

doi: doi: 10.15407/knit2016.03.060

УДК 528:629.783

А. А. Жалило¹, Е. А. Бессонов², Е. М. Занимонский³

¹ Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины, Киев

² Харьковский национальный университет радиоэлектроники
Министерства образования и науки Украины

³ Радиоастрономический институт Национальной академии наук Украины Украины, Харьков

СЕЗОННО-СУТОЧНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ИОНОСФЕРНЫХ ЗАДЕРЖЕК СИГНАЛОВ ГНСС И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИХ КОМПЕНСАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕТЕВОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО МЕТОДА

Представлены результаты исследований изменчивости ионосферных задержек и сравнительной эффективности их компенсации с использованием сетевого дифференциального метода ГНСС-позиционирования в различные времена года. Показано, что в осенне-зимний период недоучтенная ионосферная задержка при одночастотном дифференциальном позиционировании может достигать 0.3 м на базовых расстояниях до 35 км и 0.9 м на базовых расстояниях до 150 км, а в весенне-летний период ее величина уменьшается в 2-3 раза. Использование дополнительной авторской методики сетевой дифференциальной коррекции ГНСС-наблюдений позволяет в значительной мере (на 30–40 %) уменьшить остаточные ионосферные задержки и повысить точность позиционирования.

Ключевые слова: глобальная навигационная спутниковая система (ГНСС), ионосферная задержка, дифференциальная сетевая коррекция, точное позиционирование.

ВВЕДЕНИЕ

Основным источником погрешностей позиционирования по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) на современном этапе является влияние ионосферы, частотно-зависимой среды распространения навигационных сигналов [1, 7, 10, 11, 13]. Достижение сантиметровой точности координатных определений по результатам фазовых измерений возможно только при условии эффективной компенсации ионосферной задержки сигналов.

Достаточно полно учесть влияние ионосферы позволяет использование двухчастотного оборудования. В случае же использования одночастотных ГНСС-приемников возможно несколько путей учета (компенсации) ионосферной задержки: а) применение дифференциальных поправок, однобазовых или сетевых, коррекция с использованием трендовых ионосферных моделей [2, 3, 6, 8, 12, 16]; б) совместное оценивание параметров моделей ионосферной задержки наряду с информационными параметрами местоположения объекта [4, 5, 15].

Условно ионосферную задержку сигналов разделяют на трендовую и вариационную составляющие ввиду их различных пространственно-временных характеристик. Если трендовую состав-

ляющую можно с высокой степенью точности промоделировать и затем учесть в наблюдениях, то моделирование вариационной составляющей является весьма сложной задачей. Получившие широкое применение ионосферные модели Клобучара [3, 8, 14] и GIM IONEX [2, 3, 6, 8, 12, 16] позволяют с определенной степенью точности компенсировать только трендовую составляющую ионосферной задержки и не учитывают вариационную составляющую процессов, происходящих в реальной ионосфере [1, 4, 5, 7, 10, 11, 13, 15]. При позиционировании с использованием традиционного однобазового дифференциального метода после ввода модельных ионосферных коррекций остаточные систематические составляющие задержки обычно не превышают 0.15 м (на базовых расстояниях до 200 км), в то время как вариационная составляющая может достигать 1 м на базовых удалениях до 200 км [1, 4, 5, 7, 10, 11, 13]. Здесь и далее величины ионосферных задержек выражены в метрах.

Следует отметить, что задача поиска эффективных методов компенсации ионосферной задержки, в частности ионосферных вариаций, актуальна не только при обработке одночастотных измерений, но и двухчастотных. Так, при реализации технологий точного позиционирования реального времени (RTK — Real Time Kinematic) на базовых расстояниях свыше 30—50 км в условиях усиления ионосферных возмущений и, соответственно, усиления пространственно-временной декорреляции ионосферных задержек значительно увеличивается вероятность неверной фиксации фазовых неоднозначностей из-за увеличения погрешностей фазового решения на разностной частоте.

Выполненные в 2010—2012 гг. исследования [4, 5] позволили определить степень воздействия составляющих ионосферной задержки на надежность разрешения фазовой неоднозначности (РФН) и точность дифференциального одночастотного (L1) ГНСС-позиционирования при работе с наблюдениями перманентных станций ГНСС-сетей различными базовыми расстояниями от 50 до 200 км. Так, в работе [5] представлены результаты оценки повышения точности координатных определений с использованием

сетевых ионосферных коррекций на территории Киевской, Черкасской, Черниговской областей Украины. Однако указанные результаты были получены только для наблюдений в зимний и летний периоды года. Поэтому представляет значительный интерес сравнение изменчивости ионосферных задержек (особенно вариационной составляющей) и эффективности применения сетевого дифференциального метода позиционирования по сравнению с однобазовым в различные сезоны года.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для выполнения сетевого позиционирования используются наблюдения перманентных двухчастотных ГНСС-станций (с известными координатами), а также наблюдения потребителей («роверных» ГНСС-приемников). Сетевой метод ионосферных коррекций [5] основывается на интерполяции на текущее местоположение «ровера» оценок дифференциальных ионосферных задержек (GF-наблюдений), полученных относительно станций сети, окружающих «роверный» приемник. В результате в дифференциальные наблюдения на базовой линии «ровер — ближайшая референцная станция (РС) сети» вместо компенсации остаточных дифференциальных ионосферных задержек (ДИЗ) с использованием ионосферных моделей (например Клобучара или GIM IONEX), вводятся дополнительные двойные дифференциальные коррекции, учитывающие текущие пространственные градиенты ионосферных задержек. При формировании сетевых дифференциальных коррекций для конкретного местоположения потребителя используются дифференциальные (одинарные либо двойные разности [3]) оценок ионосферных задержек (GF-наблюдения) ячейки сети из трех станций. Одну из трех РС, которая образует базовую линию «ровер-РС», в дальнейшем условно будем называть «ведущая РС», а две оставшиеся станции ячейки будем называть «ведомыми РС». Выбор ведущей и ведомых РС может осуществляться в соответствии с заранее заданными критериями, но в ряде случаев, например для надежного РФН, оказывается целе-

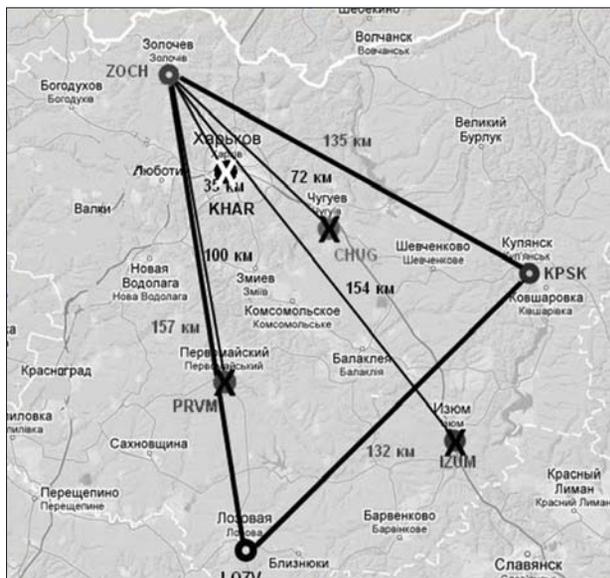


Рис. 1. Карта сети станций, данные которых использовались в работе

сообразным получить и сравнить три решения, последовательно выбирая разные РС в качестве ведущей.

Обязательным условием реализации сетевого метода ионосферных коррекций является решение задачи РФН двухчастотных ГНСС-наблюдений на всех трех базовых линиях ячейки сети РС. Эти комбинации и позволяют сформировать двойные дифференциальные коррекции ионосферных задержек, использование которых, как показано в работе [5], повышает надежность выполнения РФН и точность позиционирования. В основу описанного метода положена концепция сетевого позиционирования MAC (Master-Auxiliary Concept), разработанная швейцарской компанией «Лейка Геосистемс» [9].

Чтобы оценить сезонно-суточную изменчивость ионосферных вариаций, а также сравнить эффективность их компенсации методом сетевой коррекции и методом трендовых ионосферных моделей, предложена следующая методика проведения исследований.

1. Накапливаются двухчастотные наблюдения перманентных РС и двухчастотных «роверных» приемников за период двух смежных суток для каждого из четырех сезонов. Накопление на-

блюдений позволяет подтвердить стабильность полученных характеристик ионосферных задержек. Из полученных наблюдений выбираются данные с минимальным числом аномалий. Станции, находящиеся внутри сети, выбираются на различных удалениях в качестве «роверных» приемников, чтобы оценить и сравнить эффективность однобазового и сетевого дифференциальных режимов компенсации ионосферных задержек, что особенно важно при кинематическом одночастотном L1-позиционировании.

По известным координатам референчных станций и «роверов» выбирается ближайшая станция («ведущая РС»). После этого выполняется предварительная обработка и редактирование наблюдений, устраняются аномалии, в том числе циклические фазовые скачки. Выполняется РФН на всех базовых линиях сети РС и «роверов», результаты РФН верифицируются для исключения аномальных решений. На базовых линиях «ведомые РС — ведущая РС» и «роверы — ведущая РС» формируются согласованные между собой дифференциальные (одинарные и/или двойные разности) ионосферные GF-комбинации, пересчитанные на несущую частоту L1 ГНСС.

2. Выполняется анализ и сравнение сформированных дифференциальных GF-наблюдений на различных базовых удалениях ведомых РС и «роверных» от ведущей РС в разные сезоны года.

3. Формируются интерполированные (дополнительные) дифференциальные GF-наблюдения для базовых линий «роверы — ведущая РС». Исходные дифференциальные ионосферные задержки на базовых линиях «роверы — ведущая РС» сравниваются с поправками модели GIM IONEX и сетевыми дифференциальными коррекциями, оценивается эффективность компенсации исходных ДИЗ с использованием различных коррекций.

4. Сетевые дифференциальные GF-наблюдения (дополнительные ионосферные коррекции) вводятся в дифференциальные фазовые L1-наблюдения на базовых линиях «роверы — ведущая РС» и выполняется одночастотное L1-позиционирование «роверных» приемников относитель-

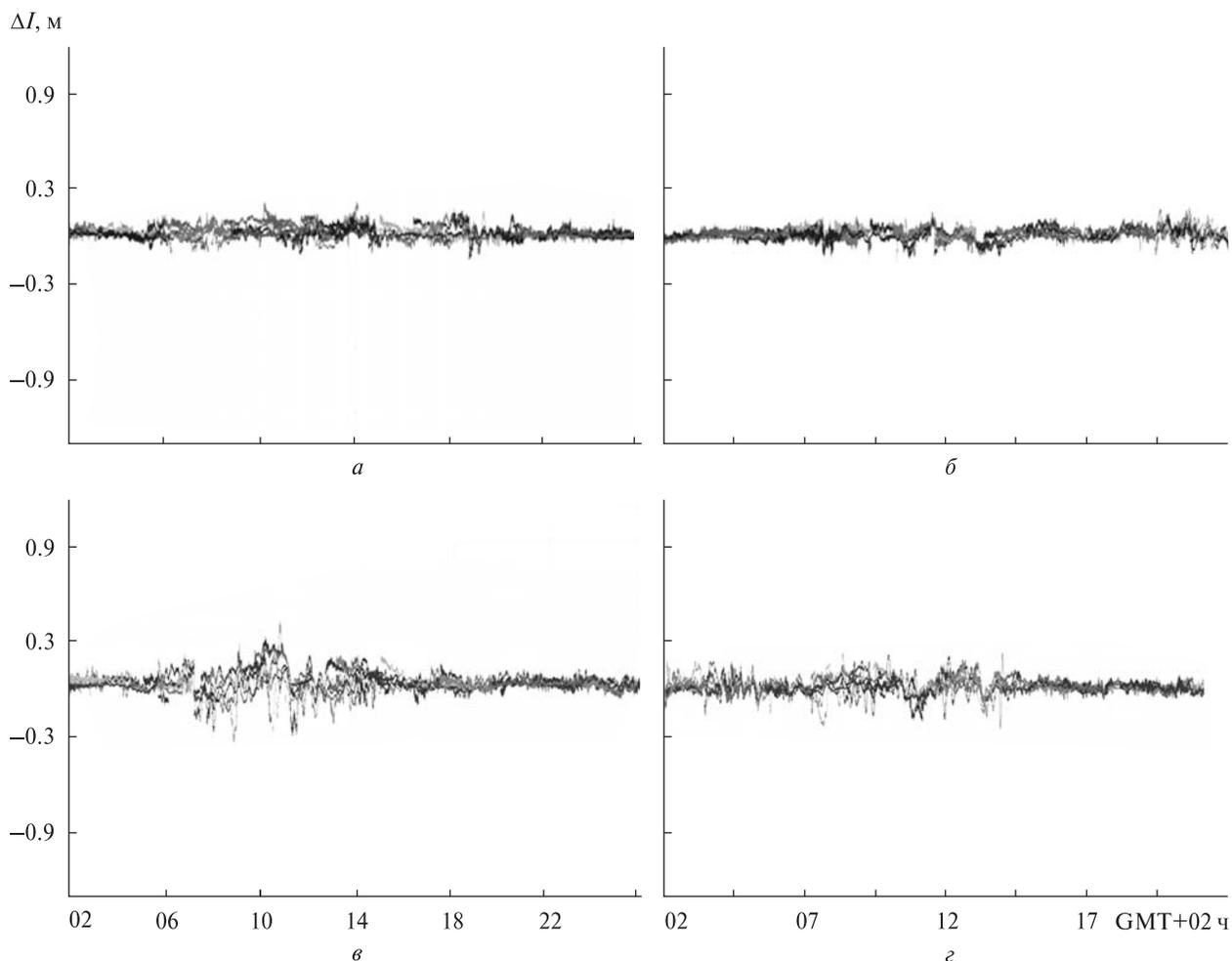


Рис. 2. Изменение ДИЗ на трассах «спутники — станции» в различные сезоны для базовой линии 35 км

но ведущей РС для каждой эпохи суточных наблюдений (имитация кинематического режима координатных определений) для всех выбранных суток всех четырех сезонов года. Выполняется сравнение результатов позиционирования для случая, когда ДИЗ компенсируются с использованием модели GIM IONEX и случая, когда ДИЗ компенсируются с использованием сетевых ионосферных коррекций (двойных дифференциальных коррекций) для всех сезонов года и для каждой из базовых линий «ровер — РС».

Для проведения исследований по указанной методике были использованы ГНСС-наблюдения сети референсных станций, развернутых в Харьковской области. Данные были предостав-

лены владельцем сети — НПК «Навигационно-геодезический центр» (г. Харьков). Наблюдения получены на протяжении двух смежных суток в каждый из четырех сезонов: весна, 15—16 апреля 2011 г. (а); лето, 27—28 июля 2011 г. (б); осень, 22—23 октября 2011 г. (в); зима, 12—13 января 2012 г. (з). В качестве ведущей выбрана станция ZOCH (Золочев), ведомые РС — KPSK (Купянск) и LOZV (Лозовая). Станции PRVM (Первомайск), KHAR (Харьков), CHUG (Чугуев), IZUM (Изюм) выбраны в качестве «роверов». Результирующая сеть станций, наблюдения которых были использованы для проведения исследований, изображена на рис. 1 (крестиками отмечены роверные приемники).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Согласно описанной методике были получены расчеты и получены оценки двойных разностей задержек (ДИЗ) на базовых линиях «роверы — ведущая РС» для каждого из упомянутых суточных сеансов наблюдений, а также величины дополнительной компенсации ДИЗ с использованием сетевой коррекции.

На рис. 2 показаны суточные изменения ДИЗ на трассе «спутник — станция» в различные сезоны для базовой линии «КНАР — ZOCH» (35 км). Такие же данные для базовых линий «CHUG —

ZOCH» (72 км) и «IZUM — ZOCH» (154 км) приведены на рис. 3 и 4 соответственно. Рисунки иллюстрируют вполне ожидаемый вывод о том, что вариации ДИЗ имеют знакопеременный характер со средним значением, близким к нулю. Суточные изменения амплитуды этих вариаций представлены на рис. 5.

Сопоставительный анализ полученных результатов показывает, что уровни ДИЗ в различные сезоны, как и следовало ожидать, существенно различаются, что согласуется и с данными [1, 5, 7, 10]. В осенне-зимний период максимальный уровень ДИЗ составляет 0.3 м на базовых расстояниях до 35 км и 0.9 м на базовых расстояниях до

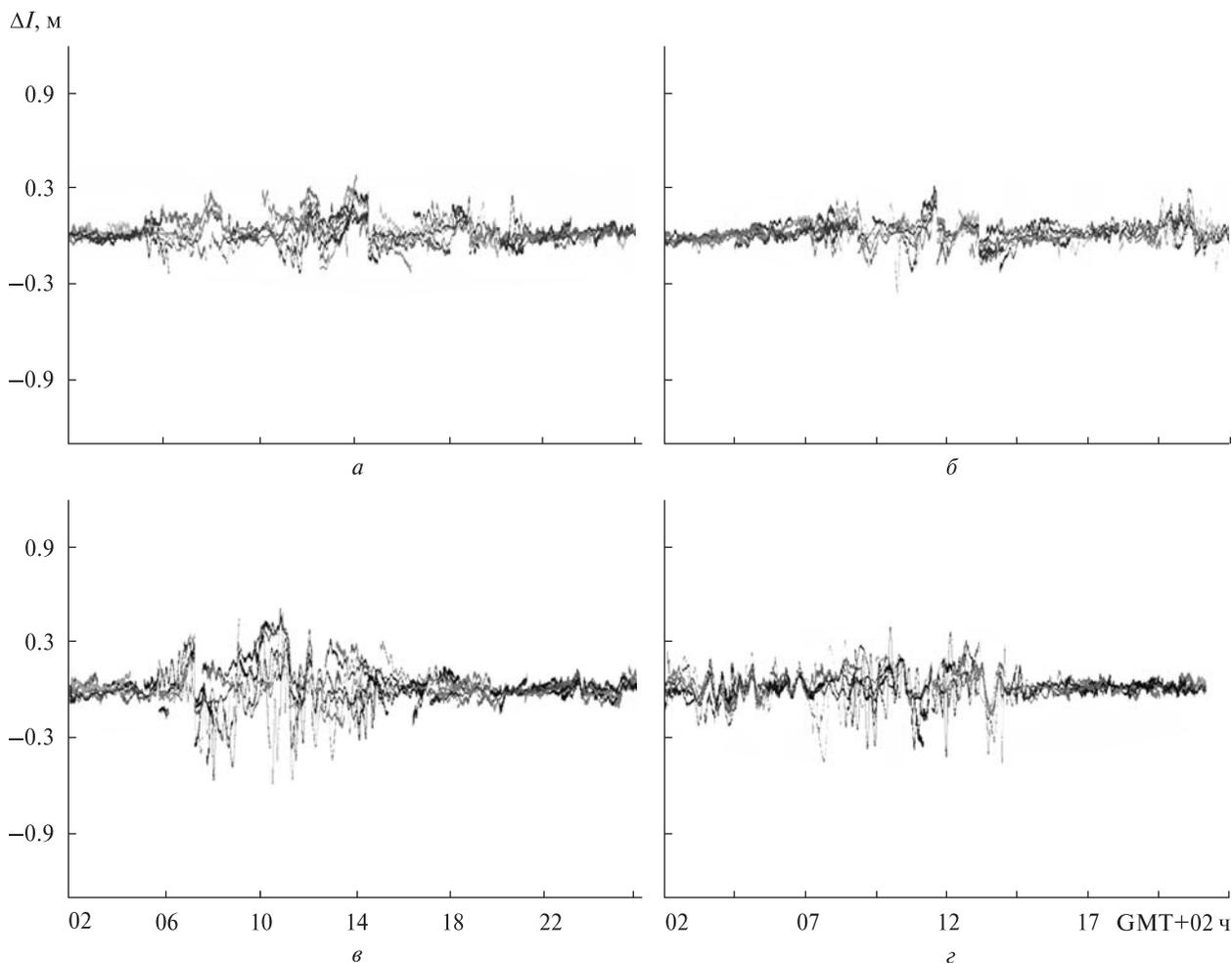


Рис. 3. Изменение ДИЗ на трассах «спутники — станции» в различные сезоны для базовой линии 72 км

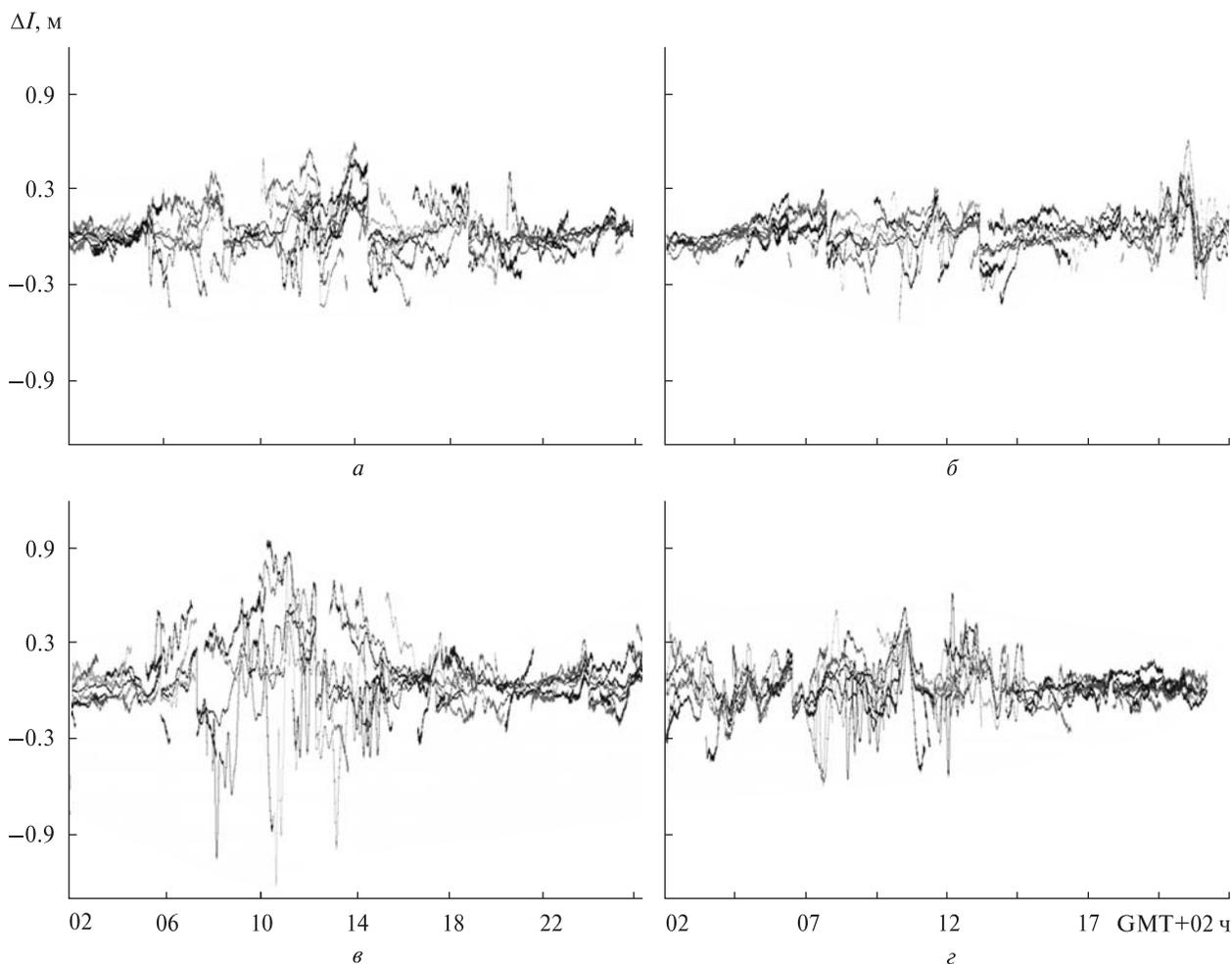


Рис. 4. Изменение ДИЗ на трассах «спутники — станции» в различные сезоны для базовой линии 154 км

150 км. В весенний и летний сезоны максимальный уровень ионосферных задержек составляет 0.15 м на базовых расстояниях до 35 км и 0.4 м на базовых расстояниях до 150 км.

По мере увеличения базовых расстояний «ровер — РС» уменьшается пространственно-временная корреляция ионосферных погрешностей и, соответственно, уменьшается эффективность дифференциальной (однобазовой и сетевой) компенсации ДИЗ. Так, на базовой линии «KNAR — ZOCH» (35 км) изменение уровня ионосферных вариаций в зависимости от сезона составляет 0.05—0.3 м, а значение трендовой составляющей не превышает 0.05 м. На базовой линии «CHUG — ZOCH» (70 км) изменение

уровня ионосферных вариаций в зависимости от сезона составляет 0.05—0.4 м, а значение трендовой составляющей может увеличиться до 0.1—0.2 м. На базовой линии «IZUM — ZOCH» (150 км) изменение уровня ионосферных вариаций в зависимости от сезона составляет 0.1—0.9 м, а значение трендовой составляющей может достигать 0.15—0.3 м.

Следует также отметить, что в дневной период с 7 до 15 ч (по местному времени) интенсивность вариаций ДИЗ достигает максимальных значений, а в остальной период суток их уровень значительно (до 70 %) уменьшается.

Для сравнения эффективности применения сетевого и однобазового методов в различные

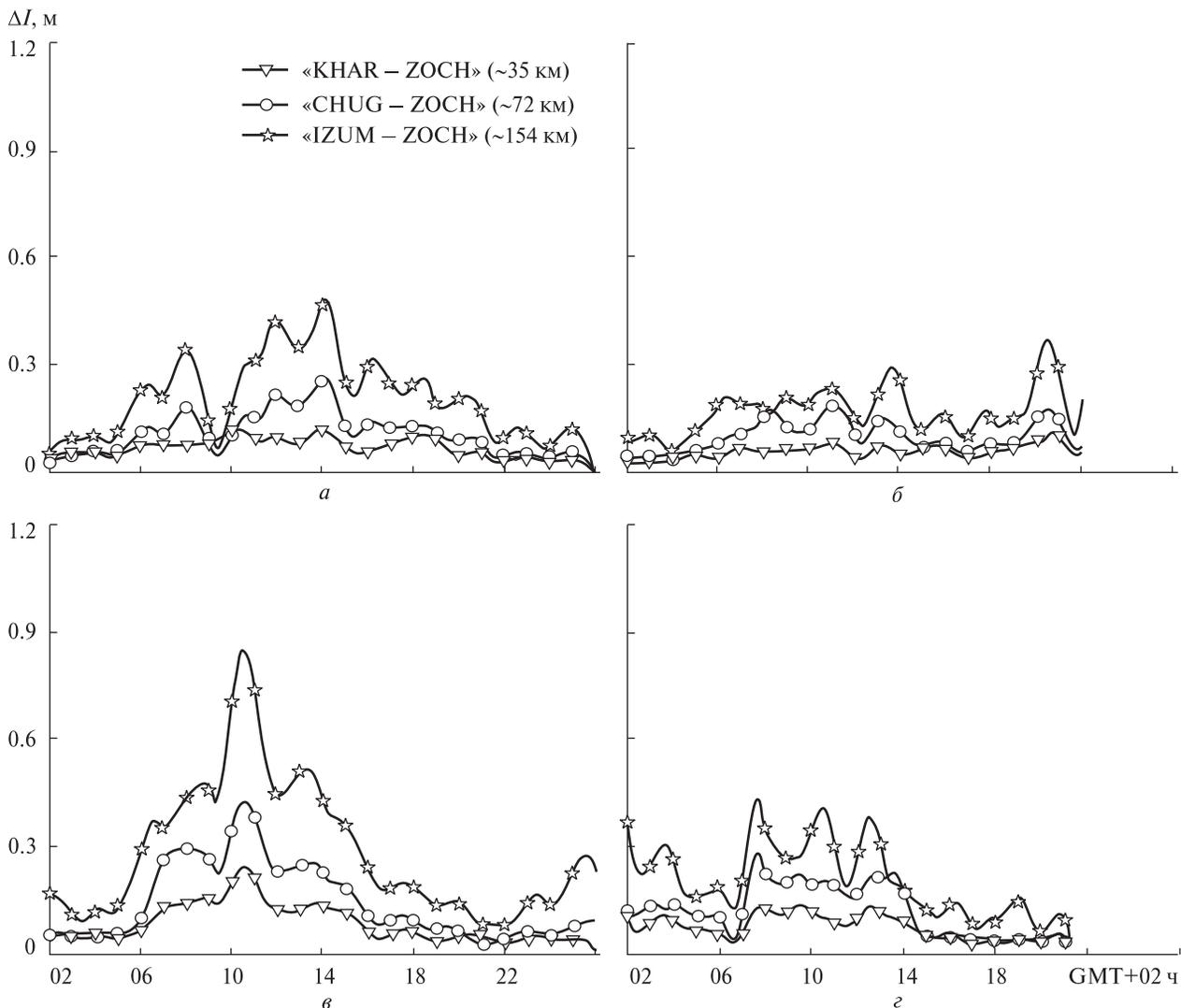


Рис. 5. Изменения в течение суток амплитуды вариаций ДИЗ в различные сезоны для трех длин базовых линий

сезоны года были рассчитаны амплитуды вариаций ДИЗ для обоих методов коррекции. На рис. 6 представлены суточные изменения амплитуды остаточных ДИЗ (по аналогии с рис. 5) после ввода поправок, рассчитанные с использованием глобальной ионосферной модели GIM IONEX [2, 6, 8, 12, 16] (устранены трендовые составляющие). Эти функции рассчитаны для разных базовых удалений и для разных сезонов. На рис. 7 представлены аналогичные зависимости амплитуды остаточных ДИЗ после ввода дополнительных сетевых коррекций по авторской

методике без использования ионосферной модели.

Рассчитанные значения исходных и интерполированных ДИЗ для пары спутников GPS SV18-SV21 с относительно большими уровнями ионосферных вариаций для базовых линий «KHAR – ZOCH», «CHUG – ZOCH» и «IZUM – ZOCH» (150 км) приведены на рис. 8–10 соответственно.

Сравнение и анализ исходных и интерполированных ДИЗ показывают, что сетевой метод коррекции позволяет в значительной мере умень-

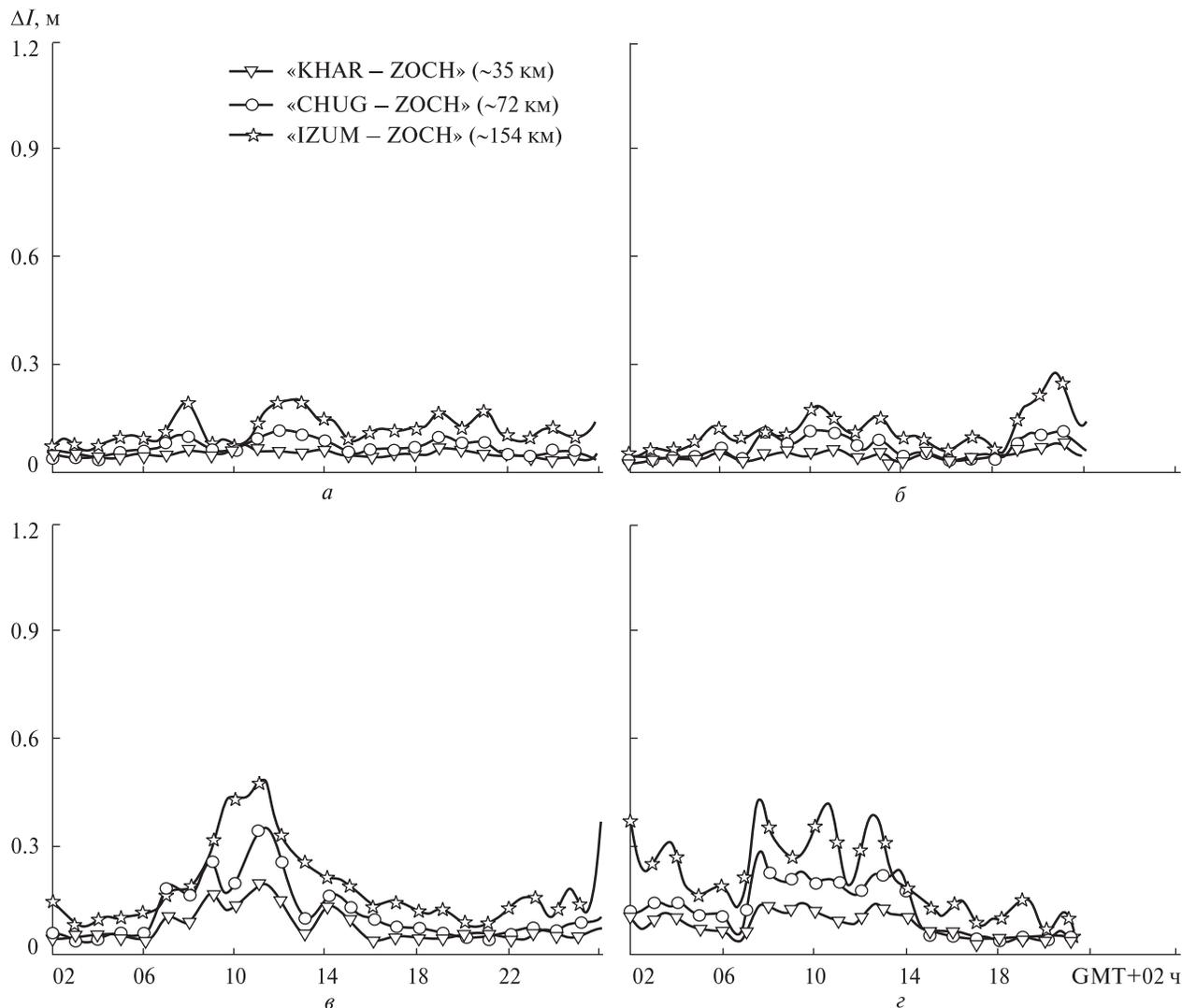


Рис. 6. Суточные изменения амплитуды остаточных ДИЗ после ввода поправок по глобальной ионосферной модели GIM IONEX

шить влияние ионосферной задержки сигналов ГНСС во всех рассмотренных случаях. Так, для всех сезонов года на базовых линиях 35—150 км уменьшение остаточной вариационной составляющей ионосферной задержки за счет использования дополнительной сетевой коррекции достигает 30—40 %, а остаточная трендовая составляющая ионосферной задержки уменьшается до 1—2 см.

Это позволяет подтвердить результаты, полученные ранее в работе [5], и вывод о несом-

ненном и значительном преимуществе сетевой дифференциальной коррекции ГНСС-наблюдений перед традиционным дифференциальным методом с использованием ионосферных моделей.

Для сравнения эффективности применения сетевого и однобазового дифференциальных методов коррекции ионосферных задержек в различные сезоны по критерию точности координатного решения было выполнено одночастотное L1-позиционирование «роверов»

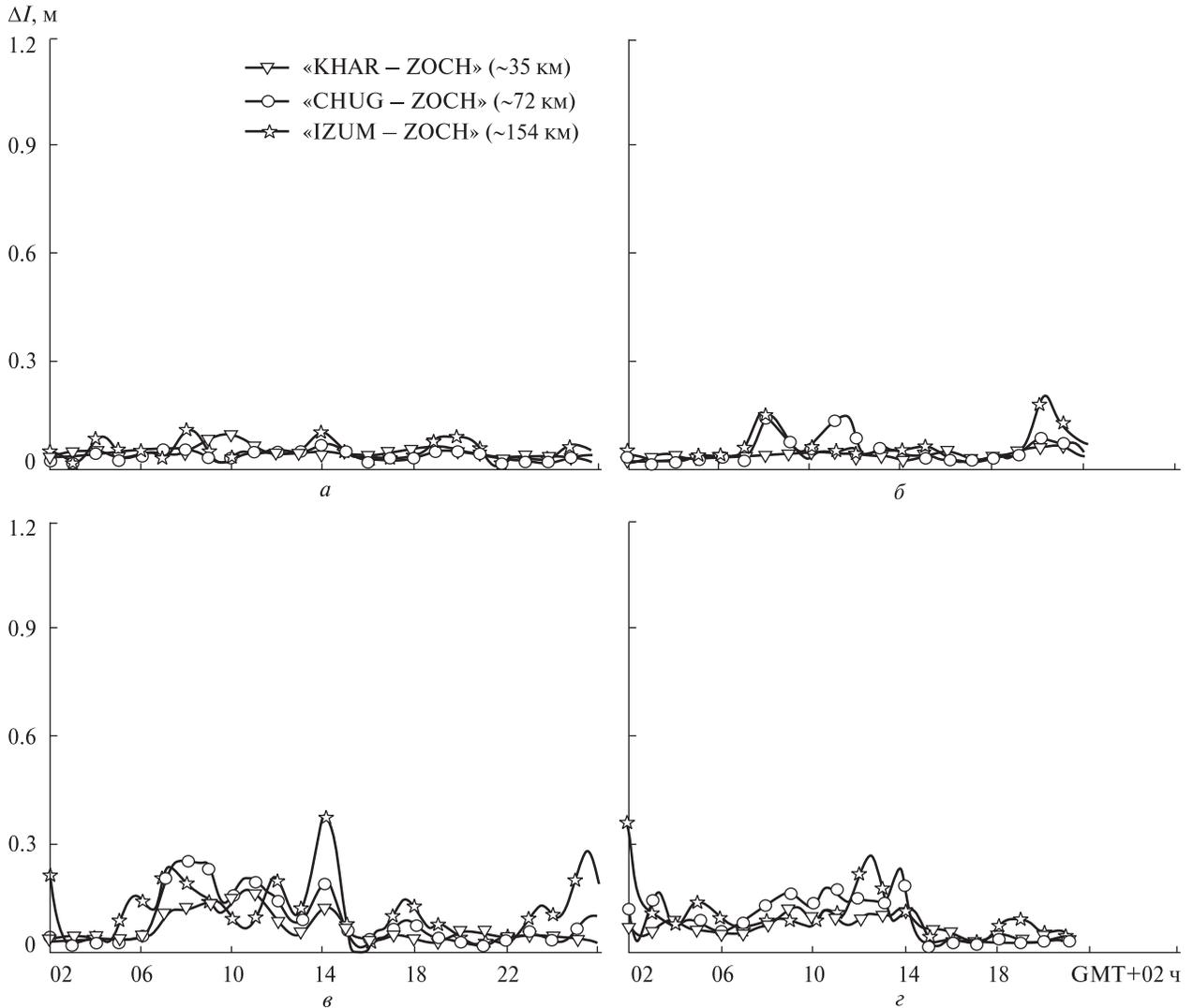


Рис. 7. Суточные вариации амплитуды остаточных ДИЗ после ввода двойных дифференциальных коррекций (см. выше) без использования ионосферной модели

Выигрыш в точности ГНСС-позиционирования с использованием сетевой ионосферной коррекции перед традиционным однобазовым методом

Станция	В / L / H, %			
	GPS-сутки 2011/2012 гг.			
	105 (15.04.11)	208 (28.07.11)	295 (22.10.11)	012 (12.01.12)
KHAR	10 / 35 / 30	35 / 25 / 30	0 / 20 / 5	25 / 15 / 0
CHUG	30 / 55 / 50	50 / 55 / 40	40 / 50 / 50	30 / 40 / 35
PRVM	55 / 40 / 45	— / — / —	35 / 20 / 30	55 / 40 / 40
IZUM	70 / 55 / 35	50 / 50 / 60	70 / 65 / 65	60 / 50 / 50

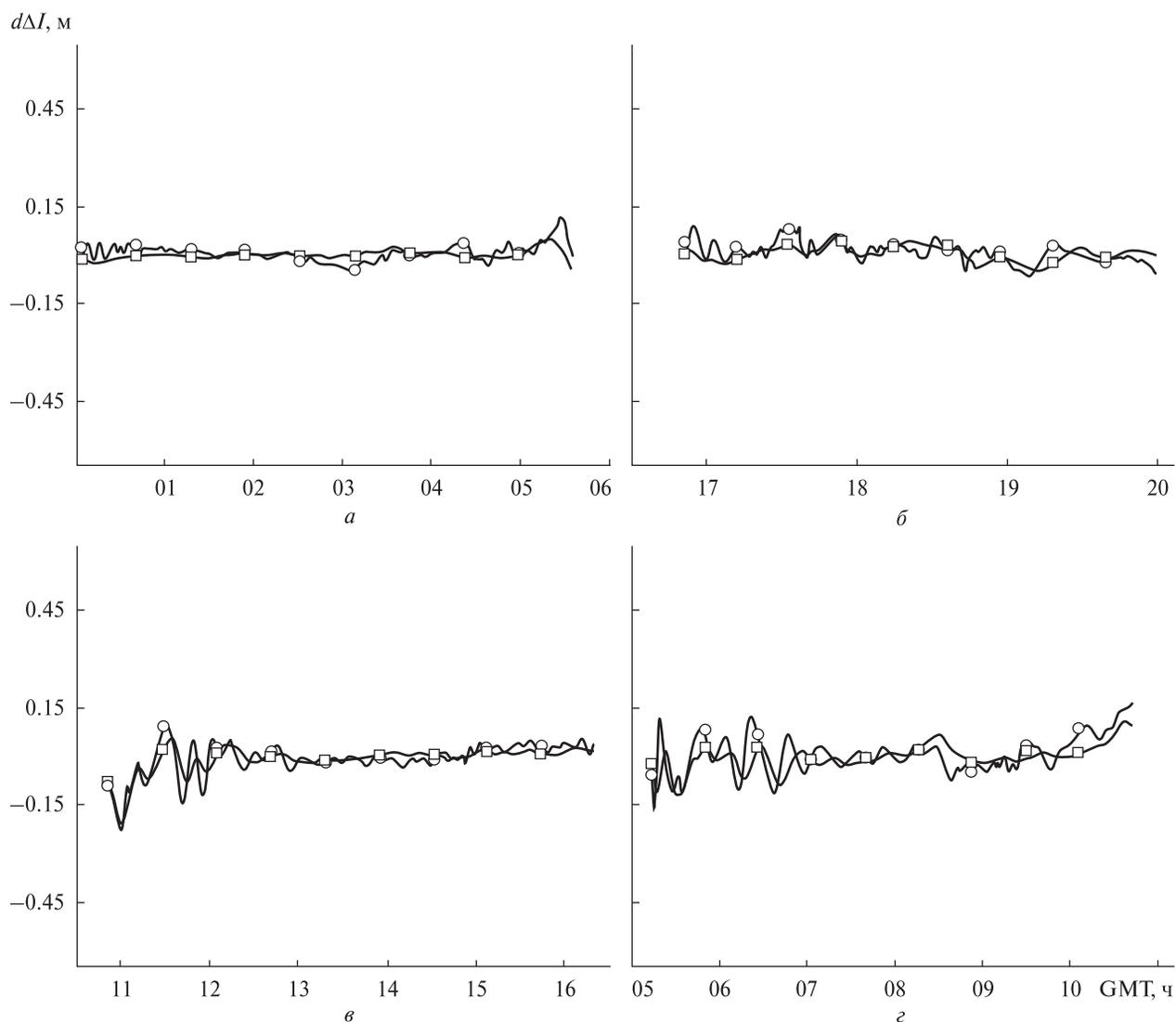


Рис. 8. Исходные (кружки) и интерполированные (квадратики) ДИЗ на станции KHAR для пары спутников GPS SV18-SV21 для четырех сезонов в условиях относительно больших ионосферных возмущений

с имитацией кинематического режима измерений (позиционирование выполняется на каждую эпоху суточных сеансов наблюдений. Полученные координатные решения для обоих случаев ионосферных коррекций сравнивались с известными значениями. Оценки точности позиционирования (по невязкам оценок координат «роверных» станций и априорных значений их координат) фиксировались для каждого суточного сеанса наблюдений для

всех сезонов года и для каждой из базовых линий «ровер — РС».

В таблице для каждого из сезонов (GPS-сутки 105, 208, 295 и 012 2011/2012 гг.) представлены оценки выигрыша (в процентах) в точности ГНСС-позиционирования с использованием сетевой ионосферной коррекции по сравнению с традиционным однобазовым методом по координатам B (север — юг), L (запад — восток) и H (высота). Видно, что среднегодовой (средний

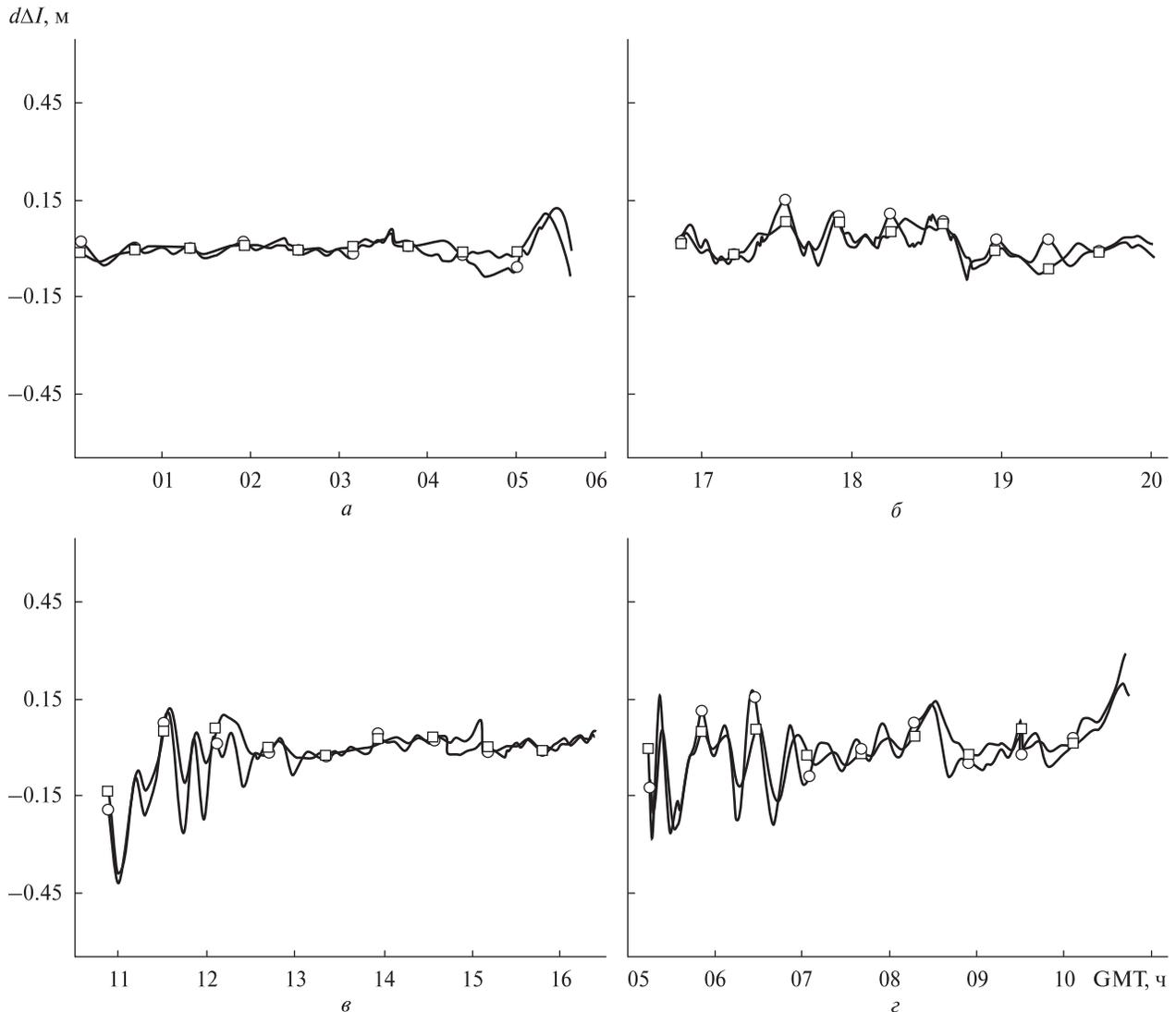


Рис. 9. Исходные (кружки) и интерполированные (квадратики) ДИЗ на станции CHUG для пары спутников GPS SV18-SV21 для четырех сезонов в условиях относительно больших ионосферных возмущений

по всем сезонам) выигрыш в точности позиционирования при использовании сетевых ионосферных коррекций составляет: 20 % для базовых расстояний 35 км, 40 % для базовых расстояний 70 км и 55 % для базовых расстояний 150 км.

Сравнительный анализ величин невязок сравниваемых поэпоховых одночастотных L1-координатных решений показывает, что достижение сантиметровой точности координатных определений в режиме одночастотного кинематического позиционирования на базовых

расстояниях 70—150 км оказалось возможным только с использованием метода дополнительной сетевой коррекции ионосферных задержек. При этом, как показали дополнительные экспериментальные исследования, для надежного разрешения фазовой неоднозначности в режиме кинематического GPS позиционирования (без чего невозможно достижение сантиметровой точности) для базовых расстояний свыше 100 км требуется 30—40 мин непрерывных наблюдений для преодоления влияния ос-

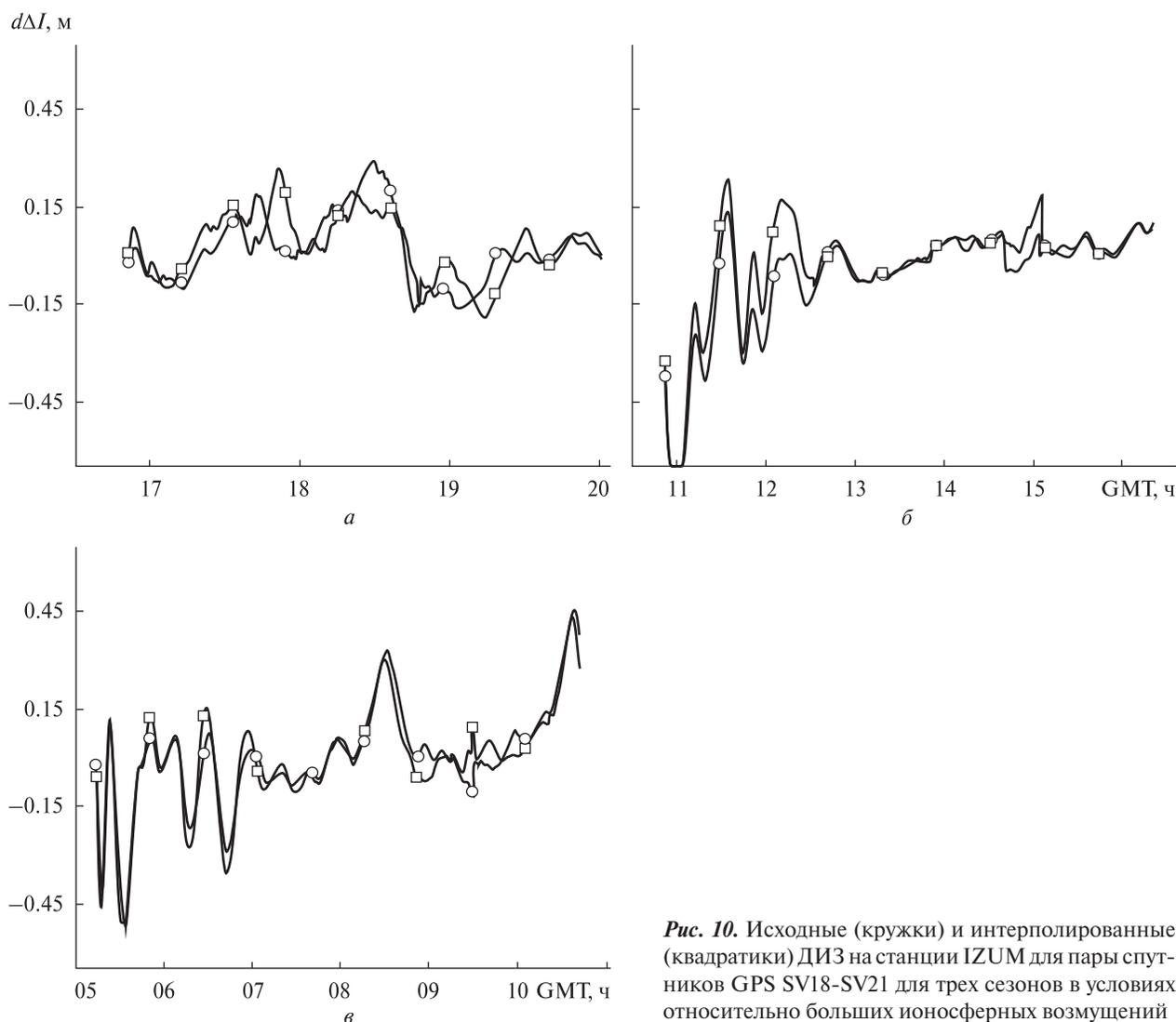


Рис. 10. Исходные (кружки) и интерполированные (квадратики) ДИЗ на станции IZUM для пары спутников GPS SV18-SV21 для трех сезонов в условиях относительно больших ионосферных возмущений

таточных вариаций ионосферных задержек, в то время как для базовых расстояний до 35 км достаточно 5—10 мин.

ВЫВОДЫ

В работе изложены основные результаты выполненных исследований сезонной изменчивости интенсивности ионосферных вариаций и эффективности их компенсации с использованием метода дополнительной сетевой ионосферной коррекции.

1. Уровни дифференциальных ионосферных задержек в различные сезоны, как и следовало

ожидать, существенно различаются. В осенне-зимний период максимальный уровень ДИЗ составляет 0.3 м на базовых расстояниях до 35 км и 0.9 м на базовых расстояниях до 150 км. В весенний и летний сезоны уровень ионосферных задержек значительно (в 2—3 раза) меньше. По мере увеличения базового расстояния «ровер — РС» уменьшается эффективность дифференциальной (однобазовой и сетевой) компенсации дифференциальных ионосферных задержек. Так, на базовой линии 35 км изменение уровня ионосферных вариаций в зависимости от сезона составляет 0.05—0.3 м, величина медленно изме-

няющейся (трендовой) составляющей не превышает 0.05 м. На базовой линии 70 км изменение уровня ионосферных вариаций составляет 0.05—0.4 м, а величина трендовой составляющей может увеличиться до 0.1—0.2 м. На базовой линии 150 км изменение уровня ионосферных вариаций составляет 0.1—0.9 м, а величина трендовой составляющей может достигать 0.15—0.3 м.

2. Метод дополнительной сетевой коррекции позволяет в значительной мере уменьшить ионосферные погрешности ГНСС-наблюдений во всех рассмотренных случаях. Так, для всех сезонов года на базовых линиях 35—150 км уменьшение остаточной вариационной составляющей ионосферной задержки за счет использования дополнительной сетевой коррекции достигает 30—40 %, а остаточная трендовая составляющая ионосферной задержки уменьшается до 1—2 см. Это подтверждает существенное преимущество сетевой дифференциальной коррекции ГНСС-наблюдений по сравнению с традиционным дифференциальным методом с использованием ионосферных моделей.

3. Среднегодовой (средний по всем сезонам) выигрыш в точности позиционирования при использовании сетевых ионосферных коррекций составляет: 20 % для базовых расстояний 35 км, 40 % для базовых расстояний 70 км и 55 % для базовых расстояний 150 км. Достижение сантиметровой точности координатных определений в режиме одночастотного кинематического позиционирования на базовых расстояниях до 100 км оказалось возможным только с использованием метода сетевых коррекций ионосферных задержек, который также позволяет практически полностью компенсировать остаточные трендовые составляющие ионосферных задержек и повысить надежность разрешения фазовой неоднозначности.

Настоящая работа выполнена при частичном финансировании по договору №ДЗ/467-2011 с Держинформнаукой Украины. Авторы благодарны руководству и сотрудникам научно-производственной компании «Навигационно-геодезический центр» за предоставленные данные натурных ГНСС-наблюдений сети станций Харьковской области.

1. *Афраймович Э. Л., Первалова Н. П.* GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. — Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. — 480 с.
2. *Бессонов Е. А.* Аппроксимация гладкими функциями расчетных ионосферных коррекций в задачах точного ГНСС-позиционирования // Радиотехника. — 2011. — № 165. — С. 69—74.
3. *Гофманн-Веллингоф Б., Ліхтенеггер Г., Коллінз Д.* Глобальна система визначення місцеположення (GPS). Теорія та практика: Пер. з англ. під ред. Я. С. Яцківа. — Київ: Наук. думка, 1996. — 380 с.
4. *Жалило А. А., Бессонов Е. А.* О проблеме учета ионосферной задержки навигационных сигналов в задачах точного ГНСС-позиционирования // 4-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития». — Харьков, ХНУРЭ, 2011. — 1, № 2. — С. 62—65.
5. *Жалило А. А., Бессонов Е. А.* Повышение точности дифференциального одночастотного ГНСС-позиционирования путём сетевой коррекции ионосферных погрешностей // Радиотехника. — 2012. — № 169. — С. 302—314.
6. *Желанов А. А., Бессонов Е. А.* Использование глобальных ионосферных карт IGS в задачах высокоточного ГНСС-позиционирования // Прикладная радиоэлектроника. — 2011. — 10, № 3. — С. 302—306.
7. *Занимонский Е. М., Зализовский А. В., Лисаченко В. Н. и др.* Ионосферные вариации над Европой, стимулированные мощным атмосферным фронтом // Радиофизика и Радиоастрономия. — 2010. — 15, № 2. — С. 20—32.
8. *Хода О. А.* Программное обеспечение «Клио» для определения параметров ионосферы // Космічна наука і технологія. — 1999. — 5, № 5/6. — С. 25—32.
9. *Brown N., Geisler I., Troyer L.* RTK rover performance using the master-auxiliary concept // J. Global Positioning Systems. — 2006. — 5, N 1-2. — P. 135—144.
10. *Hernandez-Pajares M., Juan J. M., Sanz J.* Medium-scale traveling ionospheric disturbances affecting GPS measurements: Spatial and temporal analysis // J. Geophys. Res.: Space Phys. — 2006. — 111, N A7. — P. 1—13.
11. *Hernandez-Pajares M., Juan J. M., Sanz J., Colombo O. L.* Application of ionospheric tomography to real-time GPS carrier-phase ambiguities resolution, at scales of 400 — 1000 km and with high geomagnetic activity // Geophys. Res. Lett. — 2000. — 27, N 13. — P. 2009—2012.
12. *Komjathy A.* Global ionospheric total electron content mapping using the global positioning system: Ph. D. dissertation. — New Brunswick, Canada: University of New Brunswick, Fredericton. — 248 p. — (Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report N 188).

13. Oscar L. C. Resolving carrier-phase ambiguities on the fly, at more than 100 km from nearest reference site, with the help of ionospheric tomography // Proceedings of the 12th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 1999). — 14–17 September 1999, Nashville, TN. — P. 1635–1642.
14. Schaer S. Mapping and predicting the Earth's ionosphere using the Global Positioning System: Ph.D. dissertation. — Bern: Astronomisches Institut der Universität Bern, 1999. — 228 p.
15. Schüler E., Hein G., Schüler T. Active GNSS networks and the benefits of combined GPS + Galileo Positioning // Inside GNSS. — November / December 2007. — P. 46–55.
16. Wienia R. J. Use of Global ionospheric maps for precise point positioning. — TU Delft, Aerospace Engineering, Mathematical Geodesy and Positioning. — 2008.
6. Zhelanov A. A., Bessonov E. A. On the using IGS global ionospheric maps in the tasks of high-precision GNSS positioning, *10* (3), 302–306 (2011) [in Russian].
7. Zanimonskiy Y. M., Zalizovski A. V., Lisachenko V. N., et al. Ionospheric Disturbances over Europe Stimulated by Strong Atmospheric Front. *Radiofizika i radioastronomija*, *15* (2), 20–32 (2010) [in Russian].
8. Khoda O. Klio software for the estimation of the ionospheric parameters. *Kosm. nauka tehnol.*, *5* (5/6), 25–32 (1999) [in Russian].
9. Brown N., Geisler I., Troyer L. RTK rover performance using the master-auxiliary concept. *J. Global Positioning Systems*, *5* (1-2), 135–144 (2006).
10. Hernandez-Pajares M., Juan J. M., Sanz J. Medium-scale traveling ionospheric disturbances affecting GPS measurements: Spatial and temporal analysis. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, *111* (A7), CiteID A07S11, P. 1–13 (2006).
11. Hernandez-Pajares M., Juan J. M., Sanz J., Colombo O. L. Application of ionospheric tomography to real-time GPS carrier-phase ambiguities resolution, at scales of 400–1000 km and with high geomagnetic activity. *Geophys. Res. Lett.*, *27* (13), 2009–2012 (2000).
12. Komjathy A. Global ionospheric total electron content mapping using the global positioning system: Ph. D. dissertation, 248 p. (University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, 1997). (Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report N 188).
13. Oscar L. C. Resolving carrier-phase ambiguities on the fly, at more than 100 km from nearest reference site, with the help of ionospheric tomography. *Proceedings of the 12th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 1999)*, P. 1635–1642 (Nashville, TN, 14 – 17 September 1999).
14. Schaer S. Mapping and predicting the Earth's ionosphere using the Global Positioning System: Ph.D. dissertation, 228 p. (Astronomisches Institut der Universität Bern, Bern, 1999).
15. Schüler E., Hein G., Schüler T. Active GNSS networks and the benefits of combined GPS + Galileo Positioning. *Inside GNSS*, P. 46–55 (2007 November-December).
16. Wienia R. J. Use of Global ionospheric maps for precise point positioning, 132 p. (TU Delft, Aerospace Engineering, Mathematical Geodesy and Positioning, 2008).

Стаття надійшла до редакції 27.11.15

REFERENCES

1. Afraimovich E. L., Perevalova N. P. GPS-monitoring of the earth's upper atmosphere. 480 p. (Irkutsk, 2006) [in Russian].
2. Bessonov E. A. Approximation of smooth functions of estimated ionospheric corrections for precision GNSS Positioning. *Radiotekhnika*, Issue 165, 69–74 (2011) [in Russian].
3. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., and Collins J. Global Positioning System. Theory and Practice: Transl. from Eng., 380 p. (Nauk.dumka, Kyiv, 1996) [in Ukrainian].
4. Zhalilo A. A., Bessonov E. A. On the problem of the account of ionospheric delay of navigation signals in the problems of accurate GNSS positioning. *Proc. of the IVth International Radio Electronic Forum "Applied radio electronics. The state and prospects of development"*, Vol.1, N 2, 62–65 (Kharkov, 2011) [in Russian].
5. Zhalilo A. A., Bessonov E. A. Improvement of the accuracy of the differential single-frequency GNSS positioning network by ionospheric correction of errors. *Radiotekhnika*, N 169, 302–314 (2012) [in Russian].

О. О. Жалило¹, Є. А. Безсонов², Є. М. Занімонський³

¹ Головна астрономічна обсерваторія

Національної академії наук України, Київ

² Харківський національний університет

радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України

³ Радіоастрономічний інститут

Національної академії наук України, Харків

СЕЗОННО-ДОБОВА МІНЛИВІСТЬ ІОНОСФЕРНИХ
ЗАТРИМОК СИГНАЛІВ ГНСС ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ
ЇХНЬОЇ КОМПЕНСАЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ
МЕРЕЖЕВОГО ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОГО МЕТОДУ

Представлені результати досліджень мінливості іоносферних затримок і порівняльної ефективності їхньої компенсації з використанням мережевого диференціального методу ГНСС-позиціонування в різні пори року. Показано, що в осінньо-зимовий період недовраховані іоносферні затримки при одночастотному диференціальному позиціонуванні можуть досягати 0.3 м на базових відстанях до 35 км і 0.9 м на базових відстанях до 150 км, а у весняно-літній період їхня величина зменшується у 2-3 рази. Використання додаткової мережевої диференціальної корекції ГНСС-спостережень дозволяє значною мірою (на 30—40 %) зменшити залишкові іоносферні затримки і підвищити точність позиціонування.

Ключові слова: глобальна навігаційна супутникова система (ГНСС), іоносферна затримка, диференціальна мережева корекція, точне позиціонування.

A. A. Zhalilo¹, Ye. A. Bessonov², Ye. M. Zanimonskiy³

¹ Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

² Kharkov National University of Radio Electronics of the Ministry of Education and Science of Ukraine

³ Institute of Radio Astronomy of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv

SEASON-DAILY VARIABILITY OF GNSS SIGNALS
IONOSPHERIC DELAYS AND EFFECTIVENESS
OF THEIR COMPENSATION USING
THE NETWORK DIFFERENTIAL METHOD

The results of researches of variability and comparative effectiveness of the ionospheric delays compensations by use of the network differential GNSS-positioning method in different seasons are presented. It is shown that the residual ionospheric errors at single-frequency differential positioning may achieve 0.3 m on baseline distances up to 35 km and 0.9 m on baseline distances up to 150 km in autumn and winter, while their value is reducing 2-3 times in spring and summer. Using own approach for network differential corrections of GNSS observations we are able to reduce considerable (by 30—40 %) the residual ionospheric errors and to increase the positioning accuracy.

Key words: global navigation satellite systems (GNSS), ionospheric delay, differential network correction, high precision positioning.