

На правах рукописи

Косарев Николай Сергеевич



Методика контроля фазовых ГНСС измерений по эфемеридам спутников  
и координатам пункта наблюдений

25.00.32 – Геодезия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Новосибирск – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» (СГУГиТ).

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент  
Антонович Константин Михайлович.

Официальные оппоненты:

Ключин Евгений Борисович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет геодезии и картографии», профессор кафедры прикладной геодезии;

Щербаков Владимир Васильевич, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщений», заведующий кафедрой инженерной геодезии.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (г. Санкт-Петербург).

Защита состоится 9 июня 2016 г. в 15-00 час. на заседании диссертационного совета Д 212.251.02 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» по адресу: 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, ауд. 402.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий»: <http://sgugit.ru/science-and-innovations/dissertation-councils/dissertations/kosarev-nikolai/>

Автореферат разослан 15 апреля 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета



Середович В. А.

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 25.03.2016.

Формат 60×84 1/16. Печ. л. 1,00. Тираж 100 экз. Заказ.

Редакционно-издательский отдел СГУГиТ

630108, Новосибирск, Плахотного, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ

630108, Новосибирск, Плахотного, 8.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

*Актуальность темы исследования.* Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) ГЛОНАСС и GPS активно используются при решении целого комплекса задач координатно-временного и навигационного обеспечения. В настоящее время ГНСС технологии применяются в геодезии для создания высокоточных государственных геодезических сетей, сетей специального назначения на геодинамических полигонах, сетей активных базовых станций, а также в задачах глобальной геотектоники.

Высокая точность определения координат невозможна без выявления и устранения потерь счета циклов и разрешения целочисленной неоднозначности в фазовых ГНСС измерениях. Если для разрешения целочисленной неоднозначности уже предложено более двух десятков методов, то выявление, а главное, корректное восстановление отсчетов непрерывной фазы несущей все еще остается нерешенной проблемой, что приводит к снижению точности и увеличению продолжительности наблюдений. Поэтому обнаружение, исключение аномальных погрешностей и потерь счета циклов является актуальной задачей и требует разработки методики контроля фазовых ГНСС измерений.

Актуальность темы исследования подтверждается тем, что одним из направлений модернизации ГНСС приемников является оснащение их высокостабильными малогабаритными атомными стандартами частоты, которые уже активно используются в современном телекоммуникационном оборудовании. Предложенная методика контроля фазовых ГНСС измерений позволяет обеспечивать надежную предварительную обработку спутниковых данных.

Исследования по данной тематике соответствуют приоритетному направлению развития навигационной системы ГЛОНАСС в рамках

федеральной целевой программы «Концепция развития ГЛОНАСС в 2012–2020 годы».

*Степень разработанности темы.* Важную роль в развитии методик контроля фазовых ГНСС измерений внесли следующие зарубежные и отечественные ученые: В. Remondi, G. Blewitt, S. B. Bisnath, P. A. Gross, A. Leick, R. Langley, P. Teunissen, В. Hofmann-Wellenhof, W. Melbourne, G. Wübbena, С. Rizos, А. А. Жалило, А. П. Карпик, М. О. Кешин, К. М. Антонович, А. С. Толстикова, Е. Б. Ключин, А. К. Гречкосеев, А. М. Алёшечкин, В. В. Щербаков.

*Цель и задачи исследования.* Целью исследования является разработка методики контроля фазовых ГНСС измерений по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений для выявления потерь счета циклов и аномальных погрешностей на этапе предварительной обработки данных.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие *основные задачи*:

а) выполнить анализ существующих методов обнаружения и корректного исключения аномальных погрешностей и потерь счета циклов, выявить их основные достоинства и недостатки;

б) разработать методику контроля, включающую обнаружение и корректное исключение аномальных погрешностей и потерь счета циклов, фазовых ГНСС измерений по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений;

в) разработать математическую модель компенсации дифференциального влияния ионосферы для применения в методике контроля фазовых двухчастотных ГНСС измерений по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений на этапе фильтрации данных;

г) разработать адаптивную рекуррентную процедуру калмановского типа для обнаружения, исключения аномальных погрешностей и потерь счета циклов, которая будет применена в методике контроля фазовых ГНСС

измерений по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений на этапе фильтрации данных;

д) выполнить экспериментальную проверку методики контроля фазовых ГНСС измерений по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений средствами имитационного моделирования и на основе анализа реальных ГНСС измерений;

е) выработать рекомендации по дальнейшему развитию разработанной методики контроля фазовых ГНСС измерений.

*Научная новизна* диссертационного исследования заключается в следующем:

а) впервые разработана методика контроля фазовых ГНСС измерений по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений для приемников с малогабаритными атомными стандартами частоты, которая позволяет корректно обнаруживать и исключать аномальные погрешности и потери счета циклов, что приводит к повышению точности обработки результатов спутниковых измерений по внутренней сходимости в 1,5 – 2 раза;

б) разработана математическая модель дифференциального влияния ионосферы, которая позволяет достоверно учитывать региональные особенности ионосферы с использованием разработанной методики контроля фазовых ГНСС измерений.

*Теоретическая и практическая значимость работы.* Теоретическая значимость исследований заключается в дальнейшем развитии теории обработки ГЛОНАСС и GPS измерений, полученных с использованием ГНСС аппаратуры, оснащенной малогабаритными атомными стандартами частоты.

Практическая значимость работы заключается в том, что разработанная методика контроля фазовых ГНСС измерений применялась для оценки качества измерительной информации, полученной в ходе экспериментальных работ по проекту Российского научного фонда № 14-27-00068 «Разработка фундаментальной теории, методов и алгоритмов координатно-временного и

навигационного обеспечения для решения приоритетных государственных задач геодезии и дистанционного зондирования с учетом классических и релятивистских эффектов гравитационного поля Земли и других массивных тел Солнечной системы».

*Методология и методы исследования.* При выполнении исследований использовались теория математической обработки геодезических измерений, системный подход, методы численного интегрирования и математического анализа. В качестве программного обеспечения использовались программы MathCad 14, Delphi 7, специализированный программный продукт обработки ГНСС измерений Topcon Tools версии 8.2.

*Положения, выносимые на защиту:*

а) использование первых разностей геометрических дальностей, вычисленных по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений, в методике контроля фазовых ГНСС измерений обеспечивает корректное обнаружение и исключение аномальных погрешностей и потерь счета циклов на этапе предварительной обработки данных, полученных любым одиночным спутниковым приемником, оснащенный атомными часами;

б) математическая модель дифференциальной ионосферной задержки, применяемая в разработанной методике контроля фазовых ГНСС измерений по первым разностям спутниковых данных, позволяет уменьшить погрешности, вызванные влиянием ионосферы, без использования результатов самих измерений;

в) использование адаптивной рекуррентной процедуры калмановского типа обеспечивает повышение точности обработки спутниковых данных в 1,5 – 2 раза за счёт возможности обнаружения, исключения аномальных погрешностей и потерь счета циклов в процессе предварительной обработки ГНСС измерений.

*Степень достоверности и апробация результатов.* Основные положения и результаты исследования докладывались и получили одобрение на

следующих конгрессах и конференциях: VII–XI Международных научных конгрессах «Интерэкспо ГЕО-Сибирь» (г. Новосибирск, 2011–2015); 2-й Международной научно-технической конференции, посвященной 30-летию запуска на орбиту первого навигационного космического аппарата «ГЛОНАСС» (г. Железногорск, 2012); Международной конференции «Интеграция данных наблюдений по маркам и за объектами в целом при геодезическом мониторинге инженерных сооружений и природных объектов» (г. Новосибирск, 2014); Международной научно-технической конференции «Геодезия, картография, кадастр – современность и перспективы», посвященной 235-летию основания МИИГАиК (г. Москва, 2014); 10-й Международной научно-практической конференции «Геопространственные технологии и сферы их применения» (г. Москва, 2014); 26 Ассамблее Международного сообщества Геодезии и Геофизики IUGG-2015 (г. Прага, Чехия, 2015).

Исследования выполнялись в рамках госбюджетной научной исследовательской работы, регистрационный номер 1527 (1.3.14) «Разработка принципов и методологических основ навигации подвижных объектов с использованием наземной инфраструктуры ГЛОНАСС».

Результаты исследований внедрены в учебный процесс СГУГиТ (г. Новосибирск), использовались в метрологической службе СГУГиТ при построении геодезической сети Эталонного пространственного полигона СГУГиТ, в геодезической компании ООО «Запсибгеодезия» (г. Новосибирск) при построении метрологического пространственного полигона в г. Тюмени.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

*Во введении* показана актуальность темы исследования, сформулирована цель и задачи исследований, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследования, научные положения,

выносимые на защиту, приведены сведения о достоверности и апробации результатов исследований.

*В первом разделе* рассмотрены основные виды ГНСС измерений и проанализированы их свойства, выделены основные источники погрешностей, оказывающие влияние на ГНСС измерения, и рассмотрены способы их ослабления. Показано, что возникающие в ГНСС измерениях погрешности имеют различные свойства в отношении их величины, скорости изменения, периодичности появления, возможности эффективного учета или исключения из уравнений наблюдений. Доказано, что наиболее трудными для учета являются не моделируемые погрешности (в частности, потери счета циклов).

*Во втором разделе* изложена последовательность вывода формул для обоснования использования первых разностей измерений для контроля фазовых ГНСС псевдодальностей, выполнена оценка величины изменений геометрической дальности в зависимости от погрешностей координат ГНСС спутников и координат пункта наблюдений, представлены общие сведения о разработанной методике контроля фазовых ГНСС измерений по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений, разработаны математические модели дифференциальной компенсации атмосферных задержек, предложены два алгоритма фильтрации данных для обнаружения потерь счета циклов и аномальных погрешностей.

Для обоснования использования первых разностей измерений для контроля фазовых ГНСС псевдодальностей вводится геоцентрическая система отсчета  $O\xi\eta\zeta$ , в которой  $O$  – центр масс Земли (геоцентр), ось  $\xi$  совпадает с направлением радиуса-вектора  $\mathbf{R}$  положения под спутниковой точки  $A$ , ось  $\eta$  лежит в плоскости орбиты перпендикулярно к радиусу-вектору пункта, ось  $\zeta$  перпендикулярна плоскости орбиты (рисунок 1).

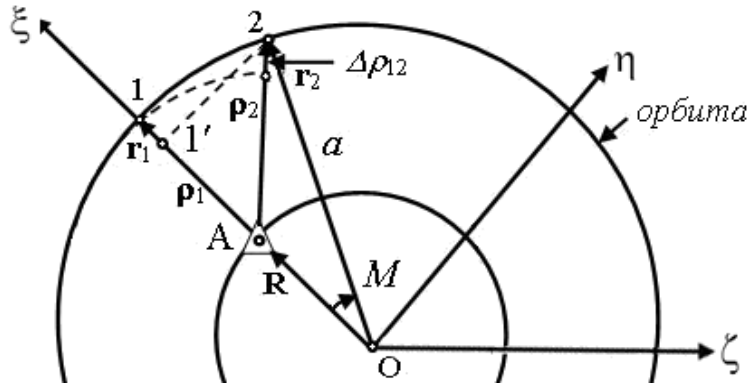


Рисунок 1 – Геометрическая интерпретация топоцентрических разностей

Применяется круговая орбита спутника с радиусом, равным  $a$ . Влиянием возмущений в движении спутника пренебрегаем, тогда радиусы-векторы положения пункта  $\mathbf{R}$ , спутника  $\mathbf{r}_1$  и  $\mathbf{r}_2$  на моменты времени  $t_1$  и  $t_2$ , соответственно, представляются как

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{r}_1 = \begin{bmatrix} a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{r}_2 = \begin{bmatrix} a \cdot \cos M \\ a \cdot \sin M \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

В формуле (1):  $M = n \cdot \Delta t$  – изменение средней аномалии положения спутника на орбите между первой и второй точками;  $n$  – среднее движение спутника.

Топоцентрические радиусы-векторы спутника  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  в моменты  $t_1$ ,  $t_2$  будут определяться формулами:

$$\rho_1 = \mathbf{r}_1 - \mathbf{R} = \begin{bmatrix} a - R \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \rho_2 = \mathbf{r}_2 - \mathbf{R} = \begin{bmatrix} a \cdot \cos M - R \\ a \cdot \sin M \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

а изменение топоцентрического радиуса-вектора за время  $\Delta t$

$$\Delta \rho = \rho_2 - \rho_1 = [a^2 - 2 \cdot a \cdot R \cdot \cos M + R^2]^{1/2} - (a - R). \quad (3)$$

Если в положение пункта наблюдений ввести малые по величине погрешности  $d\xi$ ,  $d\eta$  и  $d\zeta$ , то новые топоцентрические векторы определяются как

$$\rho'_1 = \begin{bmatrix} a - R - d\xi \\ -d\eta \\ -d\zeta \end{bmatrix}, \rho'_2 = \begin{bmatrix} a \cdot \cos M - R - d\xi \\ a \cdot \sin M - d\eta \\ -d\zeta \end{bmatrix}, \quad (4)$$

а их модули будут равны:

$$\rho'_1 = |\mathbf{r}_1 - \mathbf{R}'| = \left[ (a - R - d\xi)^2 + d\eta^2 + d\zeta^2 \right]^{1/2}, \quad (5)$$

$$\rho'_2 = |\mathbf{r}_2 - \mathbf{R}'| = \left\{ [a \cdot \cos M - R - d\xi]^2 + (a \cdot \sin M - d\eta)^2 + d\zeta^2 \right\}^{1/2}. \quad (6)$$

После разложения выражений (5) и (6) в ряды Тейлора относительно  $d\xi$ ,  $d\eta$ ,  $d\zeta$  при ограничении членами первого порядка получается следующая формула, характеризующая изменение величины топоцентрической дальности:

$$\Delta\rho' = \rho'_2 - \rho'_1 = \rho_2 - \rho_1 - d\xi \cdot (a \cdot \cos M - R) / \rho_2 + d\xi - d\eta \cdot a \cdot \sin M / \rho_2. \quad (7)$$

Разность выражений (7) и (3) дает зависимость изменения в геометрической дальности из-за погрешности во взаимных положениях пункта и спутника

$$\delta\Delta\rho = \Delta\rho' - \Delta\rho = -d\xi \cdot (a \cdot [1 - (n \cdot \Delta t)^2 / 2] - R) / \rho_2 + d\xi - d\eta \cdot a \cdot (n \cdot \Delta t) / \rho_2. \quad (8)$$

В таблице 1 приведены значения величины изменений геометрической дальности  $\delta\Delta\rho$  в зависимости от погрешностей во взаимном положении пункта ( $d\xi$ ,  $d\eta$ ) и длительности интервала времени  $\Delta t$ . При расчетах принято: большая полуось  $a = 26\,560$  км,  $R = 6\,378$  км,  $n = 30$  °/ч.

Таблица 1 – Абсолютные значения погрешностей приращений геометрических дальностей, обусловленные погрешностью во взаимном положении пункта и спутника и длительностью интервала времени  $\Delta t$

Погрешности во взаимном положении пункта и спутника, м	Абсолютные значения погрешностей приращения геометрической дальности при интервале времени $\Delta t$ , мм						
	$\Delta t = 1$ с	$\Delta t = 2$ с	$\Delta t = 5$ с	$\Delta t = 10$ с	$\Delta t = 20$ с	$\Delta t = 30$ с	$\Delta t = 60$ с
$d\xi = d\eta = 1$	0,2	0,5	1	2	4	6	11
$d\xi = d\eta = 5$	1	2	5	10	19	29	57
$d\xi = d\eta = 10$	1,9	3,8	9,5	19	38	57	114

Из таблицы 1 видно, что в большинстве случаев абсолютные значения погрешностей приращений геометрических дальностей в зависимости от погрешностей во взаимном положении пункта и спутника не превосходят  $\frac{1}{4}$  длины волны, то есть около 60 мм. Исходя из этого, была разработана методика контроля фазовых ГНСС измерений, которая основывается на сравнении первых разностей фазовых псевдодальностей  $\Delta\Phi$ , полученных приемником, подключенным к высокостабильному стандарту частоты с относительной нестабильностью от  $3 \cdot 10^{-11}$  до  $10^{-16}$ , с разностями  $\Delta\tilde{\Phi}$ , вычисленными (смоделированными) по первым разностям геометрических дальностей и атмосферных задержек. В результате их сравнения рассчитывается некоторая тестовая величина, которая в дальнейшем анализируется на наличие аномальных погрешностей, потерь счета циклов или «пачек выбросов» путем сопоставления с рассчитанной теоретической величиной. При обнаружении в ГНСС измерениях аномальных погрешностей производится их исключение.

Учет дифференциального влияния тропосферной задержки осуществляется с помощью простейшей функции отображения в виде косеканса угла высоты спутника. Дифференциальная ионосферная задержка вычисляется с помощью глобальной модели GIM IONEX. Кроме того, предложен алгоритм учета влияния дифференциальной ионосферной задержки по двухчастотным фазовым ГНСС данным.

По результатам проведенных исследований двух алгоритмов контроля фазовых измерений: медианное среднее и адаптивная рекуррентная процедура калмановского типа – установлено, что второй алгоритм лучше подходит для контроля фазовых ГНСС измерений, так как алгоритм способен адаптироваться к поступающей измерительной информации. Уравнения рекуррентной процедуры калмановского типа, адаптированные для контроля фазовых ГНСС измерений, имеют вид:

$$\hat{x}(k+1) = \hat{x}(k) + \frac{c_v(k) \cdot \sigma_e^2(k+1/k)}{c_v(k) \cdot \sigma_e^2(k+1/k) + \sigma_v^2(k)} \cdot [z(k+1) - \hat{x}(k)], \quad \hat{x}(0) = \hat{x}_0, \quad (9)$$

$$\sigma_e^2(k+1/k) = \sigma_e^2(k) + \sigma_\eta^2(k), \quad \sigma_e^2(0) = \sigma_{x0}^2, \quad (10)$$

$$\sigma_e^2(k+1) = [1 - K(k+1)] \cdot \sigma_e^2(k). \quad (11)$$

В формулах (9)–(11) приняты обозначения:  $\Delta\phi = z(k)$ , а  $\Delta\rho = x(k)$ , где  $z(k)$  и  $x(k)$  соответствуют фиксированию процессов  $z(t_k)$  и  $x(t_k)$  на моменты времени  $t_k$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots$  с шагом  $\Delta t = t_{k+1} - t_k$ ,  $K(k+1)$  – коэффициент усиления,  $\sigma_e^2(k+1)$  и  $\sigma_e^2(k+1/k)$  – дисперсии погрешностей оценивания и погрешностей предсказания оценки,  $\hat{x}(k)$  – оценка случайного процесса  $x(k)$ ,  $\sigma_\eta^2(k)$  – дисперсия случайного процесса  $x(k)$ ,  $c_v$  – коэффициент, рассчитываемый по формулам

$$c_v = 1, \text{ если } \frac{(z_{k+1} - \hat{x}(k))^2}{\sigma_e^2(k) + \sigma_v^2(k)} \leq 3,8 \text{ или } c_v = \frac{\rho(k)}{3,8}, \text{ если } \frac{(z_{k+1} - \hat{x}(k))^2}{\sigma_e^2(k) + \sigma_v^2(k)} > 3,8. \quad (12)$$

В формуле (12)  $\sigma_v$  – средняя квадратическая погрешность измерения, которая складывается из погрешностей моделирования приращений геометрических дальностей, атмосферных задержек, погрешностей часов спутника и приемника.

Для корректной работы адаптивной рекуррентной процедуры калмановского типа (АРП КТ) необходимо исключить выбросы из данных измерений  $z(k)$ . В случае наличия «пачек выбросов» возникает вероятность накопления ошибок прогнозирования. Для устранения этой проблемы обработка измерений производится в прямом и обратном направлении.

В третьем разделе выполнена экспериментальная проверка методики контроля фазовых ГНСС измерений по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений, создан программный комплекс (ПК) для обнаружения, исключения аномальных погрешностей и потерь счета циклов.

Для реализации методики контроля фазовых ГНСС измерений по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений создан в среде Delphi 7 на языке Turbo Pascal ПК Cycle slip (рисунок 2).

ПК работает следующим образом. Исходные данные в виде файлов наблюдения, эфемерид (в форматах \*.n, \*.g или \*.sp3), ионосферы (в формате \*.i или из двухчастотных данных) преобразуются с помощью конверторов r2t.exe, posCalc.exe, TropoCalc.exe, IonoCalc.exe. В результате образуются четыре выходных файла в формате (\*.txt): файл наблюдений, файл с координатами спутников ГНСС, вычисленными по бортовым или точным эфемеридам, файлы рассчитанных тропосферных и ионосферных задержек (в линейной мере).

Подготовленные выходные файлы совместно с приближенными или точными координатами приемника поступают в программный модуль DiffCalc, в котором происходит вычисление первых разностей между измеренными и смоделированными фазовыми измерениями. Затем полученные после вычисления остаточные разности анализируются и исправляются в модуле SlipCalc. В результате на выходе имеется свободный от потерь счета циклов файл наблюдений в формате (\*.txt), максимально близкий к исходным измерениям. Этот файл преобразуется в формат RINEX версии 2.11 конвертором t2r.

Для проверки правильности работы созданного ПК Cycle slip в нем был обработан «эталонный» RINEX файл, в котором устранены возможные потери счета циклов, а также ошибки, обусловленные многолучевостью.

При выполнении эксперимента использовались точные эфемериды спутников ГЛОНАСС и GPS, а также глобальная модель ионосферы, взятые с сайта Международной ГНСС службы. Координаты пункта наблюдения определялись методом точного точечного позиционирования (PPP) в программном продукте RTKPOST. Значение тропосферной задержки оценивалось с использованием модели с простейшей функцией отображения.

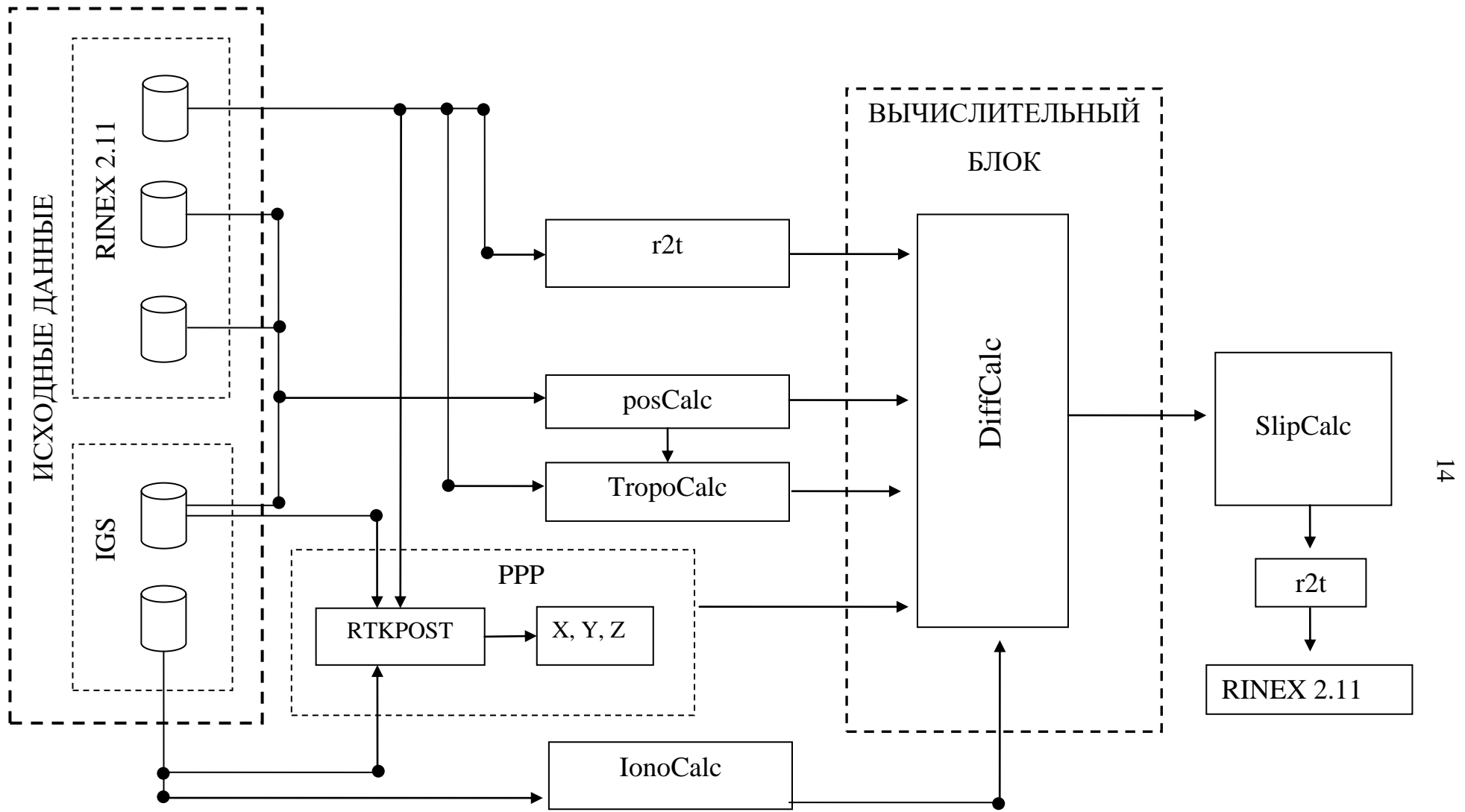


Рисунок 2 – Структурная схема программного комплекса Cycle Slip

На рисунке 3 приведены «эталонные» разности между измеренными и смоделированными ГНСС измерениями для частоты L1.

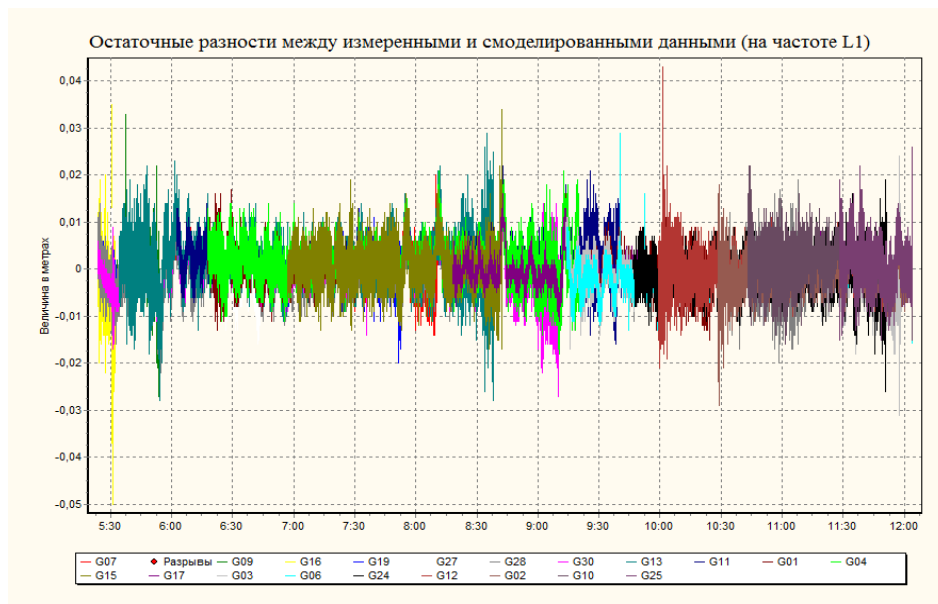


Рисунок 3 – «Эталонные» разности между измеренными и смоделированными данными для частоты L1

Из рисунка 3 видно, что ПК Cycle slip подтверждает отсутствие потерь счета циклов и многолучевости в «эталонном» RINEX файле. Это говорит о том, что разработанный ПК Cycle slip может быть использован для детальной проверки методики контроля фазовых ГНСС измерений по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений.

Процедура проверки методики контроля фазовых ГНСС измерений по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений состояла из двух этапов. На первом этапе исследовались явные и неявные потери счёта циклов, которые имитировались случайным образом. На втором этапе выполнялась проверка работоспособности методики и программного обеспечения с использованием реальных данных.

Для реализации первого этапа исследований была написана программа «Changer» в среде Delphi 7 на языке Turbo Pascal, позволяющая вносить в файл наблюдений погрешности случайного характера.

Неявные потери счета циклов вводились двумя разными способами в исходный (дискретность 1 с) и прореженные файлы, которые были получены из «эталонного» RINEX файла с дискретностью 5; 10; 15; 30 с.

В первом способе в исходный и прореженные файлы ГНСС наблюдения вводились случайным образом одиночные потери счета циклов, а во втором способе вводились потери счёта циклов в заданный интервал наблюдений. В обоих способах с использованием разработанной методики контроля фазовых ГНСС измерений определялось количество обнаруженных потерь счета циклов.

Явные потери счета циклов имитировались в виде разрыва в данных (с длительностью до 10 мин) и с использованием АРП КТ выполнялось его восстановление.

В таблицах 2 и 3 показаны результаты обнаружения одиночных потерь счета циклов (величиной 1 цикл).

Таблица 2 – Результаты обнаружения одиночных потерь счета циклов

Дискретность наблюдений	Количество введенных случайным образом одиночных потерь счета циклов		Процент обнаруженных одиночных потерь счета циклов			
			Адаптивная рекуррентная процедура калмановского типа		Алгоритм скользящего среднего	
	Всего	В наблюдения отдельного спутника				
1 с	700	G07 – 200	100 %	100 %	100 %	100 %
		G01 – 500		100 %		100 %
5 с	400	G24 – 200	100 %	100 %	99 %	99 %
		G28 – 200		100 %		99 %
10 с	200	G24 – 100	100 %	100 %	99 %	98 %
		G28 – 100		100 %		99 %
15 с	200	G07 – 50	99 %	99 %	98 %	100 %
		G15 – 50		99 %		95 %
		G28 – 100		100 %		98 %
30 с	100	G07 – 30	99 %	99 %	100 %	100 %
		G15 – 30		100 %		100 %
		G30 – 40		98 %		100 %

Таблица 3 – Результаты обнаружения одиночных потерь счета циклов

Дискретность наблюдений	Количество введенных одиночных потерь счета циклов в заданный интервал наблюдений отдельного спутника	Процент обнаруженных одиночных потерь счета циклов
1 с	G07 – 30 (30 с)	100 %
1 с	G07 – 60 (60 с)	100 %
1 с	G07 – 300 (5 мин)	100 %
1 с	G07 – 600 (10 мин)	99 %

Из таблицы 2 видно, что при использовании в разработанной методике контроля фазовых ГНСС измерений, как алгоритма скользящего среднего, так и адаптивной рекуррентной процедуры калмановского типа получены практически одинаковые результаты по обнаружению одиночных потерь счета циклов. При этом процент обнаруженных одиночных потерь счета циклов практически сохраняется при изменении дискретности наблюдений. Из этого можно сделать следующий вывод: процесс обнаружения потерь счетов циклов с использованием методики контроля фазовых ГНСС измерений практически не зависит от дискретности наблюдений, если она не превышает 30 с.

Из таблицы 3 видно, что алгоритм адаптивной рекуррентной процедуры калмановского типа позволяет выявлять почти со 100-процентной вероятностью одиночные потери счета циклов на интервале времени до 10 мин.

Анализируя таблицы 2, 3, можно сделать вывод: методики контроля фазовых ГНСС измерений по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений позволяют корректно обнаруживать неявные потери счета циклов, которые имитировались случайным образом.

На рисунке 4 показан график остаточных невязок между измеренными ГНСС данными, в которых вносился разрыв, и смоделированными данными. Интервал разрыва в данных составлял 10 мин. Для корректной работы АРП КТ образовавшийся разрыв был вначале восстановлен с использованием приращений геометрических дальностей.

На рисунке 4 синим цветом показаны исходные ГНСС данные на частоте L1, а красным цветом – восстановленные ГНСС данные, полученные с

использованием АРП КТ. Из анализа рисунка 4 видно, что применение адаптивной рекуррентной процедуры калмановского типа позволяет корректно восстанавливать ГНСС измерения на интервале до 10 мин. При этом восстановленные данные будут иметь погрешности на уровне  $\pm 2$  см.

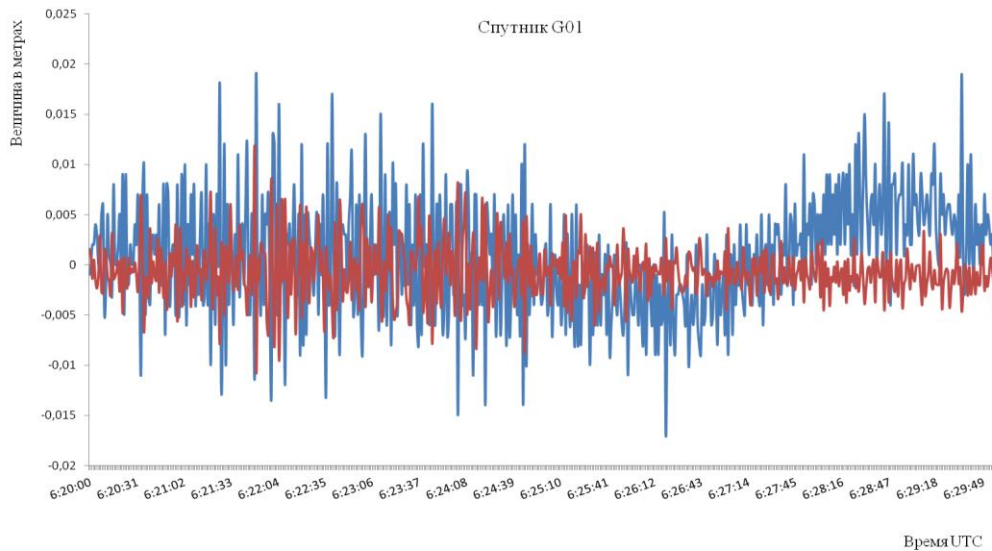


Рисунок 4 – График остаточных невязок между измеренными ГНСС данными, в которых вносился разрыв, и смоделированными данными

На втором этапе исследований методики и ПК Cycle Slip использовались ГНСС измерения с пунктов NOVМ и NVSK на дату 31 марта 2011 года. Затем была выполнена обработка базовой линии (БЛ) NVSK-NOVM с файлом наблюдений с пункта NOVМ, в котором присутствуют потери счета циклов, и с тем же файлом, который прошёл редактирование в ПК Cycle Slip. Затем полученные из обработки компоненты БЛ сравнивались с их «эталонными» значениями. В качестве «эталонных» значений выступали компоненты БЛ (dX, dY, dZ), полученные из обработки суточных сеансов наблюдений, после чего суточный файл ГНСС наблюдений «разбивался» на часовые сеансы, которые так же обрабатывались.

Процедура обработки базовых линий проводилась в лицензионном программном продукте Topcon Tools версии 8.2. при следующих настройках: тип

эфемерид – точные, обработка по двум частотам (L1 и L2), тип решения – fixed, угол отсечки по высоте – 10°, отслеживаемые системы – ГЛОНАСС и GPS.

В таблицах 4 и 5 приведены полученные из обработки компоненты и погрешности вектора базовой линии NVSK-NOVM (до редактирования), а в таблицах 6, 7 – после его редактирования в ПК Cycle Slip.

Таблица 4 – Компоненты вектора БЛ NVSK-NOVM (до редактирования)

Продолжительность сеанса наблюдения	Компоненты вектора БЛ			Компоненты вектора БЛ
	$dX$	$dY$	$dZ$	
	(в метрах)			
с 31 марта по 1 апреля	-18655,511	19681,072	-12166,522	29721,994
с 0 ч до 1 ч 31 марта	-18655,511	19681,084	-12166,519	29722,001
с 1 ч до 2 ч 31 марта	-18655,505	19681,064	-12166,534	29721,990
с 2 ч до 3 ч 31 марта	-18655,510	19681,078	-12166,525	29721,999
с 3 ч до 4 ч 31 марта	-18655,492	19681,029	-12166,541	29721,962

Таблица 5 – Погрешности вектора БЛ NVSK-NOVM (до редактирования)

Продолжительность сеанса наблюдения	$\sigma dX$	$\sigma dY$	$\sigma dZ$	$RMS$	Тип решения
	(в метрах)				
с 31 марта по 1 апреля	0,006	0,012	0,016	0,020	Fixed
с 0 ч до 1 ч 31 марта	0,008	0,015	0,015	0,021	Fixed
с 1 ч до 2 ч 31 марта	0,006	0,013	0,015	0,021	Fixed
с 2 ч до 3 ч 31 марта	0,005	0,013	0,016	0,021	Fixed
с 3 ч до 4 ч 31 марта	0,016	0,020	0,020	0,033	Float, Iono-Free

Таблица 6 – Компоненты вектора БЛ NVSK-NOVM (после редактирования)

Продолжительность сеанса наблюдения	Компоненты вектора БЛ			Компоненты вектора БЛ
	$dX$	$dY$	$dZ$	
	(в метрах)			
с 31 марта по 1 апреля	-18655,511	19681,072	-12166,522	29721,994
с 0 ч до 1 ч 31 марта	-18655,511	19681,084	-12166,519	29722,001
с 1 ч до 2 ч 31 марта	-18655,505	19681,064	-12166,534	29721,990
с 2 ч до 3 ч 31 марта	-18655,510	19681,078	-12166,525	29721,999
с 3 ч до 4 ч 31 марта	-18655,515	19681,060	-12166,543	29721,997

Таблица 7 – Погрешности вектора БЛ NVSK-NOVM (после редактирования)

Продолжительность сеанса наблюдения	$\sigma dX$	$\sigma dY$	$\sigma dZ$	$RMS$	Тип решения
	(в метрах)				
с 31 марта по 1 апреля	0,006	0,012	0,016	0,020	Fixed
с 0 ч до 1 ч 31 марта	0,008	0,015	0,015	0,021	Fixed
с 1 ч до 2 ч 31 марта	0,006	0,013	0,015	0,021	Fixed
с 2 ч до 3 ч 31 марта	0,005	0,013	0,016	0,021	Fixed
с 3 ч до 4 ч 31 марта	0,006	0,012	0,016	0,021	Fixed

Анализируя таблицы 5–7, можно сделать следующие выводы: разработанный ПК Cycle Slip не искажает исходные данные; при наличии потерь счета циклов и аномальных погрешностей корректно их исправляет, что приводит к повышению точности обработки результатов ГНСС измерений по внутренней сходимости. Так, для часового сеанса ГНСС измерений с 3 ч до 4 ч 31 марта 2011 года после редактирования в ПК Cycle Slip улучшились следующие статистические характеристики БЛ NVSK-NOVM:  $\sigma dX$  с 16 мм до 6 мм,  $\sigma dY$  с 20 мм до 12 мм,  $\sigma dZ$  с 20 мм до 16 мм, а RMS с 33 мм до 21 мм.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного диссертационного исследования поставленная цель достигнута. Итоги выполненных исследований:

а) выполнен анализ методов обнаружения и исключения потерь счета циклов в фазовых ГНСС измерениях, который показал, что разработанные методы контроля фазовых ГНСС измерений используют, в основном, исключительно измерительную информацию, полученную непосредственно в процессе сбора спутниковых измерений;

б) разработана методика контроля статических фазовых ГНСС измерений по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений, которая заключается в сравнении первых разностей фазовых псевдодальностей, измеренных одиночным ГНСС приемником, подключенным к высокостабильному атомному стандарту частоты с относительной нестабильностью от  $3 \cdot 10^{-11}$  до  $10^{-16}$ , с вычисленными (смоделированными) первыми разностями геометрических дальностей и атмосферных задержек. Разработанная методика может применяться для любых типов фазовых приемников, при этом не зависит от точности входных ГНСС данных, но зависит от точности поправки часов приемника;

в) разработана математическая модель компенсации дифференциального влияния ионосферы, применяемая в разработанной методике контроля фазовых

двухчастотных ГНСС измерений, полученных приемником, подключенным к высокостабильному атомному стандарту частоты, которая позволяет достоверно учитывать региональные особенности ионосферы, повышая способность разработанной методики корректно обнаруживать, исключать аномальные погрешности и потери счета циклов на этапе предварительной обработки ГНСС данных;

г) разработана адаптивная рекуррентная процедура калмановского типа, используемая в методике контроля фазовых ГНСС измерений по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений, которая повышает эффективность обнаружения, исключения аномальных погрешностей и потерь счета циклов на этапе предварительной обработки ГНСС измерений;

д) создан программный комплекс для проверки методики контроля фазовых ГНСС измерений по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений, реализующий процедуру поиска и исключения потерь счета циклов, возникающих на этапе предварительной обработки фазовых ГНСС измерений. На модуль DiffCalc версия 1.0 получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2015661198 от 26 августа 2015 года;

е) выполнена экспериментальная проверка методики контроля фазовых ГНСС измерений по эфемеридам спутников и координатам пункта наблюдений средствами имитационного моделирования и с использованием реальных ГНСС измерений. Доказано, что разработанная методика и соответствующее программное обеспечение корректно выполняют свои функции: производится контроль фазовых ГНСС измерений, в ходе которого устраняются аномальные погрешности и разрывы в счете циклов непрерывной фазы несущей, а также восстанавливаются пропуски в измерениях.

Результаты диссертационных исследований могут применяться не только для обнаружения потерь счета циклов на этапе предварительной обработки данных, но и для сглаживания точных кодовых псевдодальностей по фазе несущей, исследования локальных моделей тропосферы и ионосферы, мониторинга тропосферы и ионосферы во времени, разработки модели кодовой

многолучевости, оценки уровня шума кодовых и фазовых ГНСС псевдодальностей с целью дальнейшего использования данной информации при формировании ковариационной матрицы измерений.

Перспективы научных исследований связаны с расширением направлений использования разработанной методики контроля фазовых ГНСС измерений для обнаружения и исключения аномальных погрешностей и потерь счета циклов в кинематических приложениях.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1 Антонович, К. М. Метод контроля кодовых и фазовых псевдодальностей в пространстве координат [Текст] / К. М. Антонович, Н. С. Косарев // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2012. – № 2/1. – С. 11–15.

2 Абсолютное кинематическое позиционирование одночастотным фазовым ГНСС-приемником, интегрированным с инерциальными датчиками [Текст] / К. М. Антонович, Н. С. Косарев, Д. Ю. Першин, А. С. Щербаков // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № 4/С. – С. 3–8.

3 Учет влияния ионосферной задержки в методике контроля фазовых ГНСС-измерений с использованием эфемерид и координат пункта наблюдений [Текст] / К. М. Антонович, Н. С. Косарев, С. О. Шевчук, А. С. Щербаков // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. – № 5/С. – С. 3–8.

4 Косарев, Н. С. Исследование методики контроля фазовых ГНСС измерений по имитационным данным // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 1 (33). – С. 6–13.

5 Косарев, Н. С. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015661198 / Российская Федерация / DiffCalc версия 1.0 [Текст] / Н. С. Косарев, С. О. Шевчук; заявитель и правообладатель Сиб. гос. ун-т геосистем и технологий (RU); дата поступления 26 авг. 2015 г.; дата регистрации 20 окт. 2015 г.

6 Антонович, К. М. О возможности контроля непрерывной фазы несущей при ГНСС наблюдениях [Текст] / К. М. Антонович, Н. С. Косарев // ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск : СГГА, 2011. Т. 1, ч. 2. – С. 164–168.

7 Косарев, Н. С. Восстановление фазы несущей: проблемы и пути решения [Текст] / Н. С. Косарев // Вестник СГГА. – 2012. – Вып. 1 (17). – С. 53–60.

8 Косарев, Н. С. Учет влияния атмосферы при контроле фазы несущей в GPS-технологиях [Текст] / Н. С. Косарев // Науки о Земле на современном этапе: Материалы IV Международной научно-практической конференции, 25 апр. 2012 г. – М. : Издательство «Спутник+», 2012. – С. 114–118.

9 Антонович, К. М. О расходимости кодовых и фазовых ГНСС псевдодальностей [Текст] / К. М. Антонович, Н. С. Косарев // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 3. – С. 60–66.

10 Косарев, Н. С. Проблема срывов фазовых наблюдений в методе точного точечного позиционирования [Текст] / Н. С. Косарев, С. О. Шевчук // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск : СГГА, 2014. Т. 2. – С. 128–135.

11 Antonovich, K. M. Future challenges of the small atomic oscillators used in GNSS monitoring systems for structures and natural objects [Text] / Antonovich K. M., Kosarev N. S. // International Workshop «Integration of point and area-wise geodetic monitoring for structures and natural objects», April 14-15, 2014, SGGA, Novosibirsk, Russian Federation. – P. 220–222.

12 Антонович, К. М. Контроль фазовых измерений спутников ГЛОНАСС, выполненных приемником с атомными часами [Текст] / К. М. Антонович, Н. С. Косарев // Геодезия, картография, кадастр – современность и

перспективы: Междунар. научно-техн. конф., посвящ. 235-летию основания МИИГАиК, 27-28 мая 2014 г., Москва. – М. : МИИГАиК, 2014. – С. 5–8.

13 Антонович, К. М. Контроль фазовых измерений ГНСС-приемника с атомными часами [Текст] / К. М. Антонович, Н. С. Косарев, Л. А. Липатников // Вестник СГГА. – 2014. – Вып. 3 (27). – С. 3–21.

14 Ганагина, И. Г. О повышении точности определения пространственных координат высокоточных спутниковых геодезических сетей [Текст] / И. Г. Ганагина, Н. С. Косарев, А. М. Косарева // Геопространственные технологии и сферы их применения: 10-я Междунар. научно-практ. конф., 14-15 окт. 2014 г., Москва. – М., 2015. – С. 23–28.

15 Учет дифференциального влияния ионосферы при контроле фазовых двухчастотных ГНСС-измерений приемника с атомными часами [Текст] / К. М. Антонович, Н. С. Косарев, С. О. Шевчук, А. С. Щербаков // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 2. – С. 103–110.

16 Определение разности потенциалов силы тяжести и высот в геодезии посредством гравиметрических и спутниковых измерений [Текст] / В. Ф. Канушин, А. П. Карпик, Д. Н. Голдобин, И. Г. Ганагина, Е. Г. Гиенко, Н. С. Косарев // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 3 (31). – С. 53–69.