компонента, максимумы которой соответствуют 8.00/16.00/00.00, а минимумы 4.00/12.00/20.00.

	ROSI-KUP2 (Направление 3-В)	ROSI- KUP2 (Направление Ю-С)	ROSI - KUP2 (Высота)
24 – часовой период	-	-	-
12- часовой период	+ (5,05 – 6,07 мм)	+ (0,47 – 1,54 мм)	+ (3,56 – 5,13 мм)
Другие периодики	8-часовая (0,82 – 4,49 мм)	8-часовая (0,23 – 2,34 мм)	224-часовая (≈4,60 мм)

Таблица 18. Результаты абсолютного способа на период 01.10.14-20.10.14 (ROSI-KUP2)

Плановое и высотное положение содержит полусуточную компоненту. Максимумы 12-часовой компоненты в 3-В направлении фиксируются в 4.00 и 16.00, минимумы в 8.00 и 20.00. Максимумы 12-часовой компоненты в Ю-С направлении фиксируются в 8.00 и 20.00, минимумы в 4.00 и 12.00. Максимумы 12-часовой компоненты в высотном положении фиксируются в 4.00 и 16.00, минимумы в 4.00 и 16.00. Метод «Гусеница»-SSA выделил восьмичасовую компоненту с различной амплитудой в плановом положении, характеристики которых схожи (4.00/12.00/20.00 (max); 8.00/16.00/00.00 (min)).

5.4.3 АНАЛИЗ КООРДИНАТ, ПОЛУЧЕННЫХ ПО СТРАТЕГИИ PPP

	GORN (Направление 3-В)	GORN (Направление Ю-С)	GORN (Высота)
24 – часовой период	-	-	-
12- часовой период	+ (0,08 – 1,91 мм)	+ (\approx 1,96 мм)	-
Другие периодики	8-часовая (0,09 – 2,73 мм)	8-часовая (0,05 – 3,92 мм)	8-часовая (2,14 – 5,76 мм); 252-часовая (\approx 14,59 мм)

Таблица 19. Результаты абсолютного способа на период 01.01.14-20.01.14 (GORN)

	KUP2 (Направление 3-В)	KUP2 (Направление Ю-С)	KUP2 (Высота)
24-часовой период	+ (1,73 – 2,60 мм)	-	+ (3,52 – 10,30 мм)
12-часовой период	-	+ (1,86 – 3,40 мм)	-
Другие периодики	8-часовая (4,16 – 5,00 мм)	292-часовая (\approx 4,59 мм)	-

Таблица 20. Результаты абсолютного способа на период 01.01.14-20.01.14 (KUP2)

	ROSI (Направление 3-В)	ROSI (Направление Ю-С)	ROSI (Высота)
24 – часовой период	-	-	+ (6,91 – 10,60 мм)
12- часовой период	+ (1,80 – 2,07 мм)	+ (1,57 – 2,07 мм)	-
Другие периодики	8-часовая (0,74 – 7,35 мм)	-	-

Таблица 21. Результаты абсолютного способа на период 01.01.14-20.01.14 (ROSI)

	GORN (Направление 3-В)	GORN (Направление Ю-С)	GORN (Высота)
24 – часовой период	-	+ (2,03 – 4,53 мм)	-
12- часовой период	-	+ (2,55 – 3,12 мм)	+ (2,29 – 10,97 мм)
Другие периодики	8-часовая (2,33 – 4,63 мм)	-	168-часовая (\approx 8,44 мм)

Таблица 22. Результаты абсолютного способа на период 01.06.14-20.06.14 (GORN)

	KUP2	KUP2	KUP2
--	------	------	------

	(Направление 3-В)	(Направление Ю-С)	(Высота)
24-часовой период	+ (3,25 – 8,96 мм)	+ (3,01 – 5,53 мм)	-
12-часовой период	-	+ (1,70 – 2,65 мм)	-
Другие периодики	8-часовая (1,22 – 4,83 мм)	-	160-часовая (≈7,51 мм)

Таблица 23. Результаты абсолютного способа на период 01.06.14-20.06.14 (KUP2)

	ROSI (Направление 3-В)	ROSI (Направление Ю-С)	ROSI (Высота)
24 – часовой период	+ (5,70 – 10,11 мм)	+ (1,52 – 4,48 мм)	-
12- часовой период	-	-	+ (2,85 – 12,73 мм)
Другие периодики	-	-	160-часовая (≈7,48 мм)

Таблица 24. Результаты абсолютного способа на период 01.06.14-20.06.14 (ROSI)

	GORN (Направление 3-В)	GORN (Направление Ю-С)	GORN (Высота)
24 – часовой период	-	+ (3,03 – 4,96 мм)	+ (8,89 – 13,12 мм)
12- часовой период	-	-	-
Другие периодики	-	8-часовая (0,27 – 3,67 мм)	284-часовая (≈15,16 мм)

Таблица 25. Результаты абсолютного способа на период 01.10.14-20.10.14 (GORN)

	KUP2 (Направление 3-В)	KUP2 (Направление Ю-С)	KUP2 (Высота)
24-часовой период	-	+ (3,42 – 4,11 мм)	+ (3,36 – 13,26 мм)
12-часовой период	+ (0,98 – 8,21 мм)	-	-
Другие периодики	8-часовая (1,53 – 5,00 мм)	-	-

Таблица 26. Результаты абсолютного способа на период 01.10.14-20.10.14 (KUP2)

	ROSI (Направление 3-В)	ROSI (Направление Ю-С)	ROSI (Высота)
24 – часовой период	-	+ (3,97 – 6,19 мм)	-
12- часовой период	+ (0,10 – 2,18 мм)	-	+ (2,85 – 12,73 мм)
Другие периодики	-	8-часовая (0,67 – 2,27 мм)	-

Таблица 27. Результаты абсолютного способа на период 01.10.14-20.10.14 (ROSI)

5.5 АНАЛИЗ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ СТАНЦИЙ

Суточные периодические движения в плане (З-В) 01.01.14-20.01.14:		
Период (в часах)	Trimble Business Centre	CSRS-PPP (NRCan)
24	GORN-ROSI, GORN-KUP2, ROSI-KUP2	GORN-ROSI, GORN-KUP2, ROSI-KUP2
12	GORN-ROSI, GORN-KUP2, ROSI-KUP2	ROSI-KUP2
8	-	GORN-ROSI, GORN-KUP2
нет	-	-
Суточные периодические движения в плане (Ю-С) 01.01.14-20.01.14:		
Период (в часах)	Trimble Business Centre	CSRS-PPP (NRCan)
24	GORN-ROSI, GORN-KUP2, ROSI-KUP2	GORN-KUP2
12	GORN-KUP2, ROSI-KUP2	ROSI-KUP2
8	-	GORN-ROSI, GORN-KUP2
нет	-	-
Суточные периодические движения по высоте 01.01.14-20.01.14:		
Период (в часах)	Trimble Business Centre	CSRS-PPP (NRCan)
24	-	GORN-ROSI, GORN-KUP2, ROSI-KUP2
12	GORN-ROSI, ROSI-KUP2	GORN-ROSI
8	-	GORN-KUP2
нет	GORN-KUP2	-

Таблица 28. Суточные периодические движения станций РС СПб (на период 01.01.14-20.01.14)

Суточные периодические движения в плане (З-В) 01.06.14-20.06.14:		
Период (в часах)	Trimble Business Centre	CSRS-PPP (NRCan)
24	GORN-ROSI	ROSI-KUP2
12	-	GORN-KUP2, ROSI-KUP2
8	-	GORN-ROSI
нет	GORN-KUP2, ROSI-KUP2	-
Суточные периодические движения в плане (Ю-С) 01.06.14-20.06.14:		
Период (в часах)	Trimble Business Centre	CSRS-PPP (NRCan)
24	-	-

12	-	-
8	-	GORN-ROSI, ROSI-KUP2
нет	GORN-ROSI, GORN-KUP2, ROSI-KUP2	GORN-KUP2
Суточные периодические движения по высоте 01.06.14-20.06.14:		
Период (в часах)	Trimble Business Centre	CSRS-PPP (NRCan)
24	GORN-ROSI, GORN-KUP2	GORN-KUP2
12	-	GORN-ROSI, GORN-KUP2, ROSI-KUP2
8	-	GORN-ROSI, ROSI-KUP2
нет	ROSI-KUP2	-

Таблица 29. Суточные периодические движения станций РС СПб (на период 01.06.14-20.06.14)

Суточные периодические движения в плане (З-В) 01.06.14-20.06.14:		
Период (в часах)	Trimble Business Centre	CSRS-PPP (NRCan)
24	GORN-ROSI, GORN-KUP2, ROSI-KUP2	GORN-ROSI
12	-	GORN-ROSI, ROSI-KUP2
8	GORN-ROSI	GORN-KUP2, ROSI-KUP2
нет	-	-
Суточные периодические движения в плане (Ю-С) 01.10.14-20.10.14:		
Период (в часах)	Trimble Business Centre	CSRS-PPP (NRCan)
24	GORN-KUP2, ROSI-KUP2	-
12	GORN-ROSI	GORN-ROSI, ROSI-KUP2
8	-	GORN-ROSI, GORN-KUP2, ROSI-KUP2
нет	-	-
Суточные периодические движения по высоте 01.10.14-20.10.14:		
Период (в часах)	Trimble Business Centre	CSRS-PPP (NRCan)
24	GORN-ROSI	-
12	GORN-ROSI	ROSI-KUP2
8	-	GORN-ROSI, GORN-KUP2
нет	GORN-KUP2, ROSI-KUP2	-

Таблица 30. Суточные периодические движения станций РС СПб (на период 01.10.14-20.10.14)

В результате обработки временных рядов, полученных различными способами позиционирования, методом «Гусеница»-SSA выявились отличные друг от друга периодики, но существуют общие тенденции. Обобщая вышеприведённые результаты, можно выделить несколько пунктов:

- в зимний период (01.01.14-20.01.14) относительным и абсолютным (PPP) способами при анализе изменений взаимного положения пунктов выделились 24-часовая и 12-часовая компонента в плановом положении. В высотном положении выделилась общая для того и другого способа позиционирования 12-часовая периодика. Абсолютным методом при анализе взаимного положения в высотном положении во всех измерениях выделилась суточная составляющая;
- в зимний период (01.01.14-20.01.14) абсолютным способом (PPP) в плановом и высотном положении выделилась 8-часовая компонента;
- в летний период (01.06.14-20.06.14) относительным способом суточная и полусуточная компонента фактически не выявилась, но в абсолютном способе при анализе приращений выделились 24-часовая, 12-часовая и 8-часовая составляющая в плановом и высотном положении;
- при анализе взаимного положения абсолютным способом в летний период (01.06.14-20.06.14) в изменениях высотного положения выявлена 8-часовая и 24-часовая периодика, во всех измерениях выявлена 12-часовая компонента;
- в анализе координат абсолютным методом в летний период выявлена 24-часовая компонента в плане и 12-часовая по высоте;
- в осенний период (01.10.14-20.10.14) в изменении планового положения относительным способом были обнаружены 24-часовые компоненты, а при анализе приращений по стратегии PPP практически во всех измерениях были выявлены 12-часовая и 8-часовая периодика;
- в осенний период (01.10.14-20.10.14) в изменении высотного положения относительным способом позиционирования полусуточные и суточные колебания были выявлены только на базисе GORN-ROSI, тогда как абсолютным способом были выявлены 12-часовые и 8-часовые компоненты;
- при анализе координат, полученных по стратегии PPP, в осенний период (01.10.14-20.10.14) на всех трёх пунктах выделилась суточная периодика в направлении Ю-С и 12-часовая в направлении З-В. Изменения высот имеют суточную и полусуточную периодику;

- в диапазоне всех периодов наблюдений абсолютными и относительными способами позиционирования выделяются периодики различных частот от 5-часовых до сезонных, период которых составляет более 150 часов.

Амплитуды изменений в положении референчных станций в период (01.01.14-20.01.14) составили:

- относительным способом в плане средняя амплитуда суточных колебаний $A_{24\text{ ч}} = 2,03$ мм, полусуточных $A_{12\text{ ч}} = 0,91$ мм, по высоте средняя амплитуда полусуточных колебаний $A_{12\text{ ч}} = 1,23$ мм;
- при анализе взаимного положения станций, используя стратегию PPP, средняя амплитуда суточных колебаний в плане составила $A_{24\text{ ч}} = 1,17$ мм, полусуточных, $A_{12\text{ ч}} = 0,96$ мм, по высоте средняя амплитуда суточных колебаний $A_{24\text{ ч}} = 2,35$ мм, а полусуточных $A_{12\text{ ч}} = 3,95$ мм;
- при анализе координат абсолютным способом (PPP) в плане средняя амплитуда суточных колебаний $A_{24\text{ ч}} = 1,08$ мм, полусуточных $A_{12\text{ ч}} = 0,83$ мм, по высоте средняя амплитуда суточных $A_{24\text{ ч}} = 3,91$ мм.

Амплитуды изменений в положении референчных станций в период (01.06.14-20.06.14) составили:

- относительным способом в плане средняя амплитуда суточных колебаний $A_{24\text{ ч}} = 0,85$ мм, по высоте средняя амплитуда суточных колебаний $A_{24\text{ ч}} = 0,94$ мм;
- при анализе взаимного положения станций, используя стратегию PPP, средняя амплитуда суточных колебаний в плане составила $A_{24\text{ ч}} = 1,31$ мм, полусуточных, $A_{12\text{ ч}} = 1,17$ мм, по высоте средняя амплитуда суточных колебаний $A_{24\text{ ч}} = 3,30$ мм, а полусуточных $A_{12\text{ ч}} = 2,45$ мм;
- при анализе координат абсолютным способом (PPP) в плане средняя амплитуда суточных колебаний $A_{24\text{ ч}} = 2,45$ мм, полусуточных $A_{12\text{ ч}} = 1,25$ мм, по высоте средняя амплитуда полусуточных $A_{12\text{ ч}} = 3,60$ мм.

Амплитуды изменений в положении референчных станций в период (01.10.14-20.10.14) составили:

- относительным способом в плане средняя амплитуда суточных колебаний $A_{24\text{ ч}} = 2,03$ мм, полусуточных $A_{12\text{ ч}} = 0,56$ мм, по высоте средняя амплитуда суточных колебаний $A_{24\text{ ч}} = 2,85$ мм, полусуточных $A_{12\text{ ч}} = 1,25$ мм;

- при анализе положения станций, используя стратегию PPP, средняя амплитуда суточных колебаний в плане составила $A_{24\text{ ч}} = 1,65$ мм, полусуточных, $A_{12\text{ ч}} = 1,25$ мм, по высоте средняя амплитуда полусуточных периодик $A_{12\text{ ч}} = 2,17$ мм;
- при анализе координат абсолютным способом (PPP) в плане средняя амплитуда суточных колебаний $A_{24\text{ ч}} = 2,14$ мм, полусуточных $A_{12\text{ ч}} = 0,42$ мм, по высоте средняя амплитуда полусуточных $A_{12\text{ ч}} = 4,82$ мм, полусуточных $A_{12\text{ ч}} = 3,90$ мм.

В результате проведенной работе были выделены изменения в положении постоянно действующих станций ГНСС, заключающиеся в наличие основного тренда и других различных периодических составляющих компонентах. Как отмечалось выше, результат работы метода «Гусеница»-SSA не объясняет причин возникновения данных периодик. Трактовка изменений положений постоянно действующих станций ГНСС требует систематического подхода для всей совокупности станций, а также для каждой станции конкретно, так как объекты могут быть расположены в местах с различным уровнем атмосферной, гидрологической, океанической и т.п. нагрузками.

Выяснение причин возникновения периодических составляющих играет важную роль при геодезическом мониторинге. Отличие причин изменений местоположения станций, связанных с естественными процессами, от негативных является одной из ключевых задач при обеспечении геодезических работ, так как помогает избежать аварийных ситуаций и повысить точность и достоверность измерений.

Заключение

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы была изучена теория методов спутникового позиционирования. Особое внимание было уделено абсолютному способу, а именно стратегии точного позиционирования (PPP). Были рассмотрены вопросы, касающиеся существующих методов геодезического мониторинга. Одна из важнейших задач в ходе выполнения работ заключалась в ознакомлении с существующей литературой, посвященной спутниковым методам в геодезии. При обработке данных, полученных с сети РС СПб, были освоены основные функции коммерческого геодезического программного обеспечения (Trimble Business Centre, Topcon Magnet Tools) и онлайн-сервиса CRSR-PPP (Министерство природных ресурсов Канады). Особое внимание в работе уделено изучению теории обработки временных рядов и алгоритма «Гусеница»-SSA, в работе проведён эксперимент, посвящённый анализу влияния уровня зашумлённости ряда на результат работы алгоритма SSA. Полученные временные ряды были обработаны, результаты анализа были подробно описаны.

Именно в детальном анализе суточной динамики заключается новизна данной работы.

Продолжение работы может проводиться в нескольких направлениях. С одной точки зрения, требуется теоретическое описание полученных результатов, то есть выявление причин движений постоянно действующих станций ГНСС, для этого необходимо исследовать метеорологические, геологические и другие особенности местности, на которой расположена сеть. Важно отметить, что анализ требует конкретного поиска и объяснения причин для каждой станции, так как условия могут быть отличны даже на весьма коротких расстояниях. С другой стороны, необходимо практическое продолжение работы, а именно проведение исследований в другие сезоны, по более продолжительному временному ряду, по возможности с другой частотой измерений на базовых станциях.

Литература

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. Голяндина Н.Э. Метод «Гусеница»-SSA: анализ временных рядов: Учеб. пособие. СПб, 2004, 76 с.
3. Главные компоненты временных рядов: метод «Гусеница». Под. ред. Д.Л. Данилова, А.А. Жиглявского. СПб: Пресском, 1997, 307 с.
4. Жуков Б.Н. Геодезический контроль сооружений и оборудования промышленных предприятий. Новосибирск: СГГА, 2003, 356 с.
5. Жуков Б.Н., Карпик А.П. Геодезический контроль инженерных объектов промышленных предприятий и гражданских комплексов. Новосибирск: СГГА, 2006, 148 с.
6. Курошев Г.Д. Геодезия и география: Учебник. – СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 1999. – 372 с.
7. Курошев Г.Д. Космическая геодезия и глобальные системы позиционирования: Учебное пособие. – СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 1999. – 182 с.
8. Селиверстов Ю. П. Землеведение: Учеб. пособие для студ. вузов / Ю. П. Селиверстов, А. А. Бобков. — М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 304 с.
9. Серапинас Б.Б. Глобальные системы позиционирования: Учеб. изд. - М.: ИКФ «Каталог», 2002. – 106 с.

Статьи в журналах

10. Александров Ф.И. Выделение аддитивных компонент временного ряда при пакетной обработке методом «Гусеница»-SSA // Вестник СПбГУ. Сер. 1, 2006. №2. С. 71 – 74.
11. Алешин И.М., Алпатов В.В. [и др.] Оперативная служба мониторинга ионосферы по данным станций глобальных навигационных спутниковых систем // Геомагнетизм и аэрномия. 2014. Т. 54. № 4. С. 496 – 502.
12. Антонович К.М., Карпик А.П., Клепиков А.Н. Спутниковый мониторинг земной поверхности // Геодезия и картография. 2004. № 1. С. 4-11
13. Антонович К.М., Липатников Л.А. Совершенствование методики точного дифференциального позиционирования по результатам ГНСС-измерений (Precise Point

- Positioning) // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2013. № 4/С. С. 44 – 47.
14. Богданец Е.С., Черёмухина О.О. Анализ влияния температурного поля на высотное положение сети базовых GNSS-станций // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2017. № 1. С. 17 – 21.
 15. Вохмянин С.В. Испытание алгоритма метода «Гусеница-SSA» для восстановления временного ряда // Вестник СибГУ им. М.Ф. Решетникова. 2010. №2. С. 59 – 62.
 16. Горшков В.Л., Смирнов С.С., Щербакова Н.В. Нагрузочные эффекты в ГНСС наблюдениях при исследовании региональной геодинамики // Вестник СПбГУ. Сер. 1, 2012. №2. С. 148 – 156.
 17. Горшков В.Л., Н.В. Щербакова. 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.
 18. 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. № 2. С. 246 – 251.
 19. Иодис В.Я., Бойков А.В., Конева А.А. Использование аппаратуры JAVAD GNSS для оценки пространственных смещений здания «Триумф Палас» // Геопрофи, 2016. № 2. С. 10-13.
 20. Куприянов А.О., Тихонов В.В., Морозов Д.А., Перминов А.Ю. Оперативный мониторинг параметров ионосферы в локальной области по результатам мультиспектральных ГНСС-измерений // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2018. Т. 62. № 2. С. 616 – 624.
 21. Мельников А.Ю. Анализ точности метода Precise Point Positioning для оценки возможности его применения в геодинамических исследованиях // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2018. Т. 62. № 2. С. 605 – 616.
 22. Мысленков С.А., Сильвестрова К.П. [и др.] Возможности использования GPS-дрифтеров для исследования течений на шельфе Чёрного моря // Океанология. 2016. Т. 56. № 1. С. 159 – 166.
 23. Рожнов В.В., Платонов Н.Г., Найдено С.В., Мордвинцев И.Н., Иванов Е.В. Перемещение самки белого медведя (*Ursus Maritimus*) в Карском море в период летнего таяния льда // Доклады Академии наук. 2017. Т. 472. № 3. С. 359 – 363.

24. Устинов А.В., Кафтан В.И. Суточные и полусуточные колебания в результатах локального мониторинга с использованием глобальных спутниковых систем // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2016. Т. 282. С. 3 – 13.
25. Уткин В.И., Белоусова А.А., Тягунов Д.С., Баландин Д.В. Исследование геодинамики Северного и Среднего Урала по данным GPS // Доклады Академии наук. 2010. Т. 431. № 2. С. 246 – 251.
26. 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.
27. Шубкина А.В., Северцов А.С., Чаянов Н.В. Применение аппаратно-программного комплекса на базе GPS для характеристики передвижений и поведения животных степной и лесостепной зон // Зоологический журнал. 2008. Т. 87. № 11. С. 1391 – 1401.
28. Assinovskaya B., Shchulin J., Gorshkov V., Shcherbakova N. On recent geodynamics of the Eastern Baltic Sea region // Baltrica, 2011. № 24 (2). P. 61 – 70.
29. 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.
30. Chasagne O. One-centimeter accuracy with PPP // InsideGNSS. – 2012. – No. 2. – P. 49 – 54.
31. Kouba J., Héroux P. Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products // GPS Solutions. – 2001.–Vol.5. – № 2. – P.12 – 28.

Статьи в сборниках

32. Шевчук С.О., Малютина К.И., Липатников Л.А. Перспективы использования свободного программного обеспечения для постобработки ГНСС-измерений // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр.: 17-21 апреля 2017 г., Новосибирск : Пленарное заседание : сб. материалов. – Новосибирск: СГУГиТ, 2017. С. 74 – 89.
33. Q. Chen, M. Weigelt, N. Sneeuw, and T. van Dam On Time-Variable Seasonal Signals: Comparison of SSA and Kalman FilteringBased Approach // VIII Hotine –Marussi Symposium on Mathematical Geodesy.: Proceedings of the Symposium in Rome 17-21 June, 2013. – P.75 – 80.

Ресурсы сети Интернет

34. Сайт проекта Ричарда Б. Энгли, посвящённый онлайн-сервисам PPP: [электронный ресурс]. URL: <http://www2.unb.ca/gge/Resources/PPP/OnlinePPPs.html> (дата обращения: 21.03.2019).

35. Сайт сервиса GNSS Planning Online: [электронный ресурс]. URL: www.gnssplanning.com (дата обращения: 21.03.2019).
36. Сеть референционных станций г. Санкт–Петербург: [электронный ресурс]. URL: <http://ref.kgainfo.spb.ru/about/> (дата обращения: 29.01.2019).
37. Сайт издательства Taylor & Francis – статья в журнале Survey Review Jian Chen, Dongjie Yue [и др.] Experimental research on daily deformation monitoring of bridge using BDS/GPS // Survey Review: [электронный ресурс]. URL: <https://proxy.library.spbu.ru:2131/doi/full/10.1080/00396265.2018.1481699> (дата обращения: 15.02.2019).
38. Сайт издательства Springer Link – статья в журнале GPS Solution Xu Tang, Xingxing Li [и др.] 1 Hz GPS satellites clock correction estimations to support high-rate dynamic PPP GPS applied on the Severn suspension bridge for deflection detection // GPS Solution: [электронный ресурс]. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10291-018-0813-z> (дата обращения: 15.02.2019).
39. Сайт издательства Springer Link – статья в журнале S. M. Khazraei, A., R. Amiri-Simkooei On the application of Monte Carlo singular spectrum analysis to GPS position time series GPS Solution // GPS Solution: [электронный ресурс]. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00190-019-01253-x> (дата обращения: 15.02.2019).

Приложение А. Пример отчёта Trimble Business Centre

Информация о проекте	Система координат	
Имя:	Имя:	UTM
Размер:	ИГД:	ITRF
Дата последнего изменения:	Зона:	36 North (33E)
Часовой пояс:	Геоид:	
Шифр:	ИГД по высоте:	
Описание:		

Отчет об обработке базовых линий

Заключение по обработке

Измерение	От	До	Тип решения	П. Точн. (Метр)	В. Точн. (Метр)	ΔX (Метр)	ΔY (Метр)	ΔZ (Метр)	Элл. расстояние (Метр)	ΔВысота (Метр)
GORN — ROSI (B4)	GORN	ROSI	Фиксированное	0.002	0.007	-1864.482	3281.114	-25.177	3773.912	1.090
GORN — ROSI1 (B8)	GORN	ROSI1	Фиксированное	0.002	0.008	-1864.483	3281.114	-25.181	3773.912	1.086
GORN — ROSI2 (B12)	GORN	ROSI2	Фиксированное	0.002	0.007	-1864.478	3281.111	-25.178	3773.907	1.090
GORN — ROSI3 (B16)	GORN	ROSI3	Фиксированное	0.003	0.007	-1864.484	3281.116	-25.175	3773.914	1.091
GORN — ROSI4 (B20)	GORN	ROSI4	Фиксированное	0.002	0.007	-1864.483	3281.115	-25.174	3773.913	1.092
GORN — ROSI5 (B24)	GORN	ROSI5	Фиксированное	0.003	0.008	-1864.482	3281.115	-25.178	3773.913	1.089

Сводка по допустимости

Обработано	Пройдено	Флаг	Отказ
6	6	0	0

GORN - ROSI (3:59:44-7:59:39) (S1)

Измерение базовой линии:	GORN — ROSI (B4)
Обработано:	29.04.2019 12:03:21
Тип решения:	Фиксированное
Используемая частота:	Двойная частота (L1, L2)
Точность в плане:	0.002 м
Точность по высоте:	0.007 м
СКО:	0.001 м
Максимальный PDOP:	1.699
Используемые эфемериды:	Смешан.
Модель антенны:	NGS Absolute
Время начала обработки:	01.01.2014 3:59:44 (На реф-злл: UTC+4ч)
Время конца обработки:	01.01.2014 7:59:39 (На реф-злл: UTC+4ч)
Продолжительность обработки:	03:59:55
Интервал обработки:	5 секунды

Компоненты вектора (метка - метка)

От: GORN					
На плоскости		На реф-злл		Глобальные	
Восток Y	347256.457 м	Широта	X59°55'50.45949"	Широта	X59°55'50.45948"
Север X	6646845.405 м	Долгота	Y30°16'00.34975"	Долгота	Y30°16'00.34975"
Отметка	50.295 м	Высота	50.295 м	Высота	50.295 м

До: ROSI					
На плоскости		На реф-злл		Глобальные	
Восток Y	351024.289 м	Широта	X59°55'48.77503"	Широта	X59°55'48.77503"
Север X	6646639.494 м	Долгота	Y30°20'03.29494"	Долгота	Y30°20'03.29494"
Отметка	51.385 м	Высота	51.385 м	Высота	51.385 м

Вектор					
ΔВосток Y	3767.832 м	Передний азимут север-юг	90°45'44"	ΔX	-1864.482 м
ΔСевер X	-205.911 м	Элл. расстояние	3773.912 м	ΔY	3281.114 м
Превышение	1.090 м	ΔВысота	1.090 м	ΔZ	-25.177 м

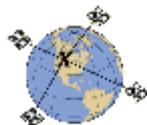
Стандартная ошибка

Ошибки вектора:					
σ ΔВосток Y	0.001 м	σ Передний азимут север-юг	0°00'00"	σ ΔX	0.002 м
σ ΔСевер X	0.001 м	σ Элл. расстояние.	0.001 м	σ ΔY	0.001 м
σ Превышение	0.003 м	σ ΔВысота	0.003 м	σ ΔZ	0.003 м

Апостериорная ковариационная матрица (Метр²)

	X	Y	Z
X	0.0000029266		
Y	0.0000015058	0.0000015839	
Z	0.0000042408	0.0000026042	0.0000091055

**Приложение В. Пример отчёта онлайн-сервиса CSRS-PPP
(Министерство природных ресурсов Канады)**



CSRS-PPP 2.26.0 (2019-02-25)



**ROSI001a.140
ROSI**

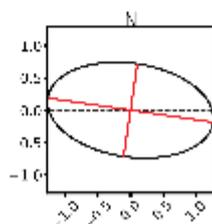
Data Start	Data End	Duration of Observations
2014-01-01 00:00:00.00	2014-01-01 03:59:55.00	3:59:55
Processing Time		Product Type
20:29:58 UTC 2019/02/27		IGS Final
Observations	Frequency	Mode
Phase and Code	Double	Static
Elevation Cut-Off	Rejected Epochs	Estimation Steps
7.5 degrees	0.00 %	5.00 sec
Antenna Model	APC to ARP	ARP to Marker
LEIAR25.R4 LEIT	L1 = 0.158 m L2 = 0.154 m	H:0.000m / E:0.000m / N:0.000m

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

Estimated Position for ROSI001a.140

	Latitude (+n)	Longitude (+e)	Ell. Height
ITRF08 (2014)	59° 55' 48.77522"	30° 20' 3.29577"	51.389 m
Sigmas(95%)	0.006 m	0.010 m	0.018 m
A priori*	59° 55' 48.77507"	30° 20' 3.29496"	51.391 m
Estimated – A priori	0.005 m	0.013 m	-0.002 m

95% Error Ellipse (cm)
 semi-major: 1.283 cm
 semi-minor: 0.724 cm
 semi-major azimuth: 98° 24' 8.99"

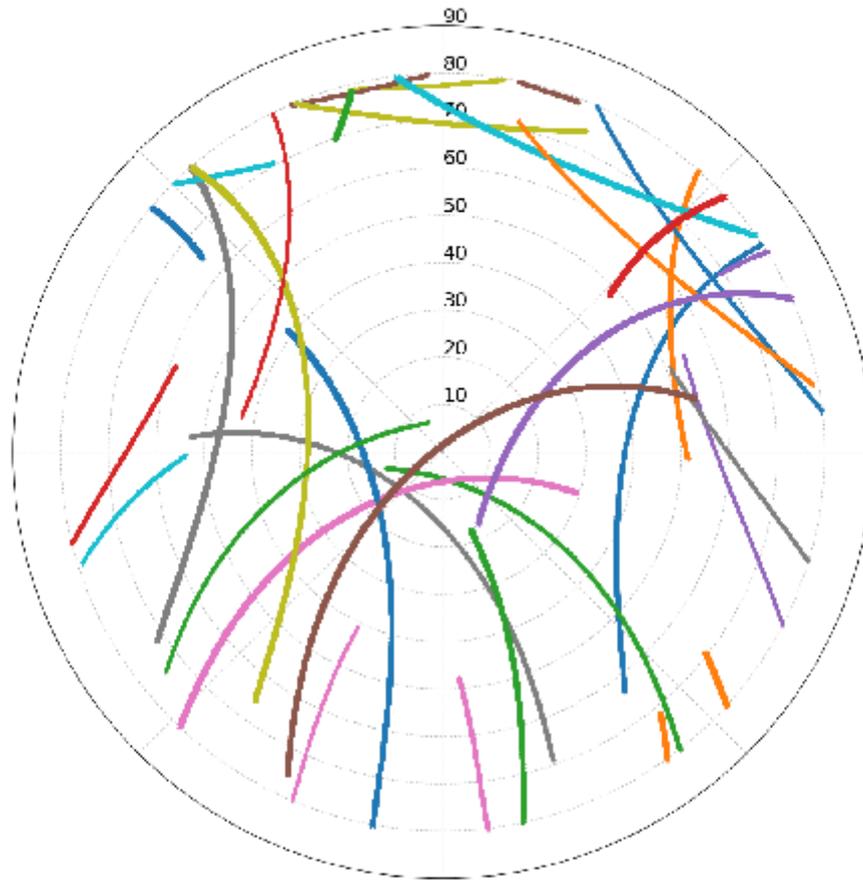


UTM (North) Zone 36

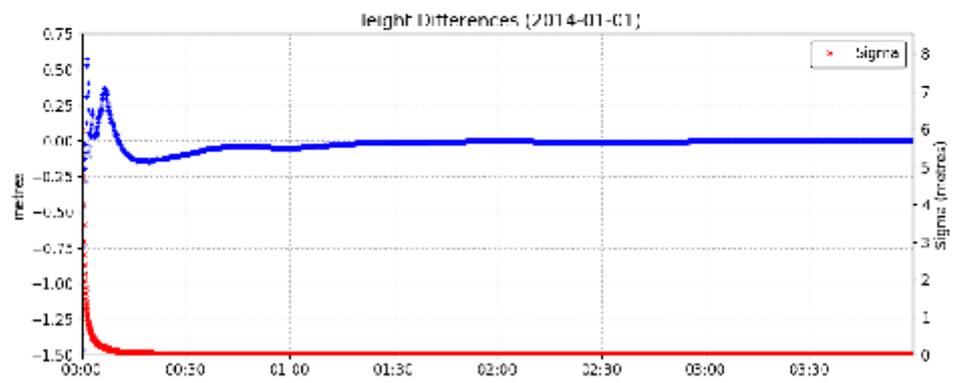
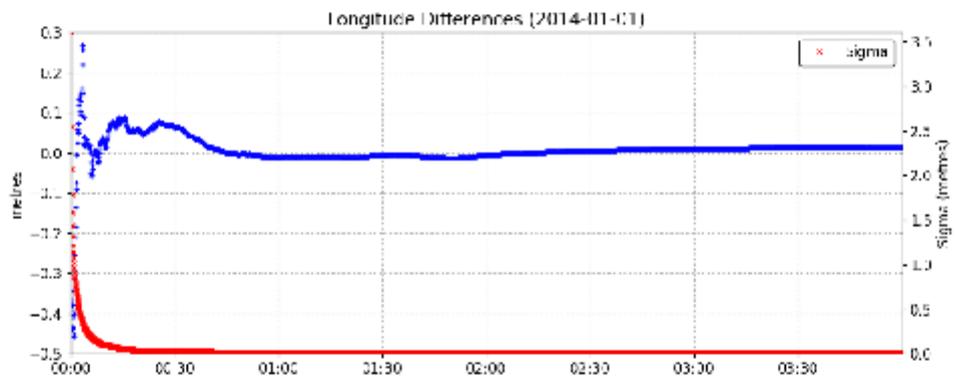
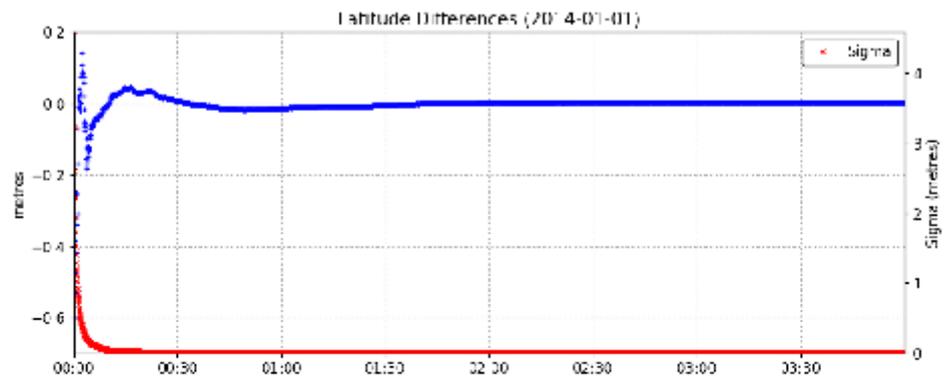
6646639.500 m (N)
 351024.303 m (E)
 Scale Factors
 0.999872 (point)
 0.999864 (combined)

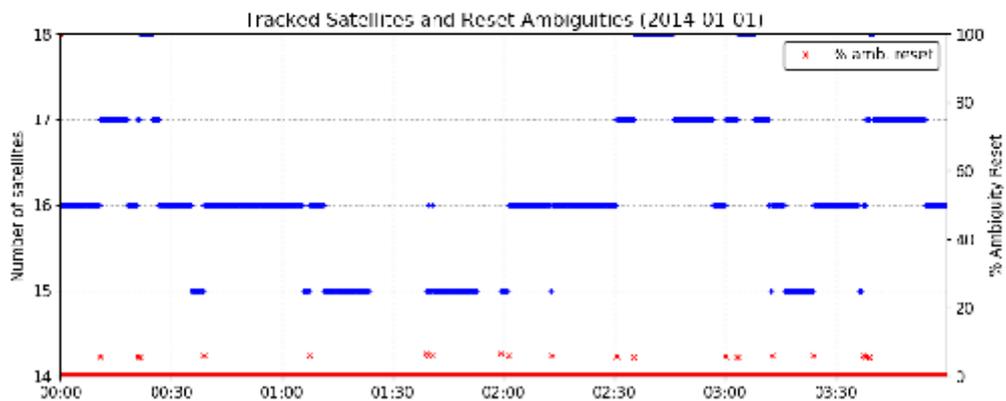
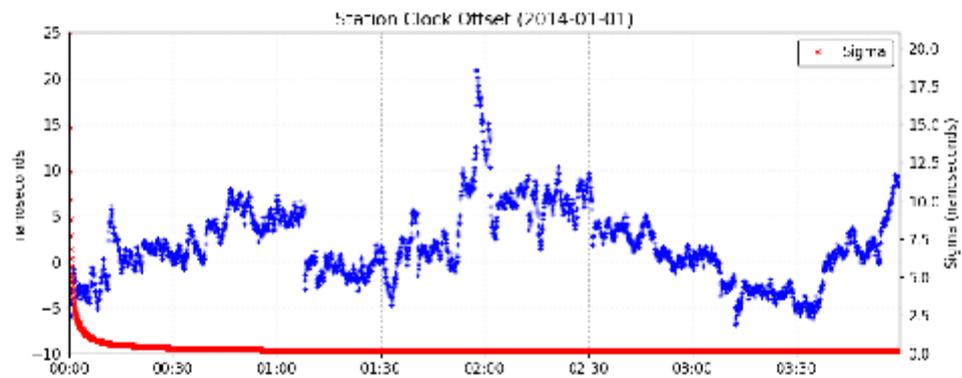
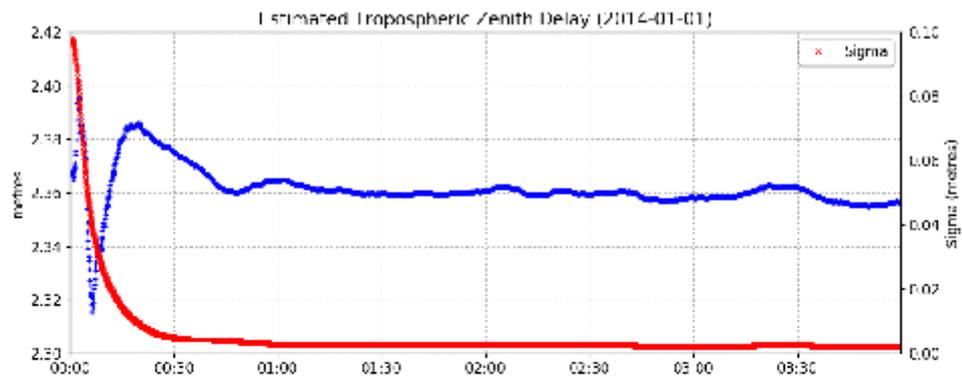
*(Coordinates from RINEX header used as a priori position)

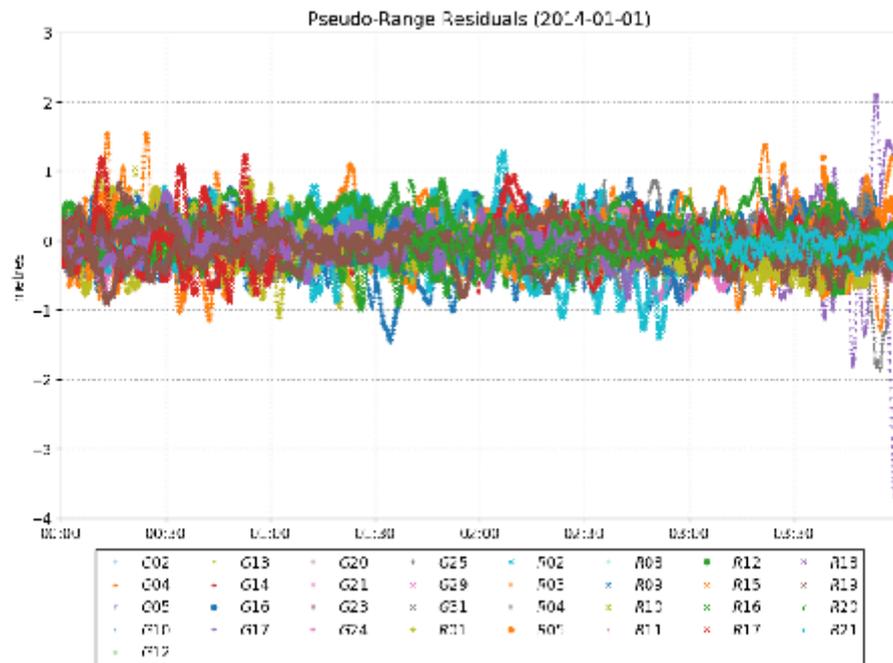
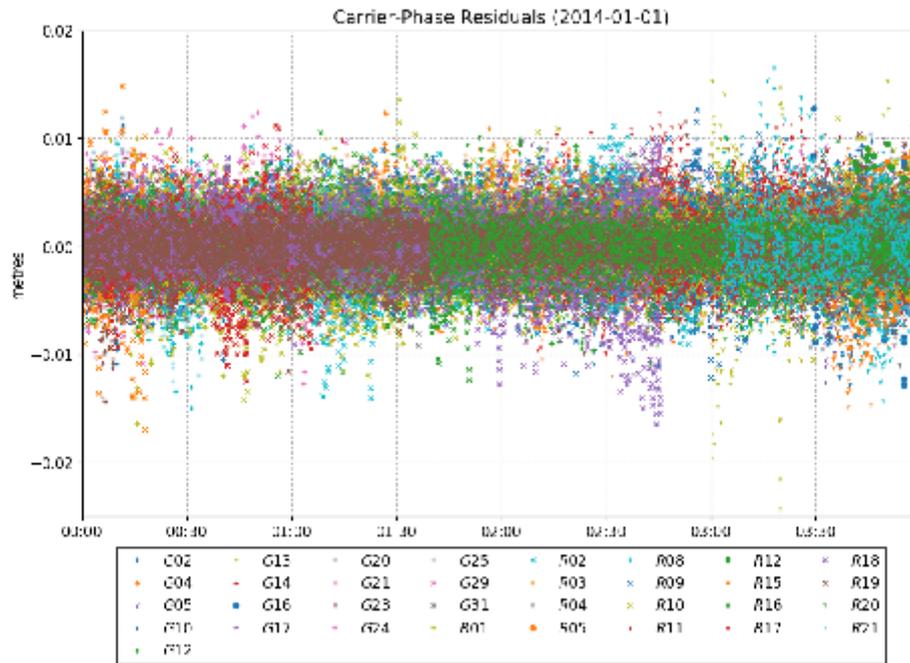
Satellite Sky Distribution



• G02	• G14	• G24	• R03	• R10	• R17
• G04	• G16	• G25	• R04	• R11	• R18
• G05	• G17	• G29	• R05	• R12	• R19
• G10	• G20	• G31	• R08	• R15	• R20
• G12	• G21	• R01	• R09	• R16	• R21
• G13	• G23	• R02			







~~~~ 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.geodeticinformationservices.nrcan@canada.ca](mailto:nrcan.geodeticinformationservices.nrcan@canada.ca)

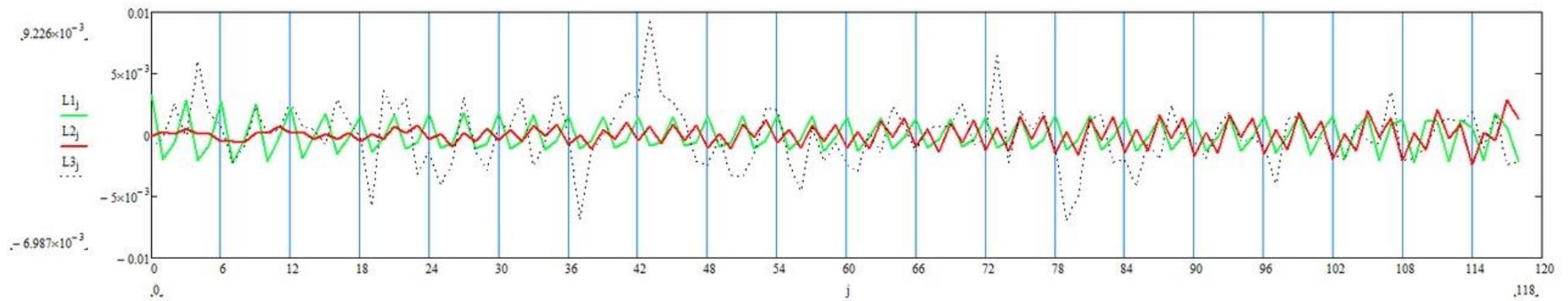
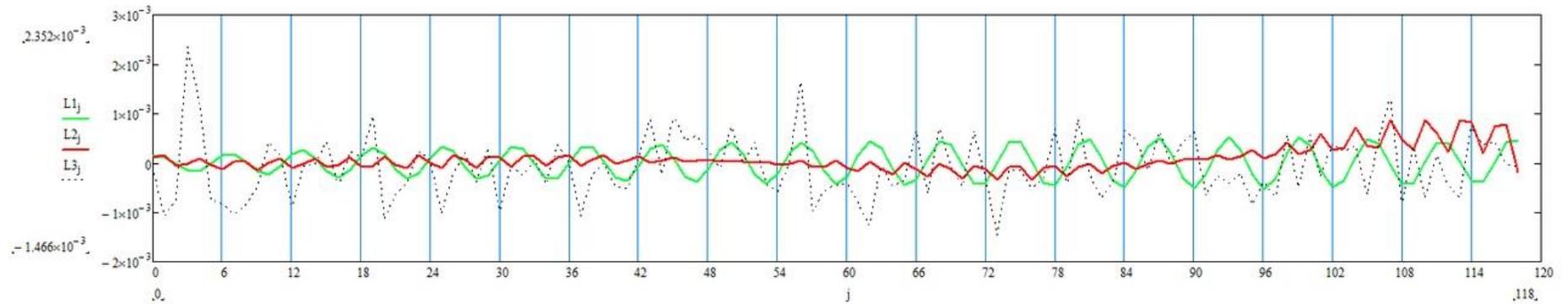
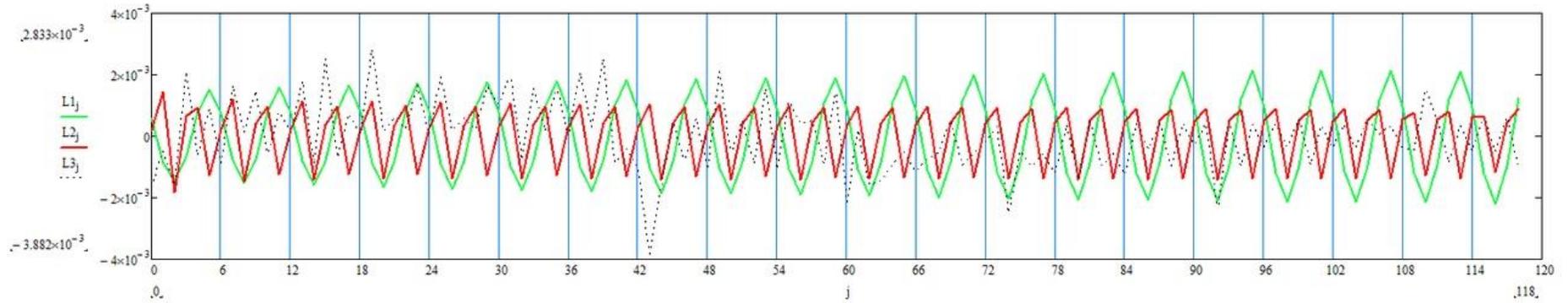


Natural Resources Canada  
Ressources naturelles Canada

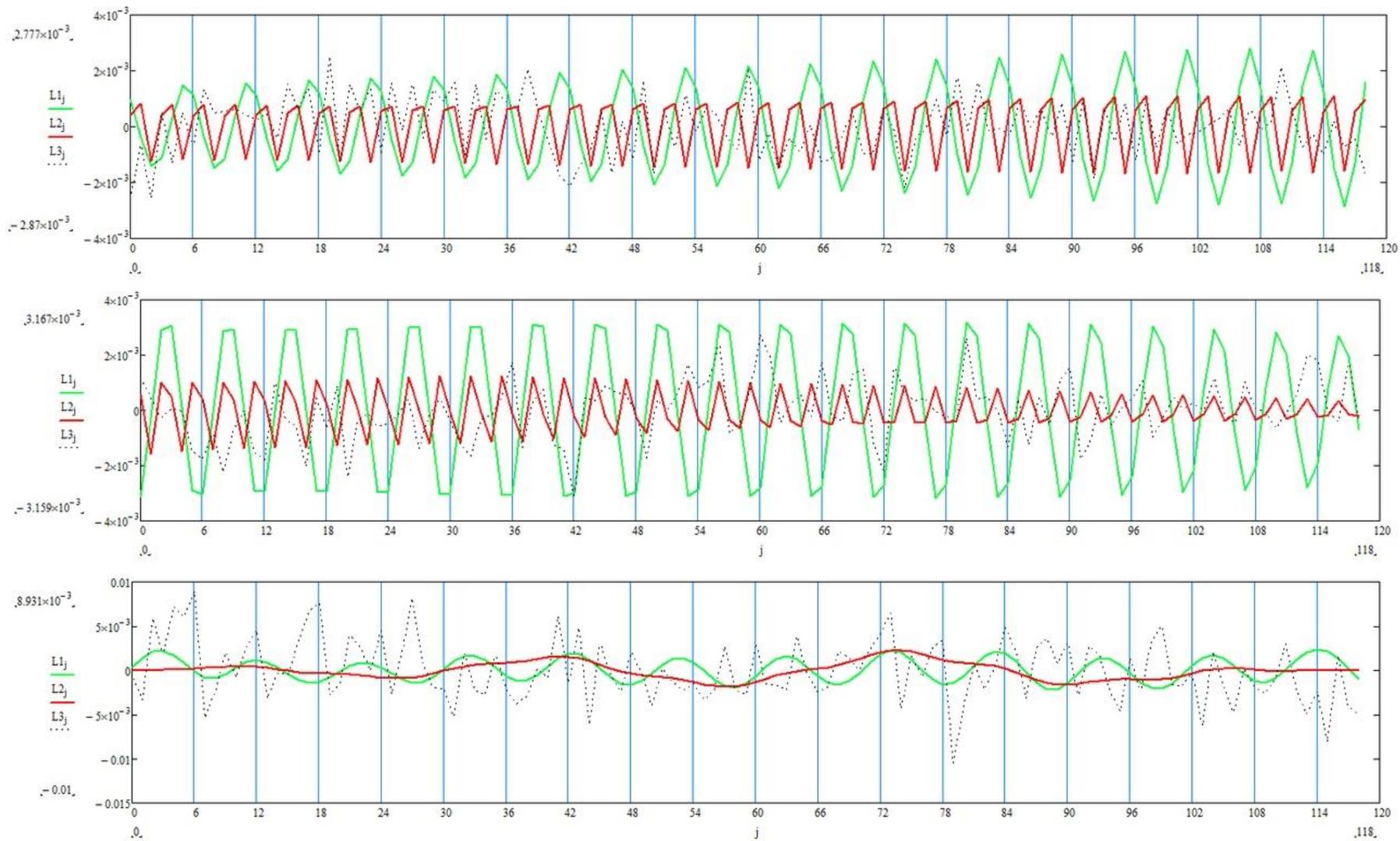
Canada

### Приложение С. Графики временных рядов.

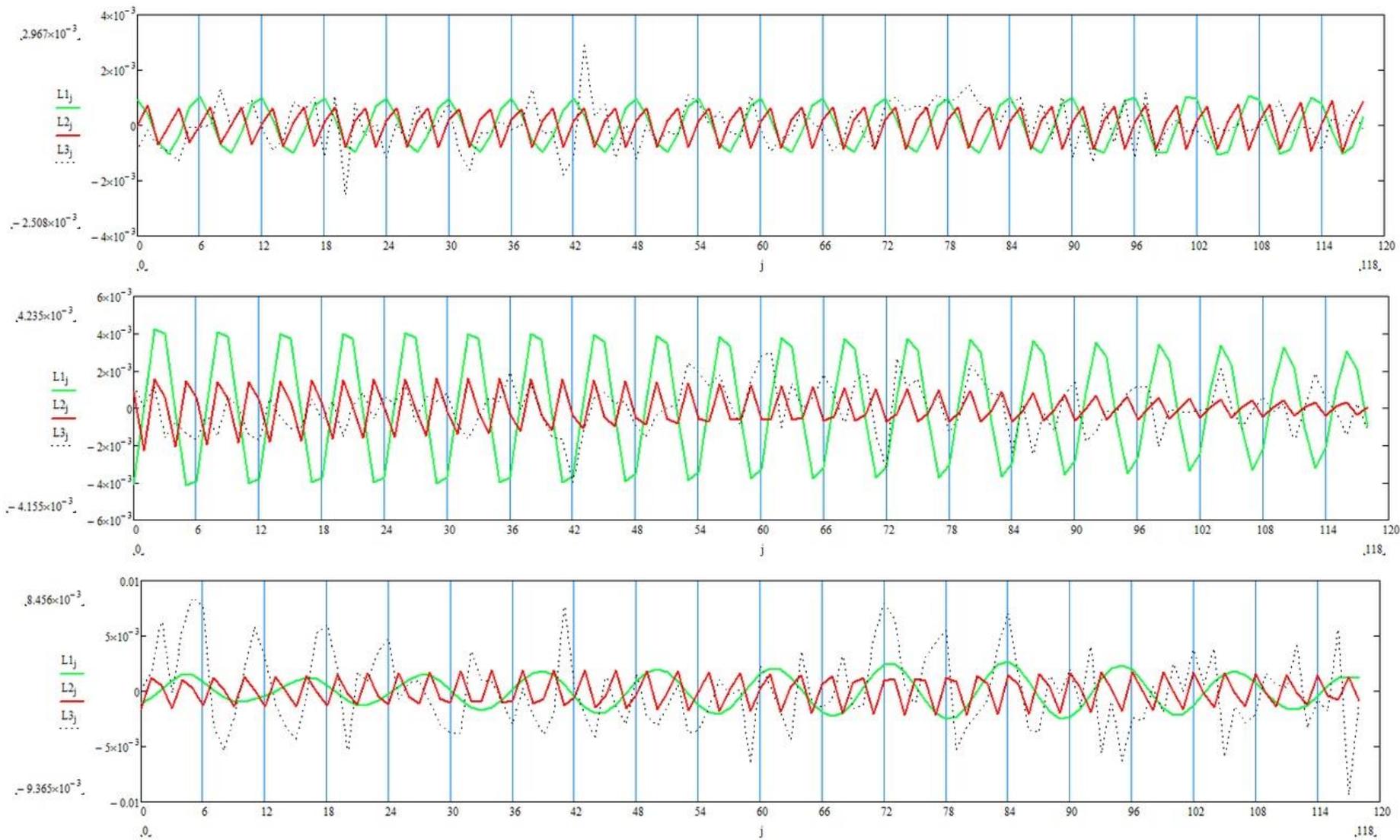
GORN – ROSI обработано относительным методом период 01.01.14 – 20.01.14 (сверху вниз: направление З-В, направление Ю-С, высота)



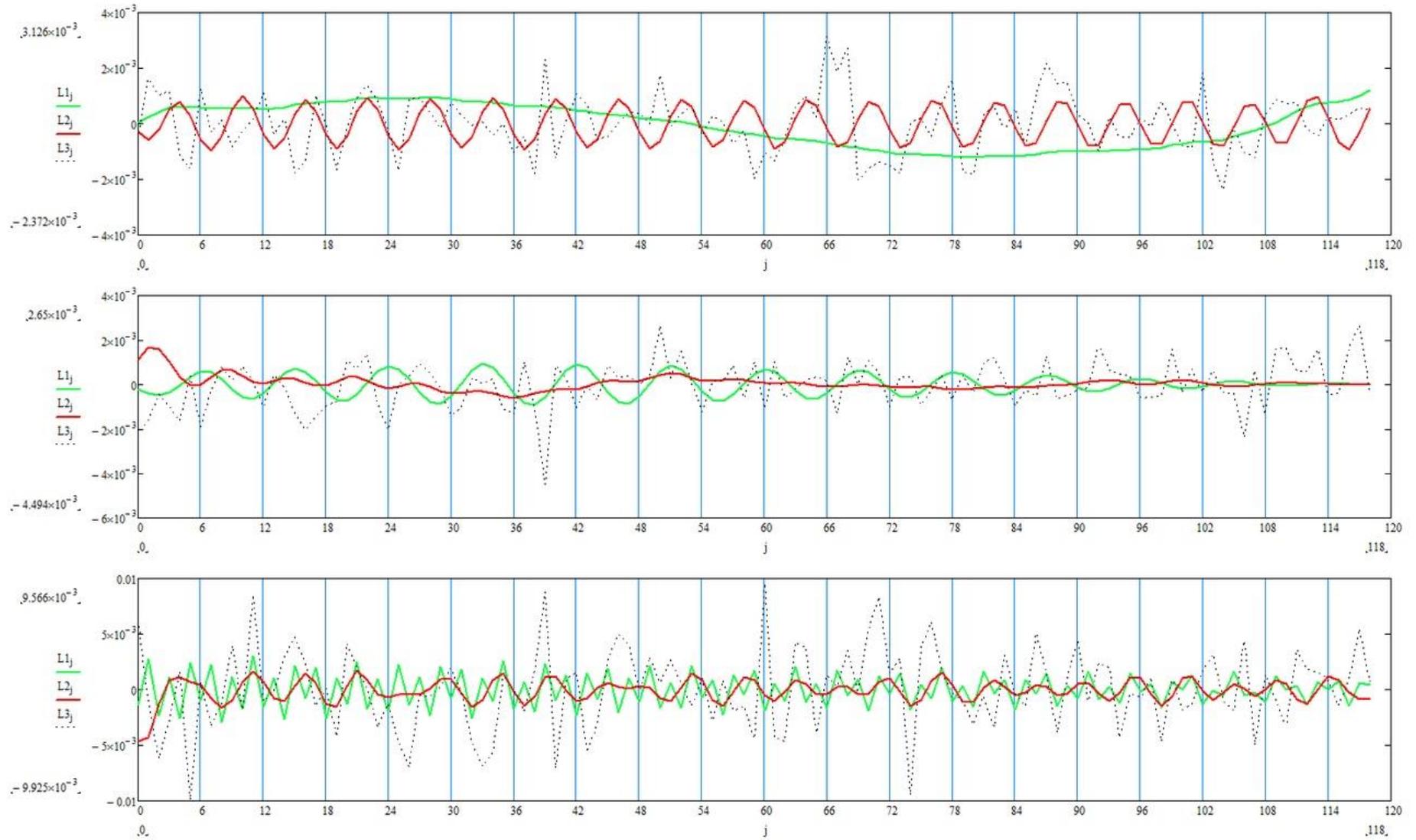
GORN – KUP2 обработано относительным методом период 01.01.14 – 20.01.14 (сверху вниз: направление З-В, направление Ю-С, высота)



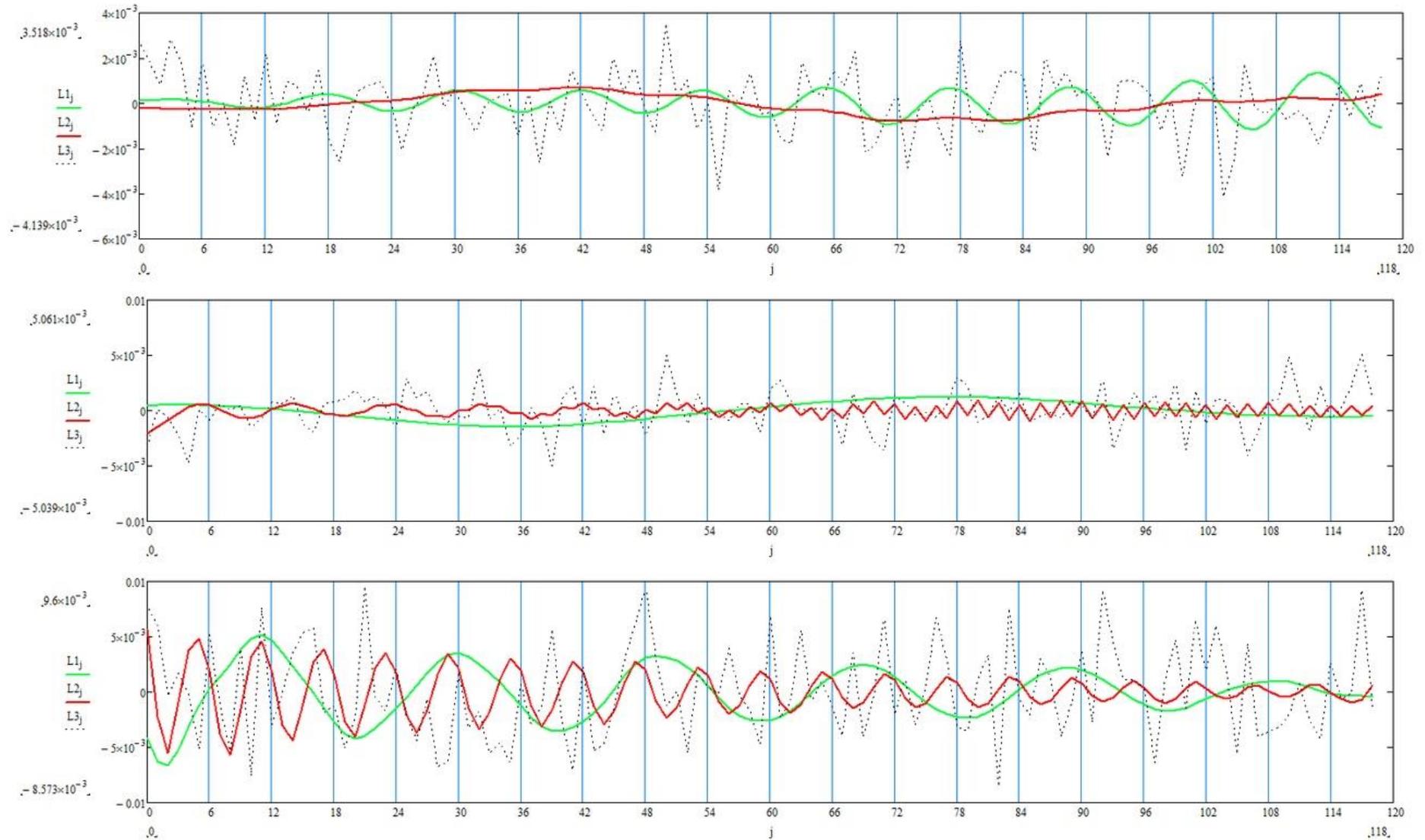
ROSI – KUP2 обработано относительным методом период 01.01.14 – 20.01.14 (сверху вниз: направление З-В, направление Ю-С, высота)



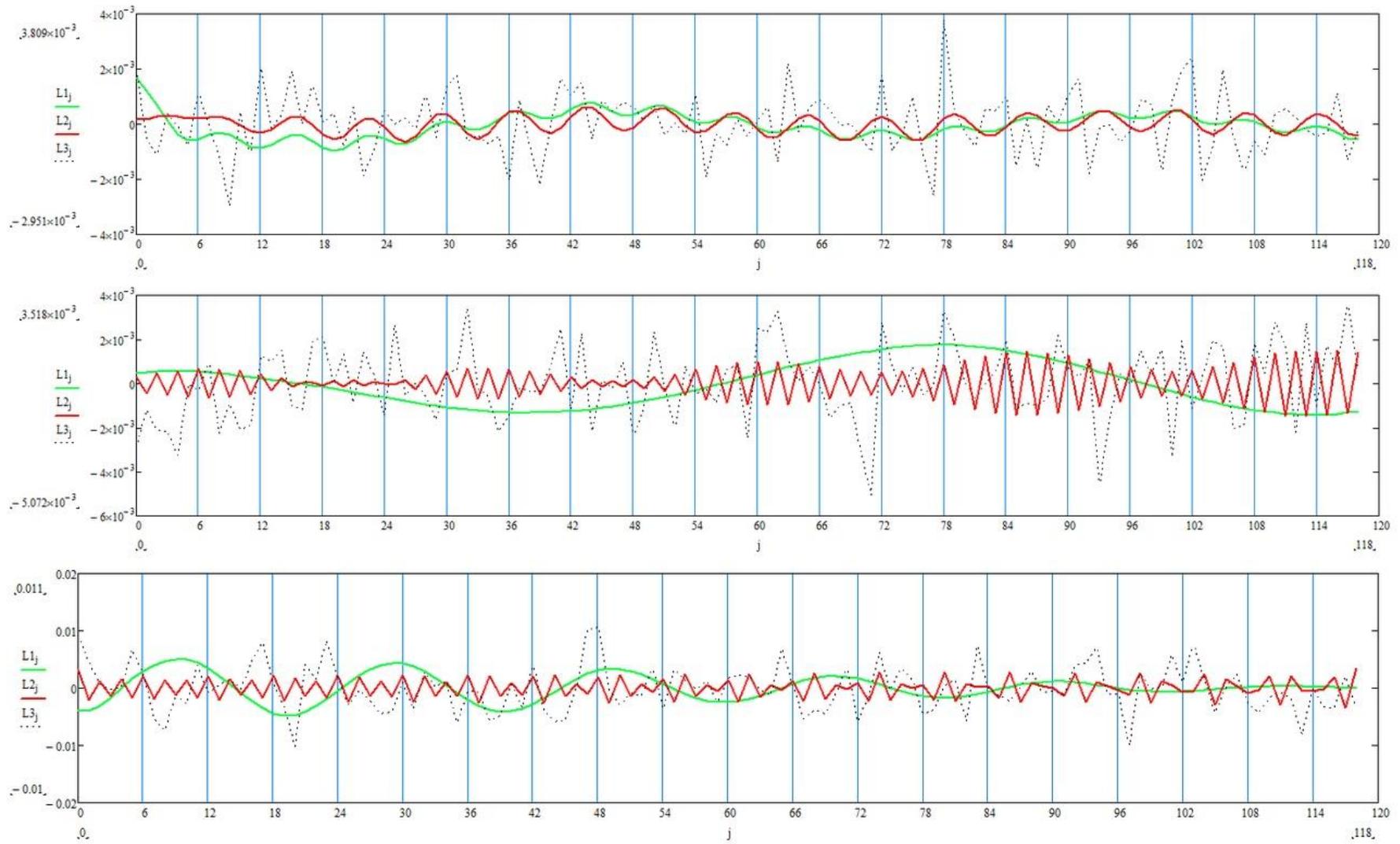
GORN – ROSI обработано относительным методом период 01.06.14 – 20.06.14 (сверху вниз: направление З-В, направление Ю-С, высота)



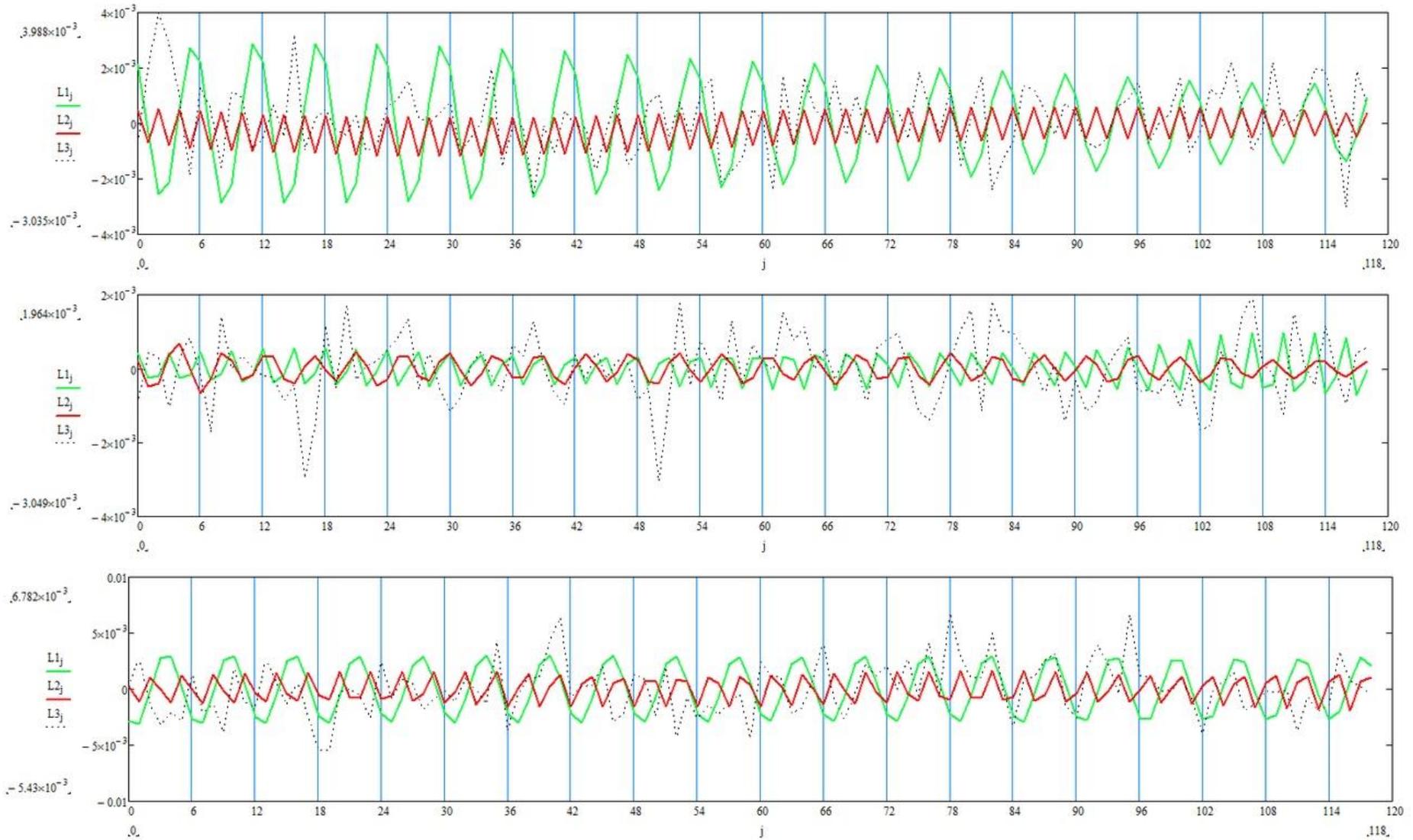
GORN – KUP2 обработано относительным методом период 01.06.14 – 20.06.14 (сверху вниз: направление З-В, направление Ю-С, высота)



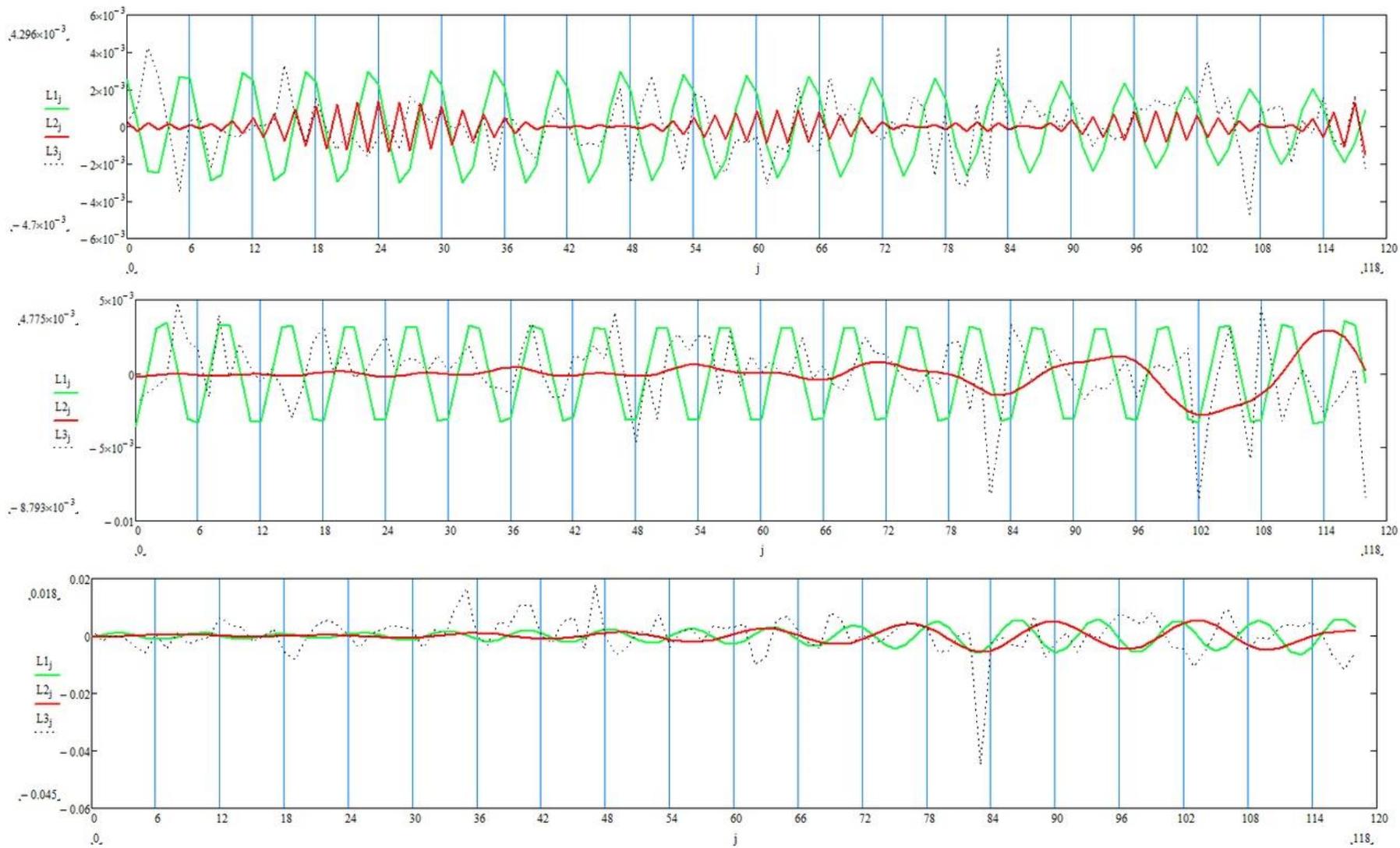
ROSI – KUP2 обработано относительным методом период 01.06.14 – 20.06.14 (сверху вниз: направление З-В, направление Ю-С, высота)



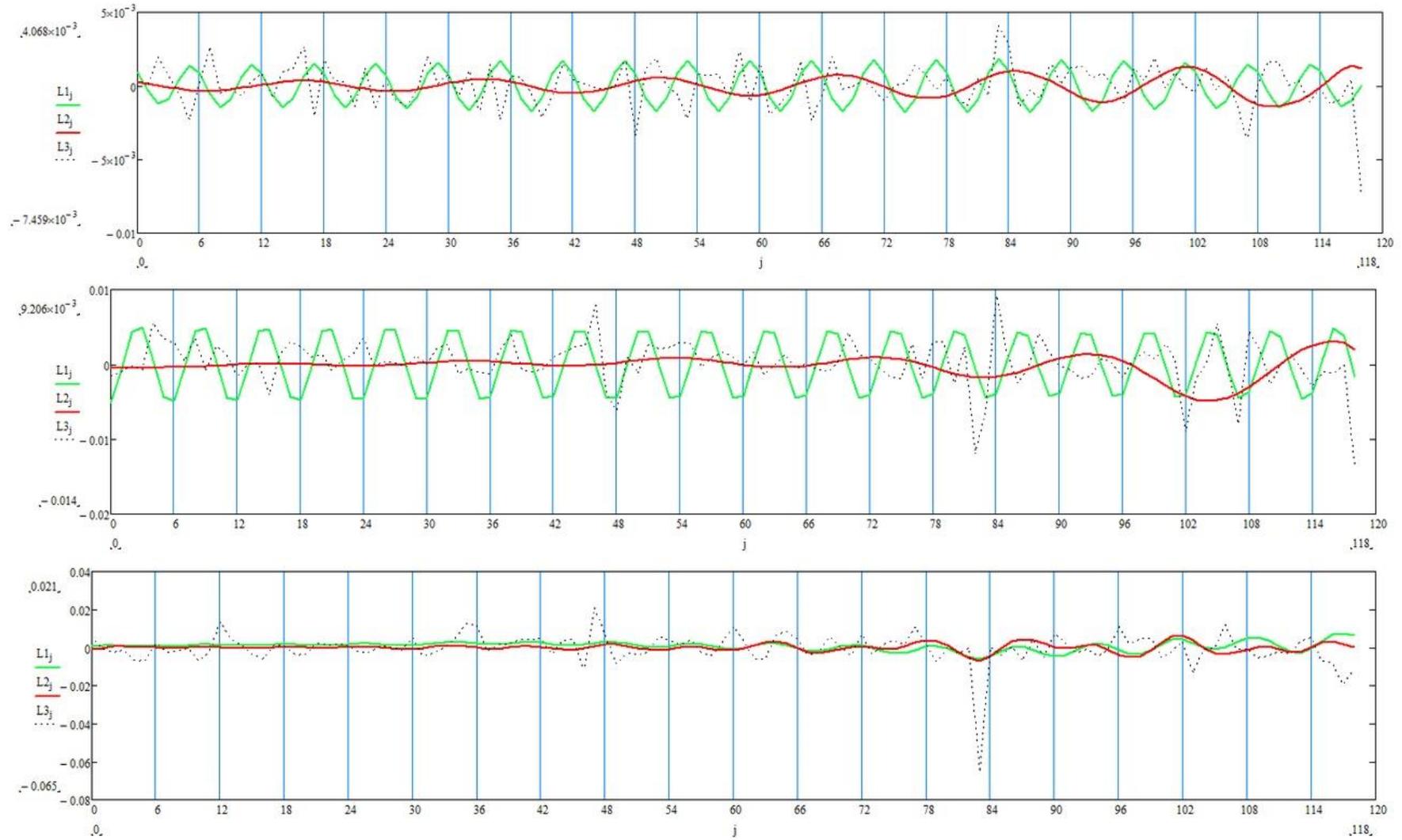
GORN – ROSI обработано относительным методом период 01.10.14 – 20.10.14 (сверху вниз: направление З-В, направление Ю-С, высота)



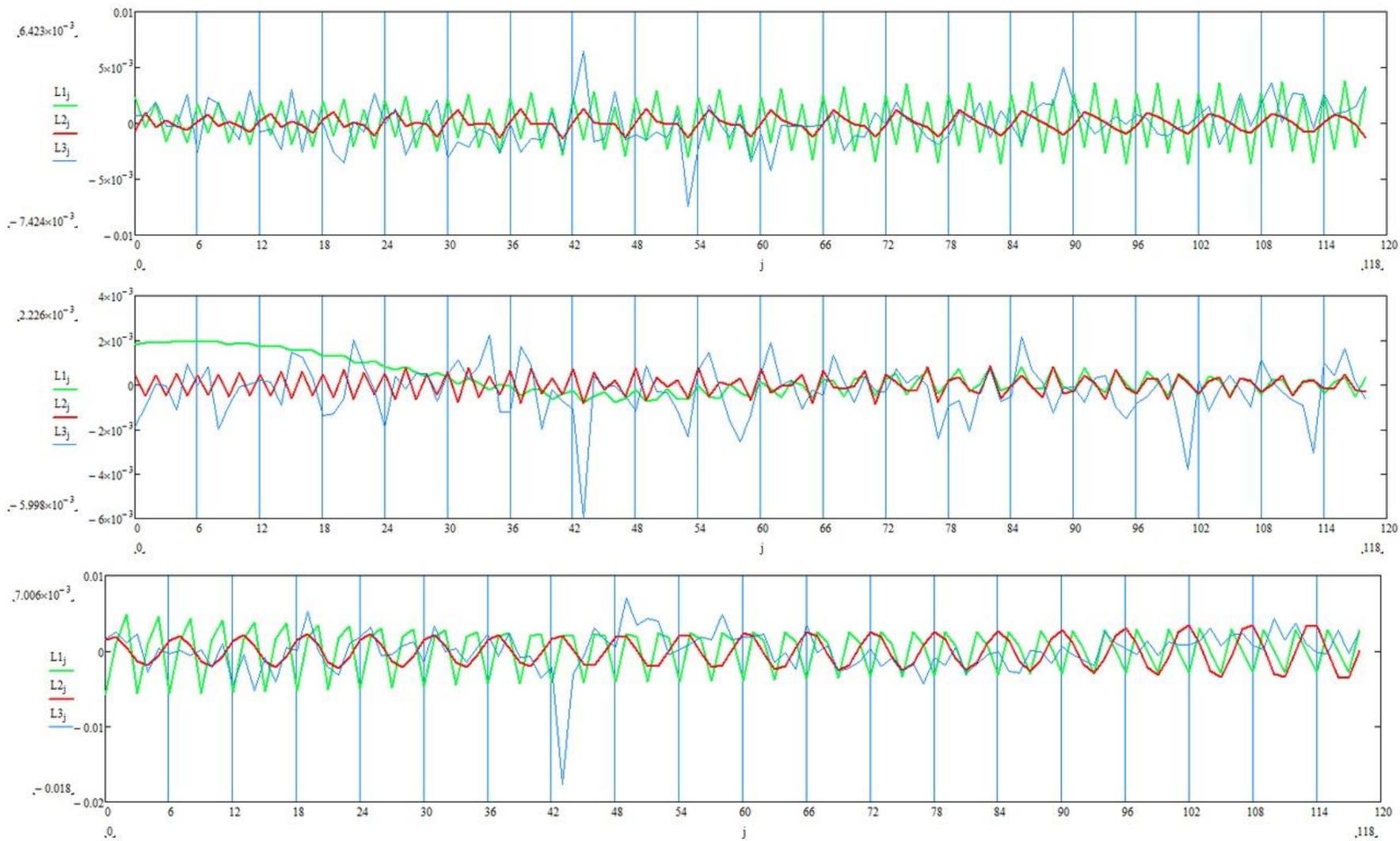
GORN – KUP2 обработано относительным методом период 01.10.14 – 20.10.14 (сверху вниз: направление З-В, направление Ю-С, высота)



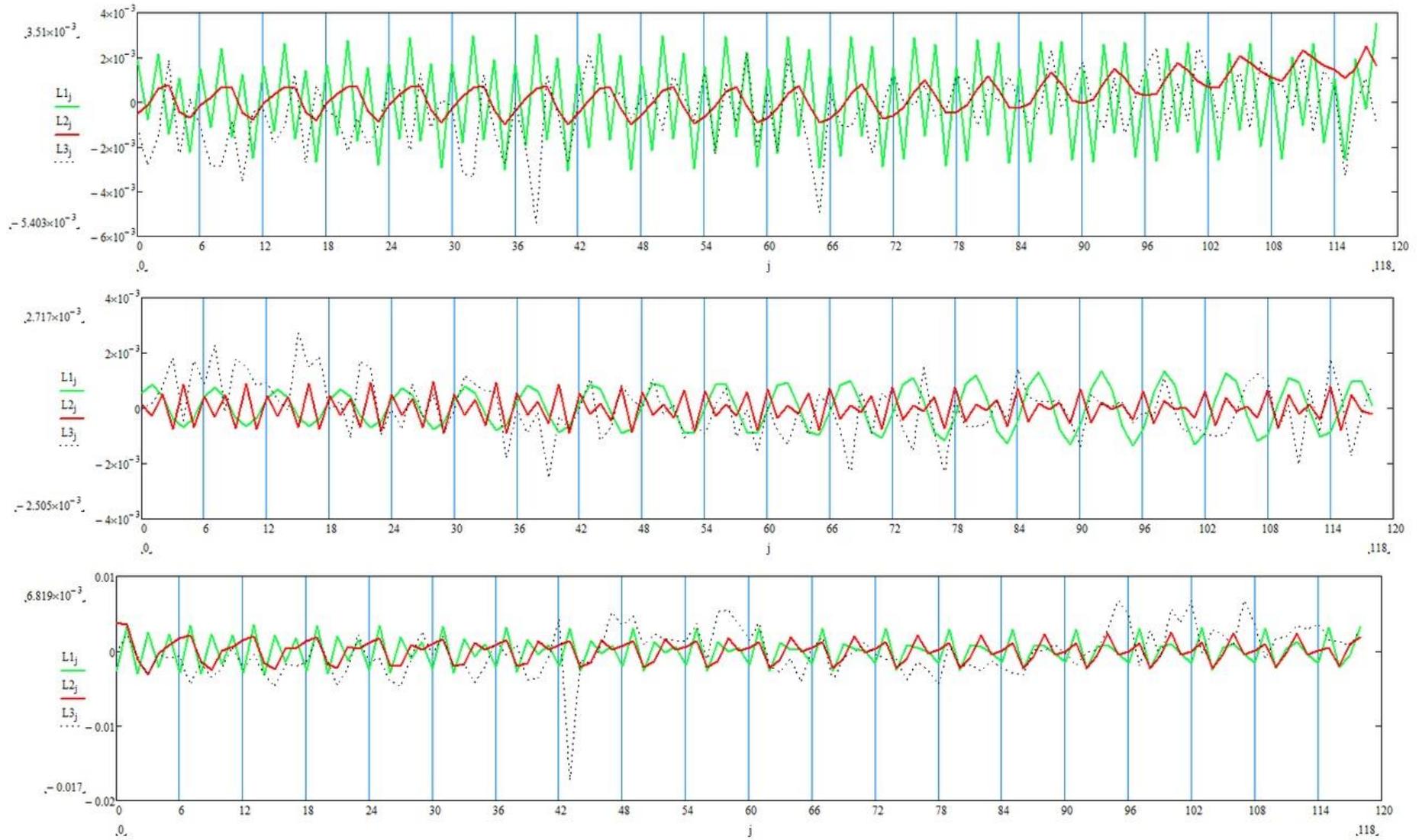
ROSI-KUP2 обработано относительным методом период 01.10.14 – 20.10.14 (сверху вниз: направление З-В, направление Ю-С, высота)



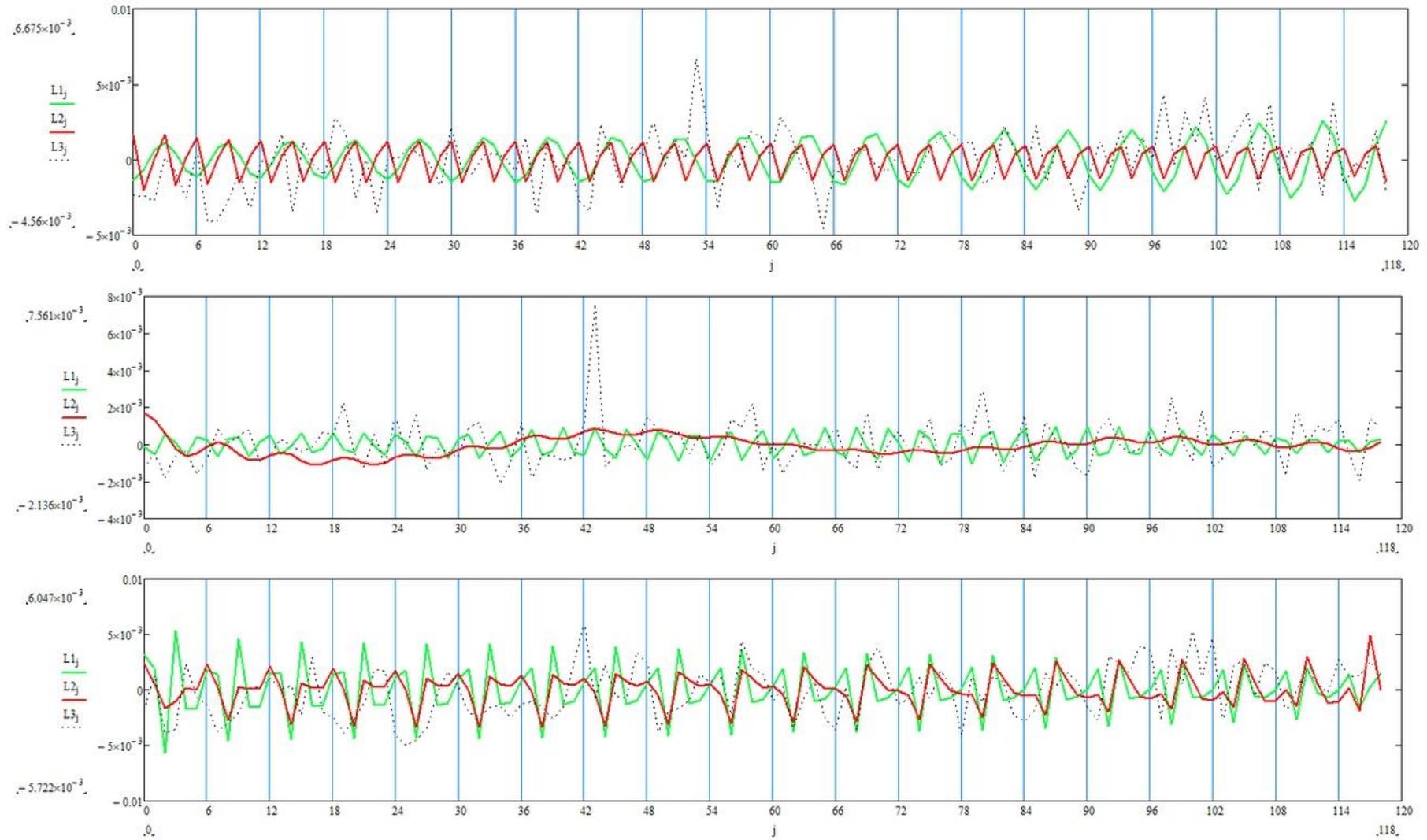
GORN – ROSI обработано абсолютным методом период 01.01.14 – 20.01.14 (сверху вниз: направление З-В, направление Ю-С, высота)



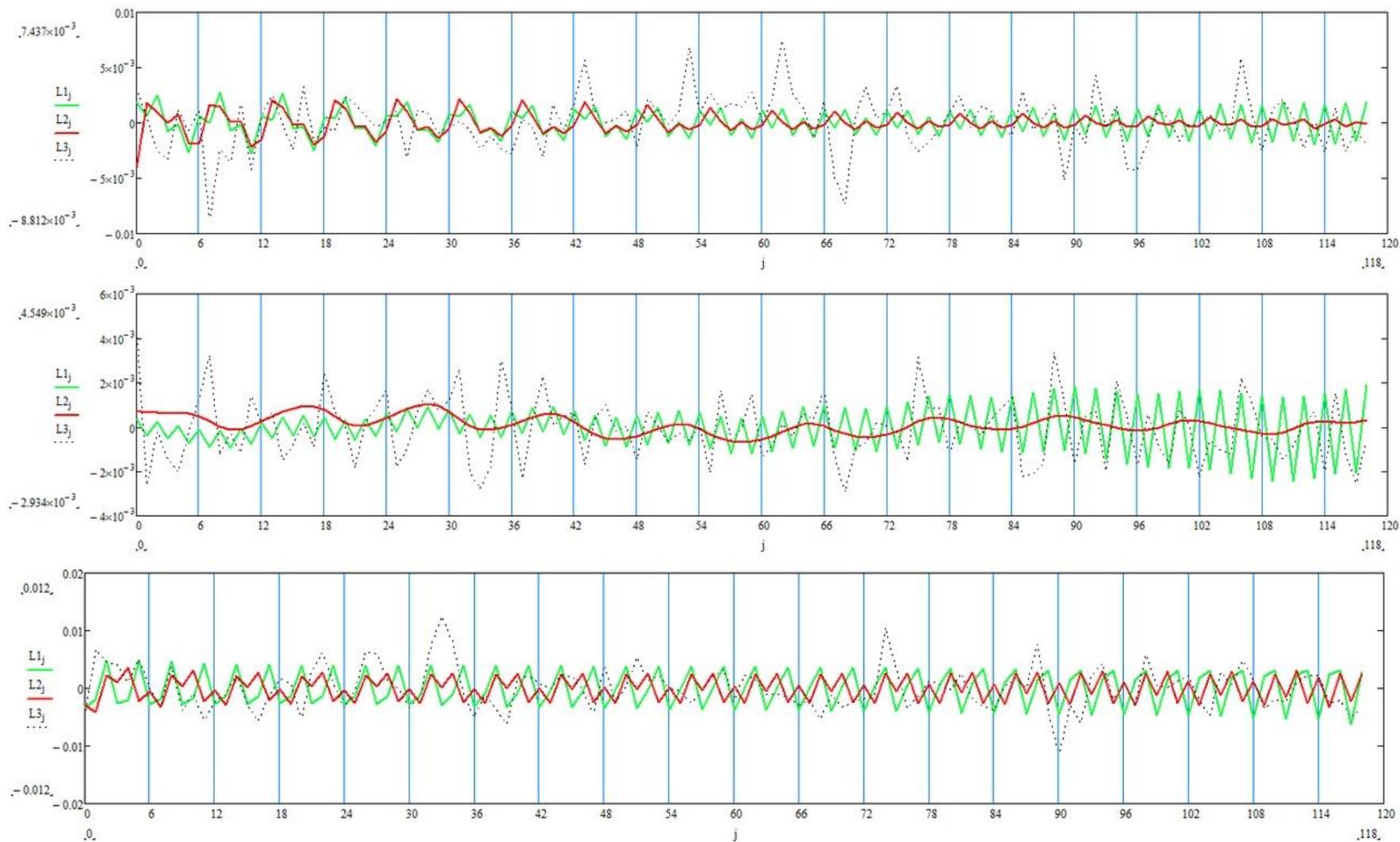
GORN – KUP2 обработано абсолютным методом период 01.01.14 – 20.01.14 (сверху вниз: направление З-В, направление Ю-С, высота)



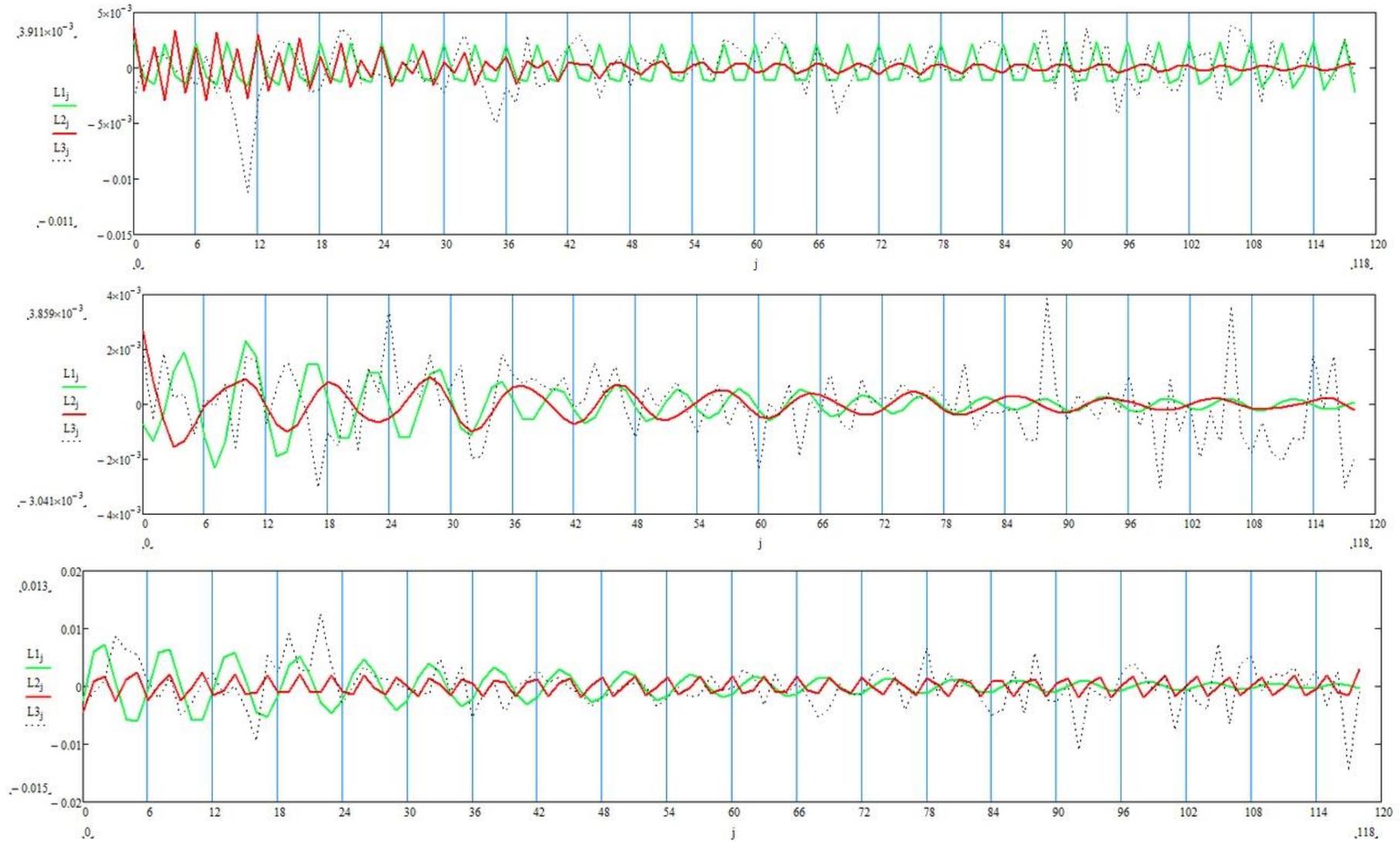
ROSI-KUP2 обработано абсолютным методом период 01.01.14 – 20.01.14 (сверху вниз: направление З-В, направление Ю-С, высота)



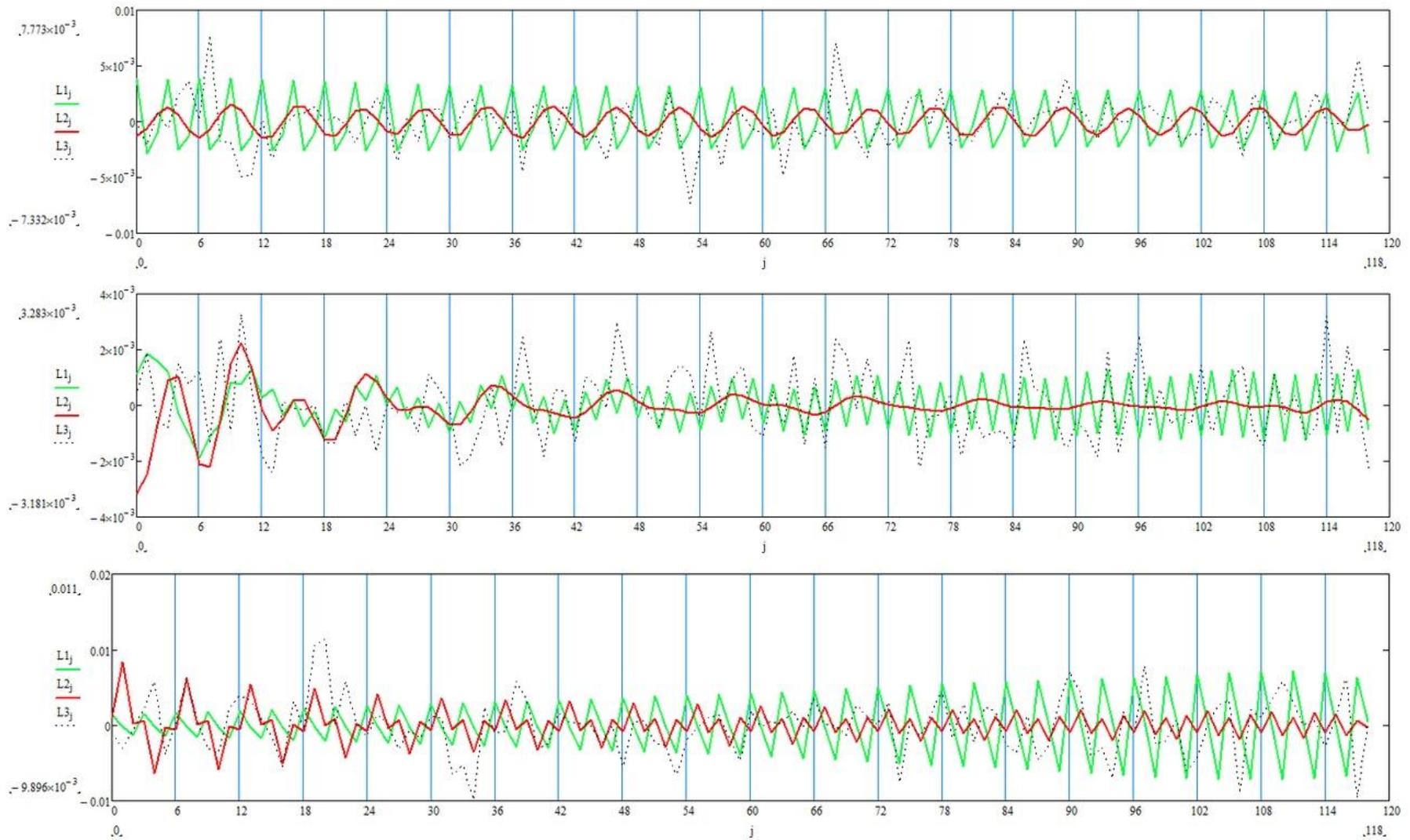
GORN – ROSI обработано абсолютным методом период 01.06.14 – 20.06.14 (сверху вниз: направление З-В, направление Ю-С, высота)



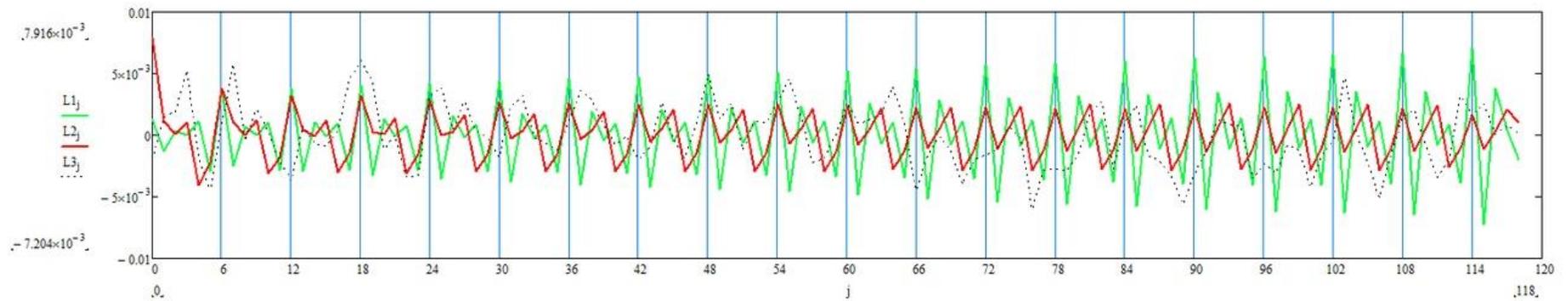
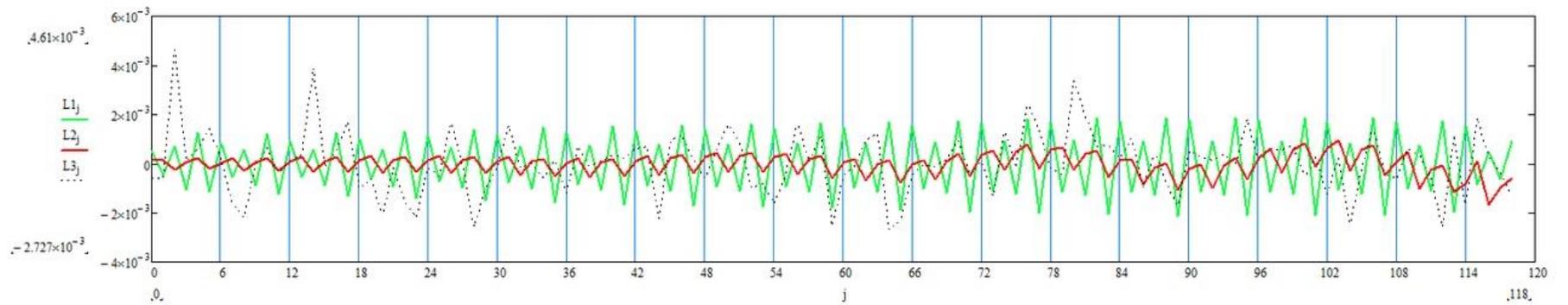
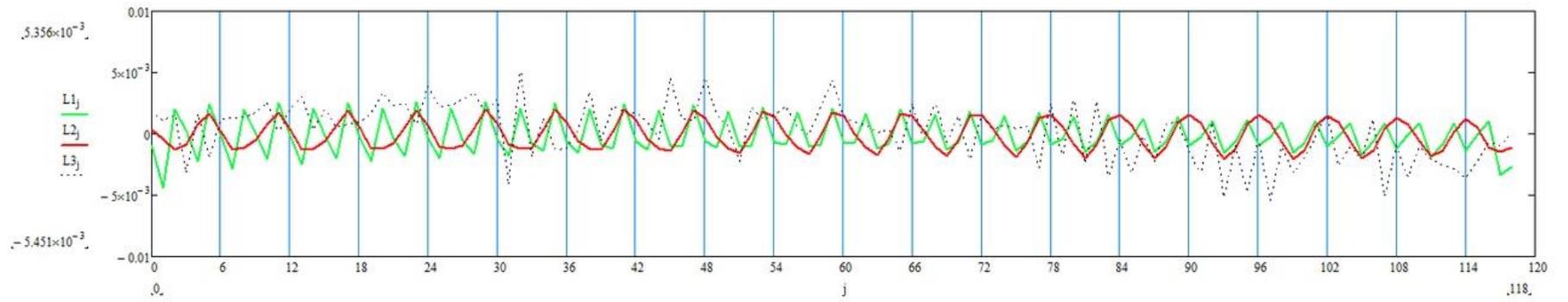
GORN – KUP2 обработано абсолютным методом период 01.06.14 – 20.06.14 (сверху вниз: направление З-В, направление Ю-С, высота)



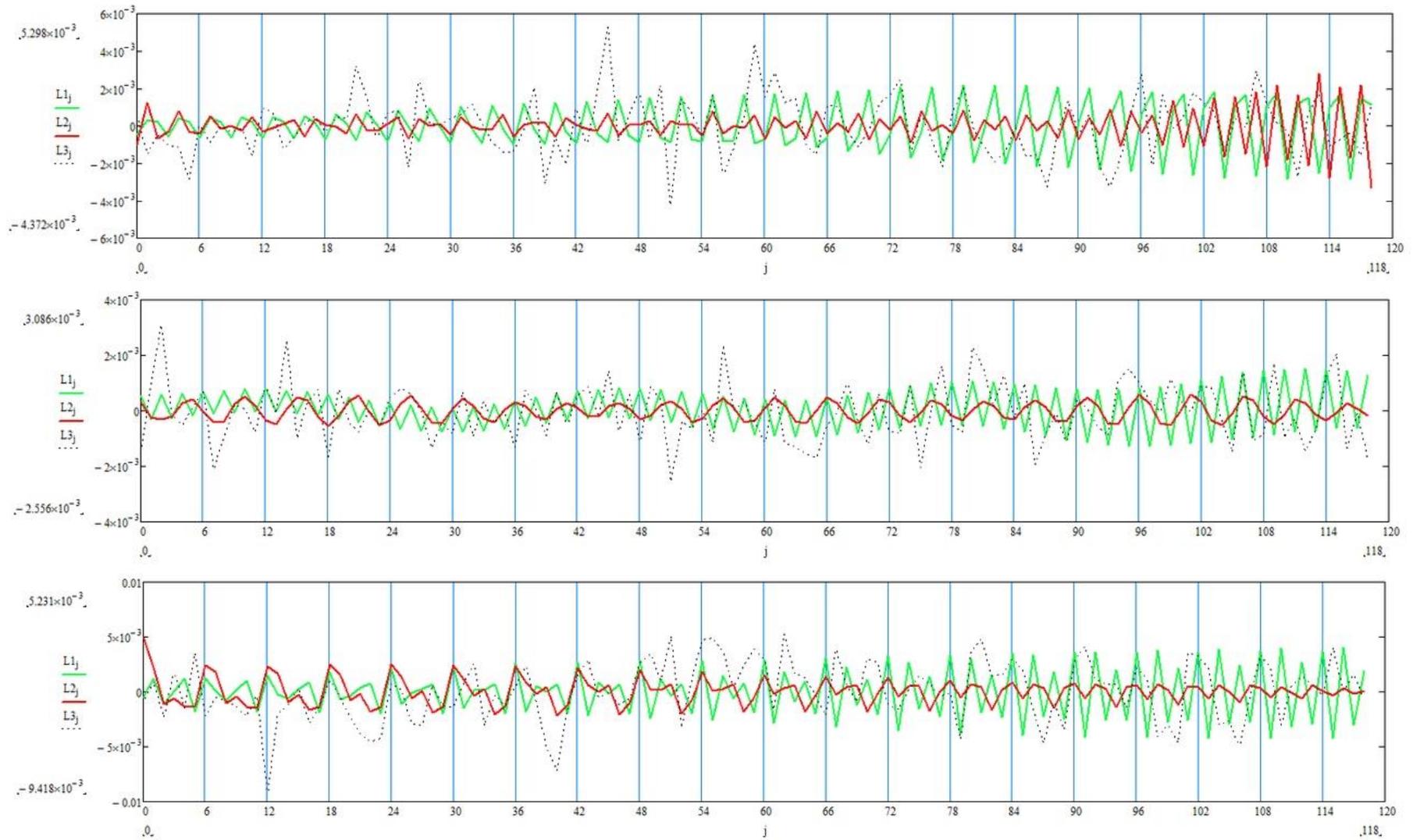
ROSI-KUP2 обработано абсолютным методом период 01.06.14 – 20.06.14 (сверху вниз: направление З-В, направление Ю-С, высота)



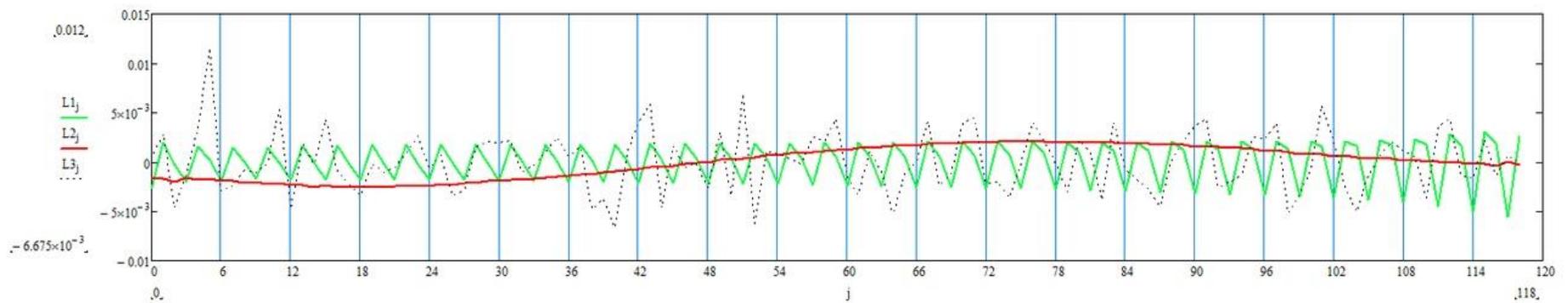
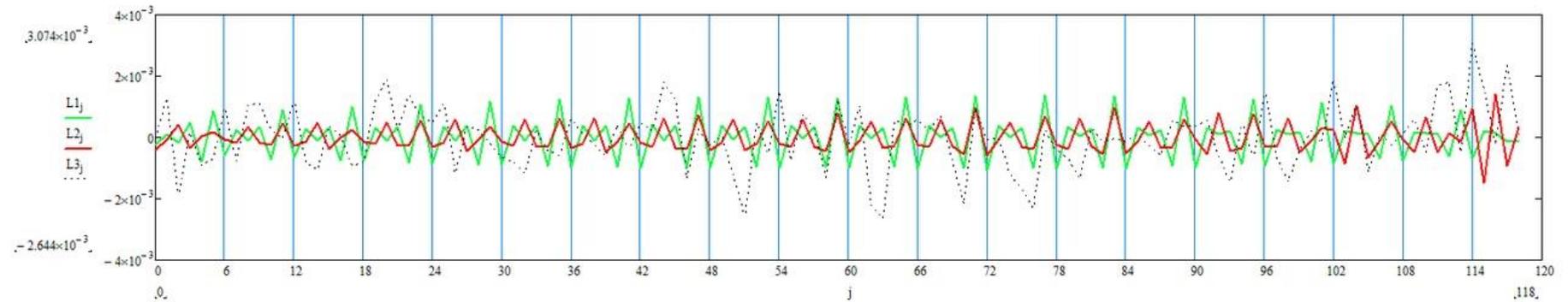
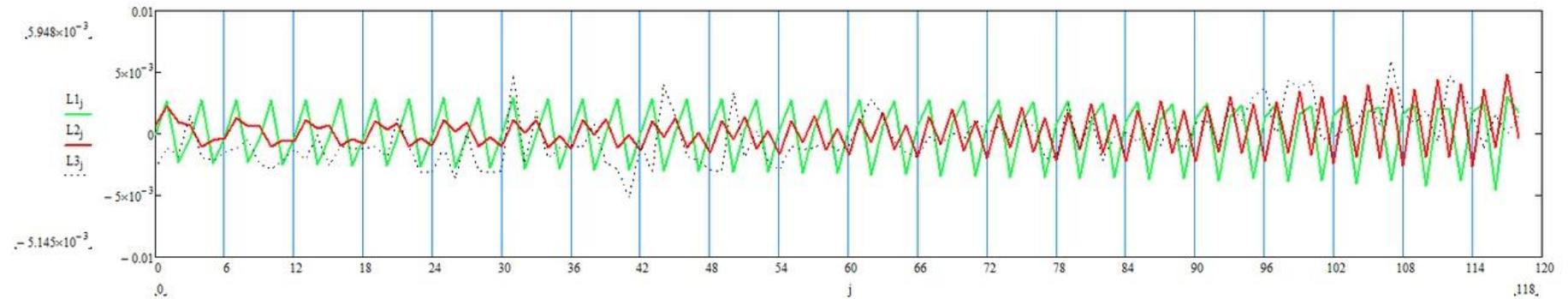
GORN – ROSI обработано абсолютным методом период 01.10.14 – 20.10.14 (сверху вниз: направление З-В, направление Ю-С, высота)



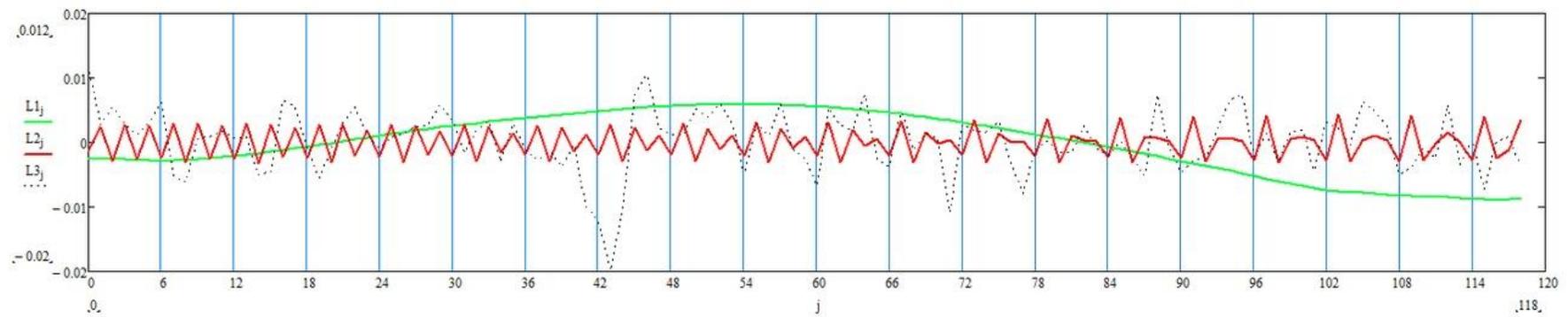
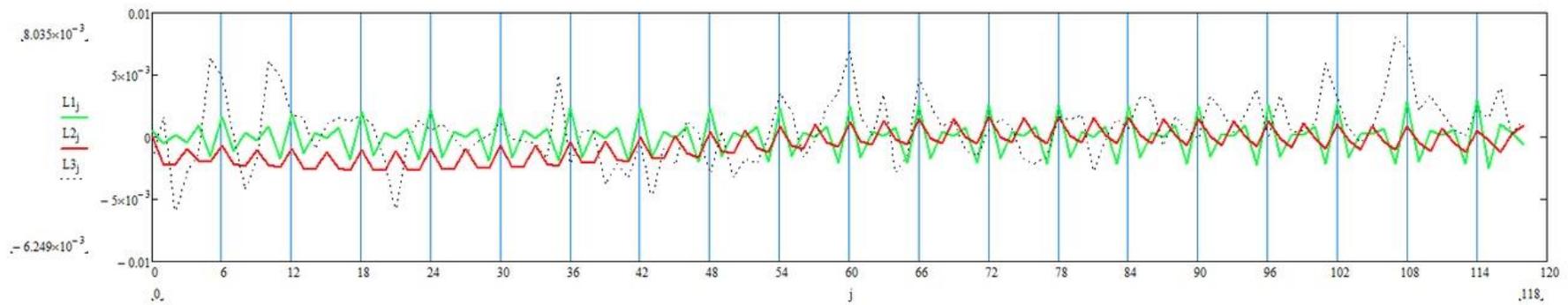
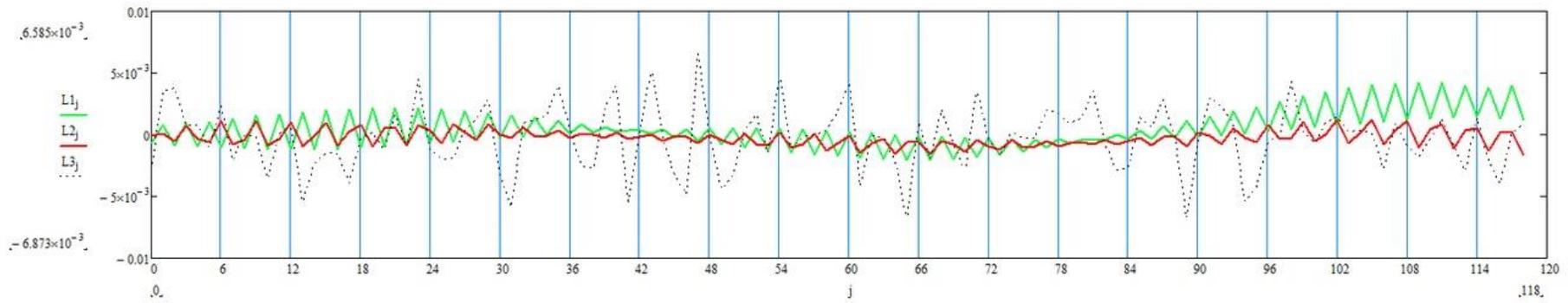
GORN – KUP2 обработано абсолютным методом период 01.10.14 – 20.10.14 (сверху вниз: направление З-В, направление Ю-С, высота)



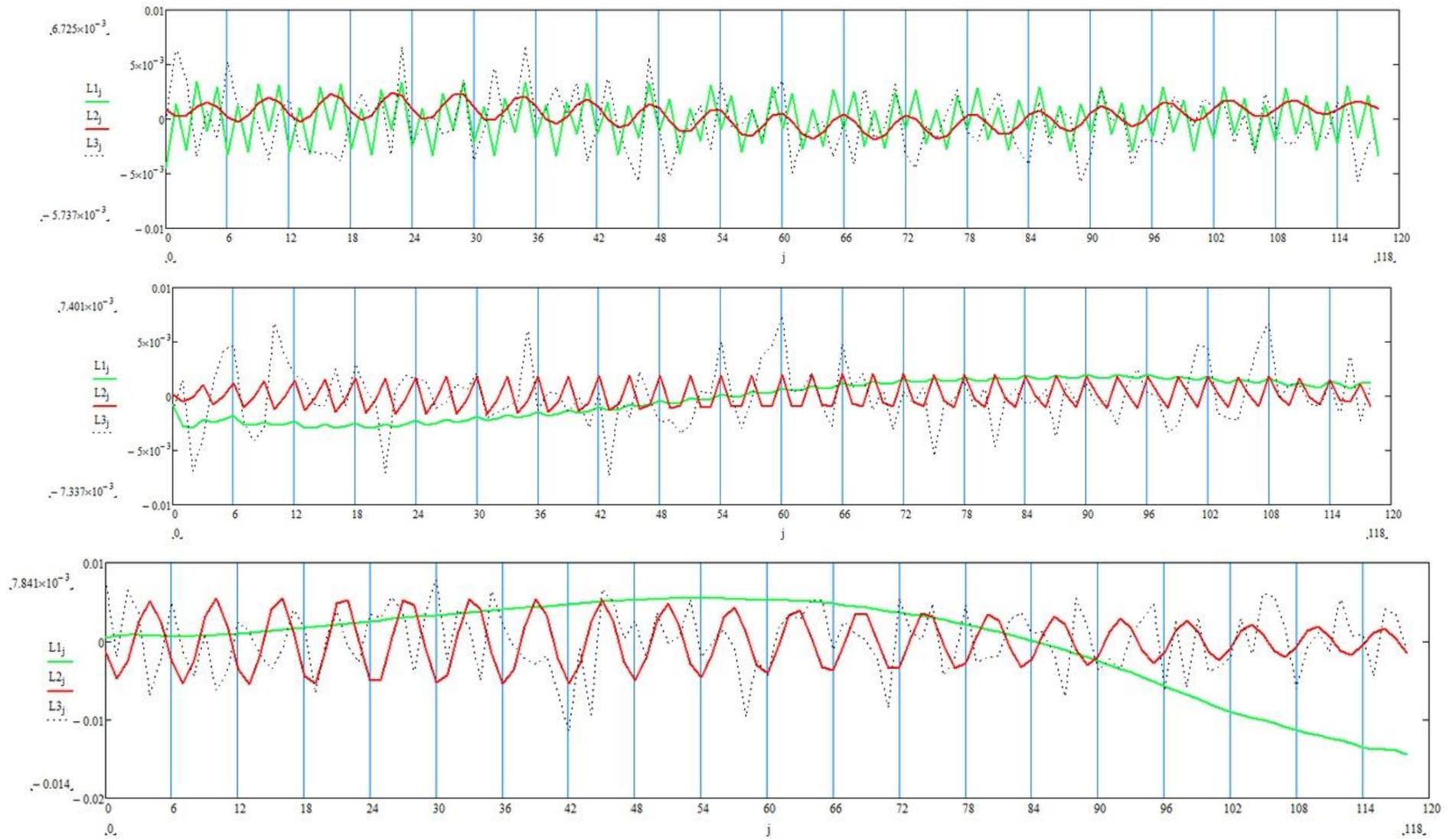
ROSI-KUP2 обработано абсолютным методом период 01.10.14 – 20.10.14 (сверху вниз: направление З-В, направление Ю-С, высота)



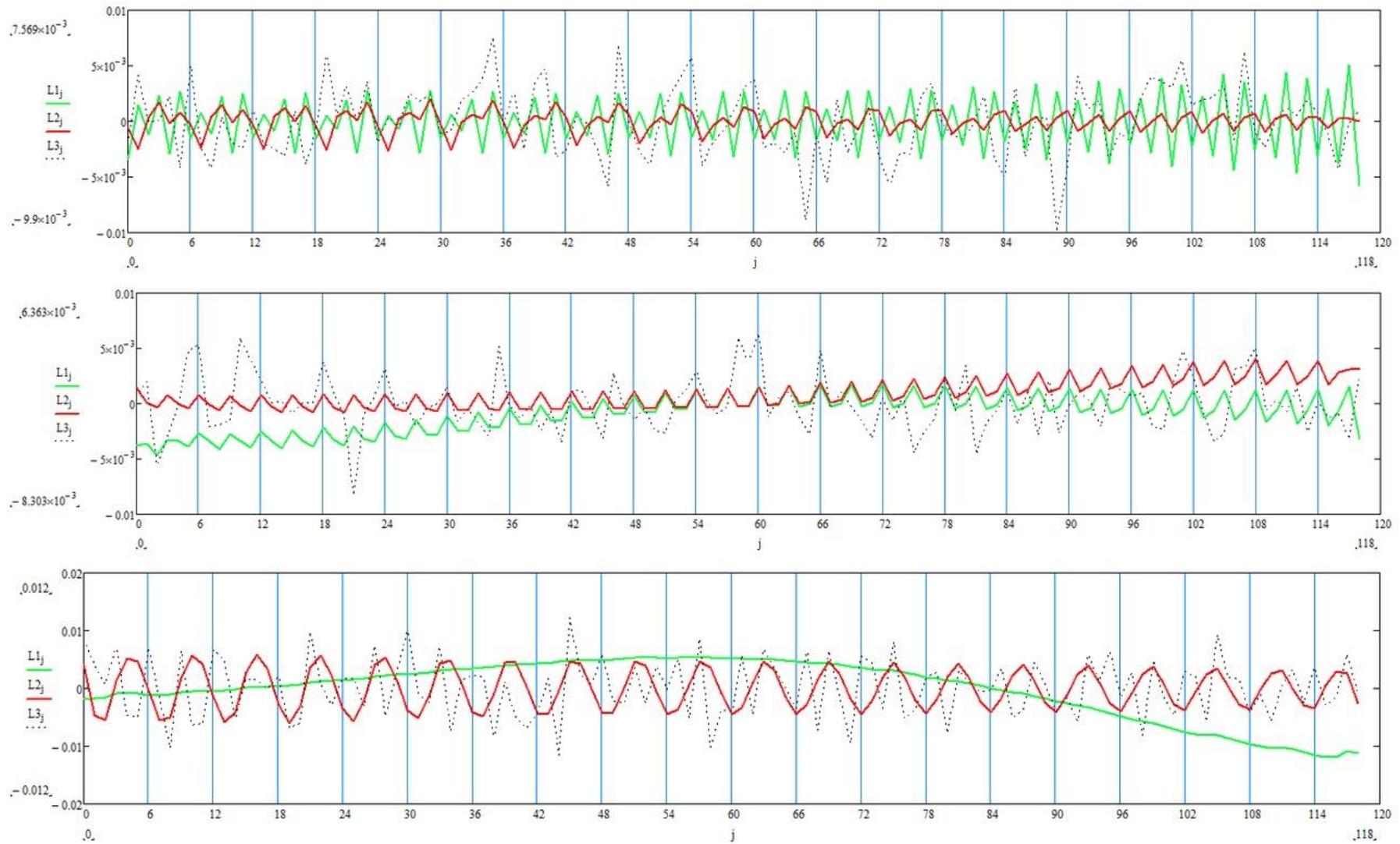
GORN способ определения координат по стратегии PPP (Сверху вниз: направление З-В, направление Ю-С, высота) 01.01.14 – 20.01.14.



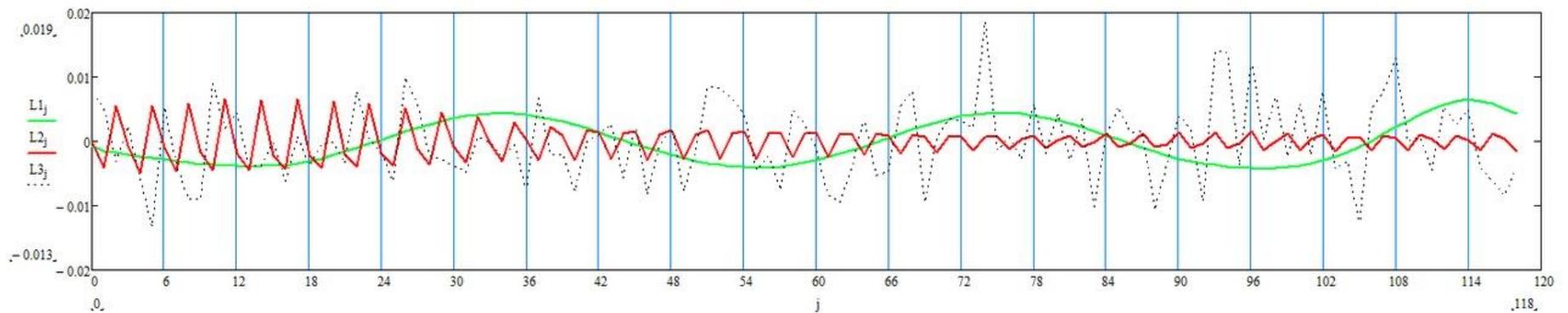
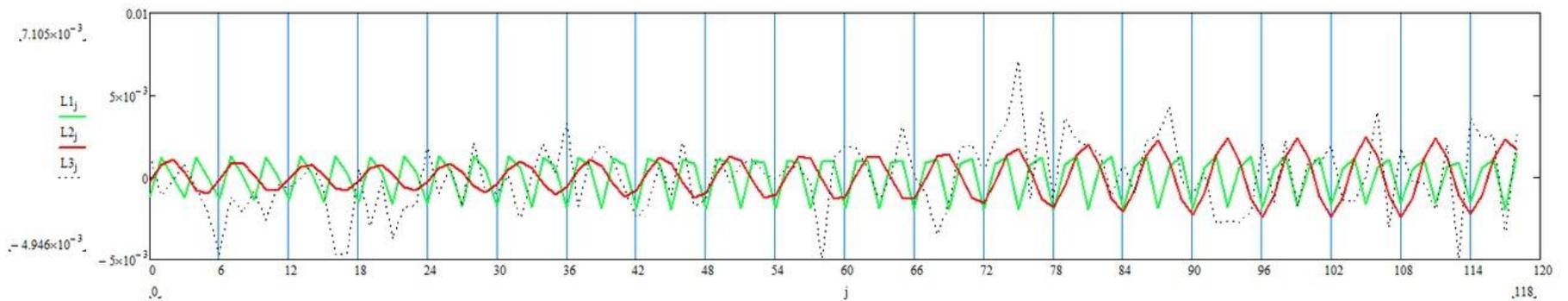
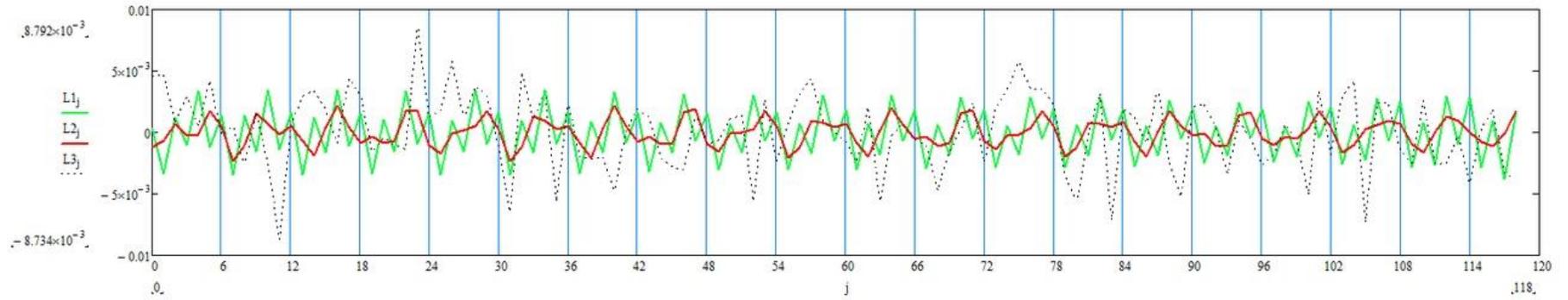
KUP2 способ определения координат по стратегии PPP (Сверху вниз: направление З-В, направление Ю-С, высота) 01.01.14 – 20.01.14.



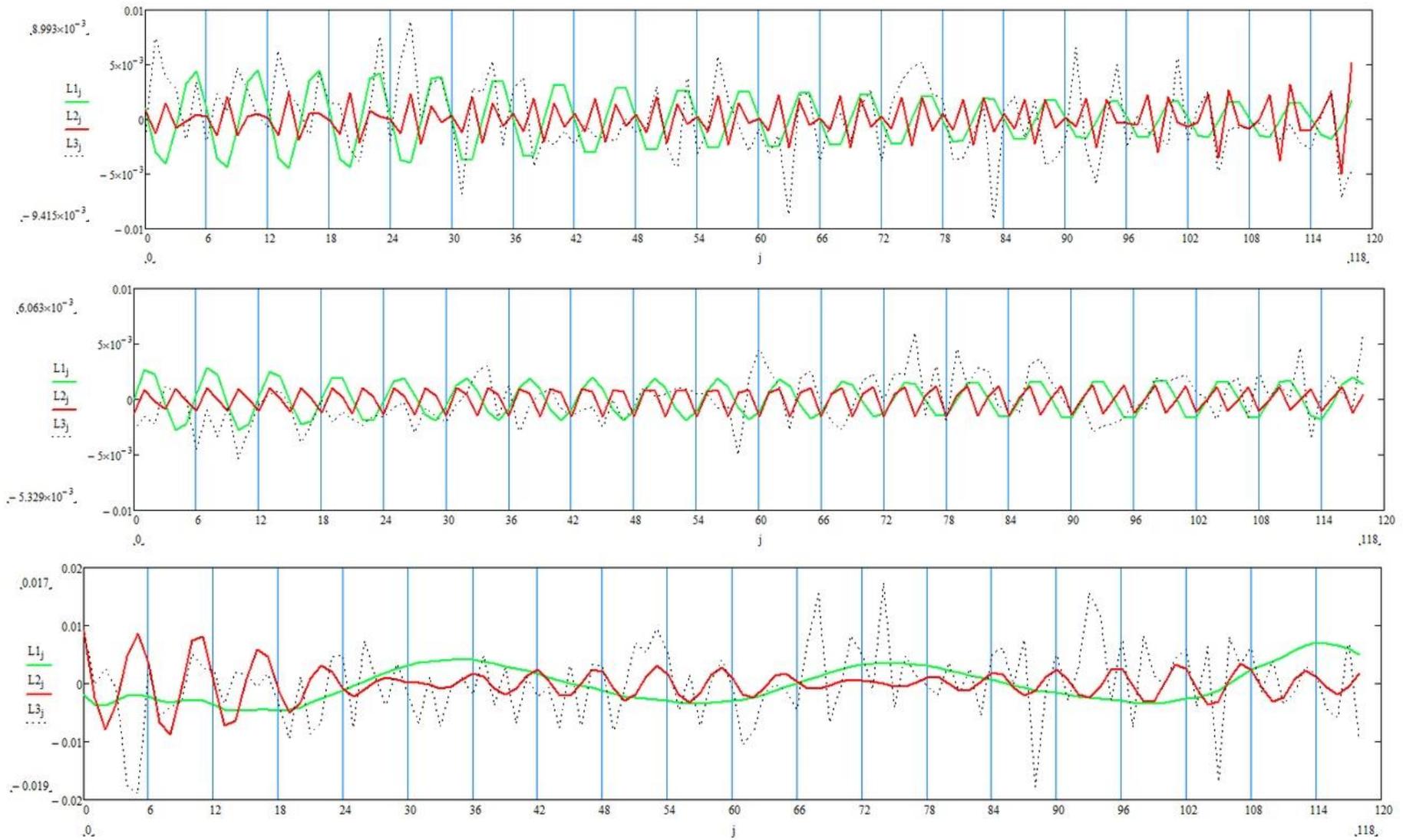
ROSI способ определения координат по стратегии PPP (Сверху вниз: направление З-В, направление Ю-С, высота) 01.01.14 – 20.01.14.



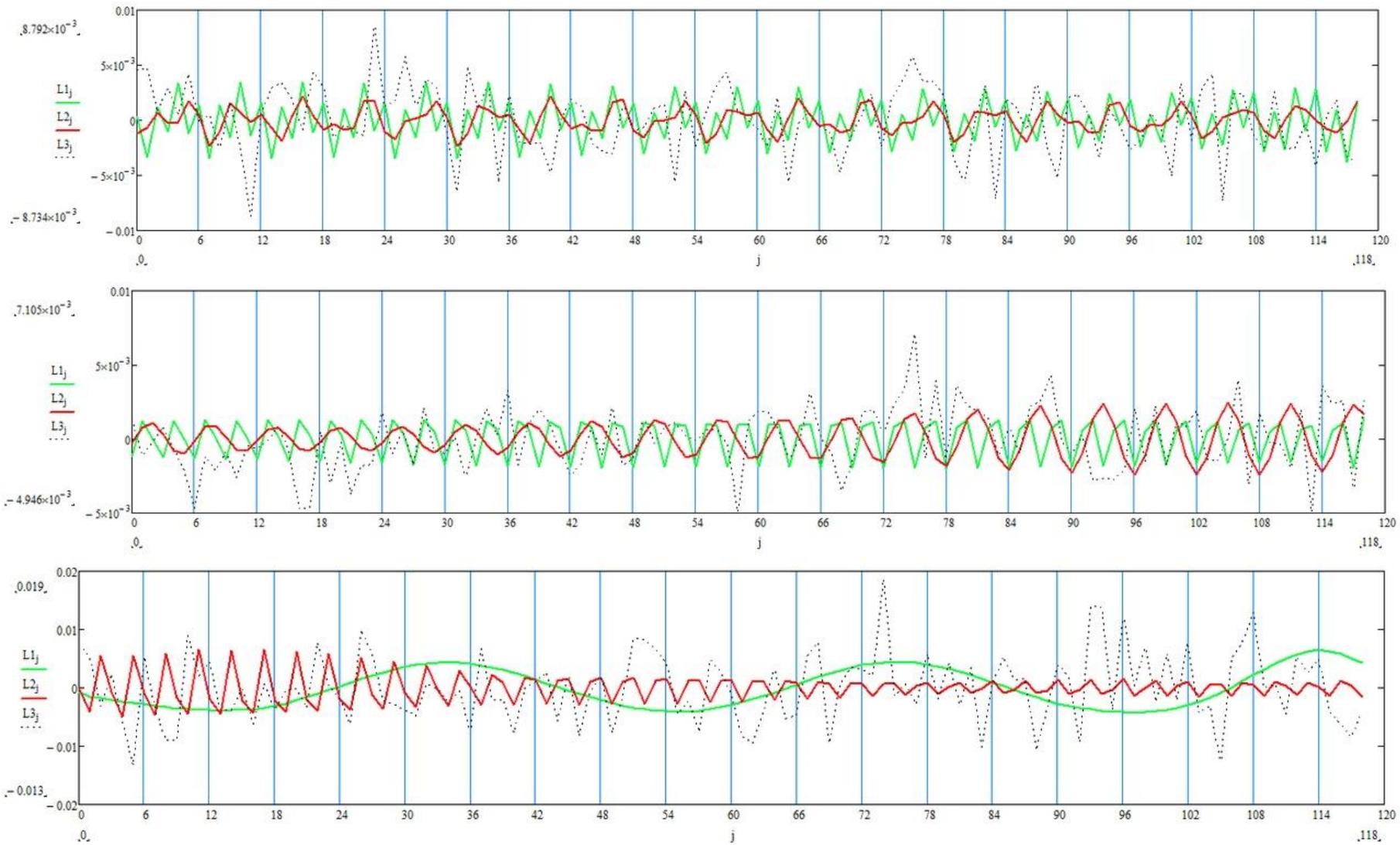
GORN способ определения координат по стратегии PPP (Сверху вниз: направление З-В, направление Ю-С, высота) 01.06.14 – 20.06.14.



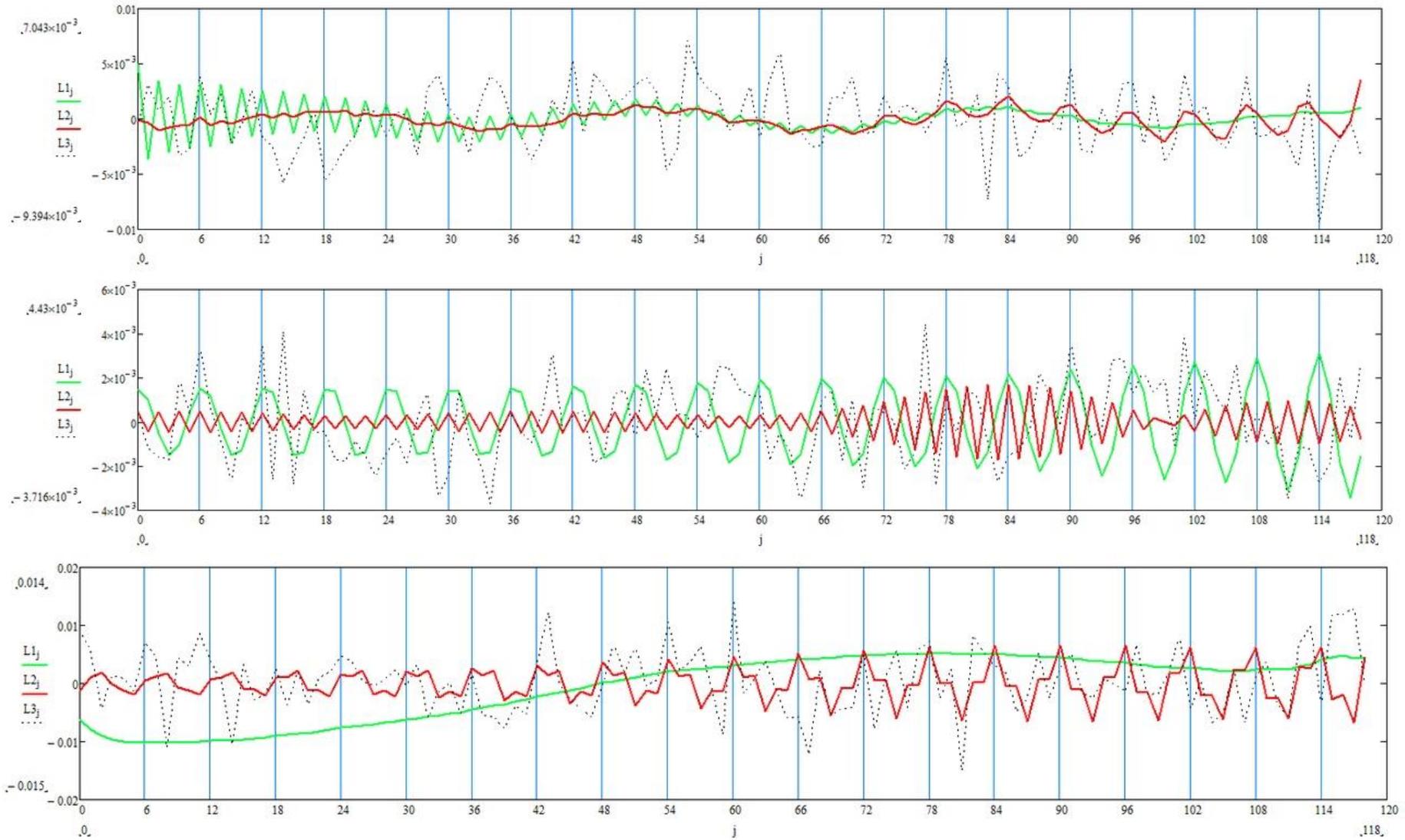
КУР2 способ определения координат по стратегии PPP (Сверху вниз: направление З-В, направление Ю-С, высота) 01.06.14 – 20.06.14.



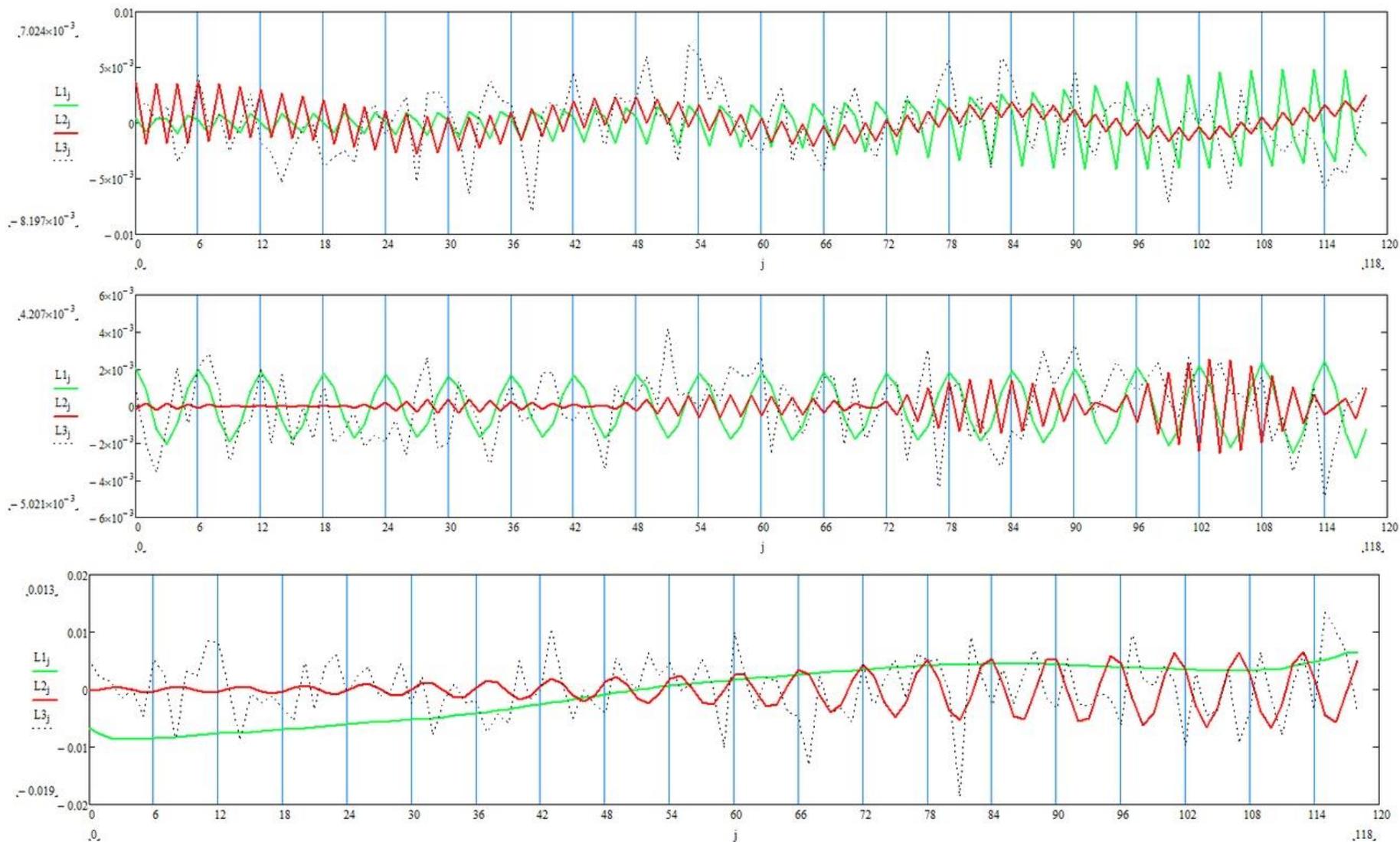
ROSI способ определения координат по стратегии PPP (Сверху вниз: направление З-В, направление Ю-С, высота) 01.06.14 – 20.06.14.



GORN способ определения координат по стратегии PPP (Сверху вниз: направление З-В, направление Ю-С, высота) 01.10.14 – 20.10.14.



KUP2 способ определения координат по стратегии PPP (Сверху вниз: направление З-В, направление Ю-С, высота) 01.10.14 – 20.10.14.



ROSI способ определения координат по стратегии PPP (Сверху вниз: направление З-В, направление Ю-С, высота) 01.10.14 – 20.10.14.

