

УДК 550.388.2

ТОЧНОСТЬ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ GPS В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ПРИ АКТИВНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ИОНОСФЕРУ МОЩНЫМ КОРОТКОВОЛНОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ НАГРЕВНОГО СТЕНДА «СУРА»

Ю. В. Ясюкевич^{1*}, С. В. Сыроватский^{1,2}, А. М. Падохин², В. Л. Фролов^{3,4},
А. М. Веснин¹, Д. А. Затолокин¹, Г. А. Курбатов², Р. В. Загретдинов⁴, А. В. Першин³,
А. С. Ясюкевич¹

¹ Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск;

² Московский госуниверситет им. М. В. Ломоносова, г. Москва;

³ Научно-исследовательский радиофизический институт ННГУ им. Н. И. Лобачевского,
г. Нижний Новгород;

⁴ Казанский федеральный университет, г. Казань, Россия

Точность работы глобальных навигационных спутниковых систем и возможность активного влияния на неё является достаточно актуальным вопросом. На основе двух измерительных кампаний в 2010 и 2016 годах проведён анализ точностей местоопределения с использованием системы GPS в условиях воздействия на ионосферу мощным коротковолновым излучением нагревного стенда «Сура». Анализ вариаций ошибок позиционирования для 14 станций на различном удалении от стенда (непосредственно вблизи стенда и более тысячи километров от него) показал отсутствие значимых эффектов как в режиме позиционирования высокой точности (Precise Point Positioning, PPP), так и в наиболее часто используемом стандартном итерационном решении навигационной задачи в одночастотном режиме.

ВВЕДЕНИЕ

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) в последние два десятилетия плотно интегрированы в экономическую деятельность человека. Помимо решения прикладных задач, с помощью ГНСС проводятся исследования геодинамических процессов [1], а также мониторинг ионосферы [2–4] и тропосферы Земли [5]. Ряд исследований показал значительное воздействие космической погоды на качество функционирования ГНСС [6, 7]. Ещё одним фактором, оказывающим сопоставимое влияние на состояние околоземного космического пространства (по крайней мере, в локальных областях) является активное воздействие.

Активные воздействия на ионосферу Земли мощным коротковолновым излучением ведутся с 60–70-х годов прошлого века [8, 9]. В настоящее время функционирует 4 нагревных установки: высокоширотные HAARP [10] и EISCAT/Heating [11, 12], низкоширотный стенд Arecibo [13] и единственный в средних широтах нагревный стенд «Сура» [14, 15]. В разное время эксперименты проводились также и на других стендах [8, 9]. Были исследованы основные механизмы генерации возмущений в пределах диаграммы направленности нагревного стенда, а также вблизи неё, приводящие к возникновению ионосферных неоднородностей с пространственными масштабами поперёк геомагнитного поля от долей метра до сотни километров [16–20]. Результаты этих исследований были опубликованы в том числе в ряде обзоров [8, 9, 11, 21–25]. В последние годы также были проведены измерения параметров искусственных ионосферных неоднородностей, возбуждаемых на больших расстояниях от нагревного стенда. Так, в работах [26, 27] с помощью доплеровского лоатора и Харьковского радара некогерентного рассеяния были исследованы параметры искусственных перемещающихся ионосферных возмущений/акустико-гравитационных

* yasukevich@iszf.irk.ru

волн на значительных (до 1 000 км) расстояниях от нагревного стенда «Сура», а в работе [28] впервые восстановлена пространственная структура таких возмущений с использованием методов радиотомографии. Подобные результаты были получены и на стенде HAARP [29, 30].

Таким образом, при воздействии мощным коротковолновым излучением на ионосферу возникает целый спектр как крупномасштабных, так и значительно более мелкомасштабных возмущений, причём возмущения средних и крупных масштабов могут регистрироваться как непосредственно в возмущённой области, так и на значительных удалениях от неё. С точки зрения функционирования глобальных навигационных спутниковых систем, таких как GPS, ГЛОНАСС, Galileo и BeiDou, подобное воздействие может являться фактором ухудшения точности позиционирования [7]. Регистрируемые возмущения в ионосфере влияют на параметры навигационных сигналов, приводя к дополнительному запаздыванию [31].

Интенсивные ионосферные неоднородности были зарегистрированы во время работы стендов HAARP [32], «Сура» [33–36] и EISCAT/Heating [37]. Потенциально неоднородности с размерами порядка первой зоны Френеля могут рассеивать навигационный сигнал [38], приводя к его амплитудным мерцаниям. Неоднородности с большими масштабами вызывают фазовые мерцания. Мерцания приводят к ухудшению точности измеряемых параметров и, впоследствии, к снижению точности позиционирования. Подобные мерцания трансionoсферных радиосигналов наблюдались, например, в экспериментах на стенде HAARP в ультравысокочастотном (УВЧ) диапазоне [39], а также в экспериментах на стендах EISCAT/Heating [40] и «Сура» [41] в очень-высокочастотном (ОВЧ) диапазоне.

Следует отметить, что интенсивность неоднородностей, генерируемых во время коротковолнового воздействия, может быть сравнима с амплитудой неоднородностей, возбуждаемых во время гелигеофизических явлений [25]. При этом известно, что ошибки позиционирования в стандартном одночастотном режиме могут во время возмущений околоземного космического пространства достигать сотен метров [7]. В частности, в условиях воздействия мерцаний точность позиционирования в динамическом режиме PPP (Precise Point Positioning, PPP) снижается в несколько раз: погрешность достигает от $10 \div 20$ см до $1 \div 2$ м [42], при этом максимальные значения наблюдаются во время магнитных бурь [43, 44], а во время солнечных вспышек погрешность может достигать 0,6 м [45]. Увеличение усреднённых значений вероятности срывов сопровождения навигационного сигнала во время магнитных бурь составляет около $0,1 \div 0,5$ % на частоте L1 и $1 \div 6$ % на частоте L2 [46, 47]. В связи с тем, что ухудшение точности может быть критично при решении прикладных задач, вопрос о влиянии коротковолнового воздействия на точность и качество работы ГНСС требует тщательной проработки и ясного ответа.

При всём вышесказанном, анализ эффектов нагрева на точность измерения координат и стабильность измерения фазы навигационного сигнала напрямую ни в одной из работ не проводился. С точки зрения пользовательского сегмента, эффекты мерцаний сами по себе не являются принципиальным фактором. Ключевым является изменение точности позиционирования или появление срывов сопровождения сигнала спутника, что ухудшает геометрию. В данной работе впервые анализируется возможность влияния мощного коротковолнового радиоизлучения нагревного стенда «Сура» на качество позиционирования GPS. Принципиальным является вопрос, может ли воздействие нагревного стенда «Сура» на ионосферу Земли влиять на точность позиционирования GPS как вблизи возмущённой области, так и на значительных удалениях от неё.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Результаты, представленные в данной работе, получены на нагревном стенде «Сура» (56,15° с.ш., 46,1° в.д.) НИРФИ ННГУ им. Н.И.Лобачевского, г. Нижний Новгород. Наклонение геомагнитного поля в районе стенда $I = 71^\circ$. Подробное описание стенда представлено в работе [14]. Стенд включает в себя три коротковолновых передатчика с максимальной генерируемой высокочастотной мощностью 250 кВт каждый, работающие в диапазоне частот 4÷25 МГц. Каждый передатчик нагружен на собственную антенную решётку, позволяющую излучать волны с обыкновенной (О) и необыкновенной (Х) поляризациями в диапазоне частот 4,3÷9,5 МГц. Эффективная излучаемая мощность и ширина диаграммы направленности стенда зависят от частоты и в случае синхронной работы трёх модулей стенда составляют 80 МВт и 12° для частоты 4,3 МГц и 240 МВт и 6° для частоты 9,5 МГц соответственно. Кроме того, диаграмма направленности может быть наклонена в диапазоне $\pm 40^\circ$ от вертикали в плоскости геомагнитного меридиана. Такие параметры диаграммы направленности определяют горизонтальные размеры возмущённой области около 70 км на высоте отражения волны накачки в области ионосферы F_2 .

В работе рассматриваются данные за три дня проведения нагревных экспериментов 23 августа (235 день года) 2010 года и 19–20 сентября (264–265 дни года) 2016 года. Программа работы стенда «Сура» представлена в табл. 1. Эксперименты проводились в условиях дневной и вечерней ионосферы с использованием О- и Х-поляризаций волны накачки, частота которой f_0 всегда выбиралась меньше или порядка критической частоты слоя F_2 . В условиях нагрева на О-модуле это обеспечивало резонансное взаимодействие волны накачки с ионосферной плазмой. Важно отметить, что использовались разные режимы излучения стенда от [+90 с, –30 с] до [+14 мин, –16 мин], где знаком «+» отмечена длительность импульса накачки, знаком «–» — пауза в работе. Кроме того, практически во всех рассматриваемых экспериментах диаграмма направленности стенда была наклонена на 12° к югу в плоскости геомагнитного меридиана для усиления генерации искусственной турбулентности за счёт эффекта магнитного зенита [9, 41, 48].

Исходя из результатов предыдущих наблюдений [28, 34, 49], максимальные искусственные вариации полного электронного содержания (ПЭС) в возмущённой области наблюдались в случае нагрева на О-модуле в условиях вечерней и ночной ионосферы. Эти вариации превышали аналогичные вариации в дневной ионосфере практически на порядок. Так, для вечерних сеансов 23.08.2010 сообщалось о максимальных вариациях ПЭС (0,5÷0,7 TECU) в центре возмущённой области [28]. Поэтому именно в этих сеансах можно ожидать ухудшения точности позиционирования за счёт дополнительной ионосферной задержки для приёмников, расположенных вблизи стенда «Сура».

Следует также отметить, что период 15:40÷20:20 UT 23 августа является одним из наиболее перспективных сеансов с точки зрения регистрации эффектов воздействия. В этом сеансе можно ожидать высыпаний энергичных электронов из радиационных поясов Земли [50]. Для дневных сеансов с 11:25 до 12:23 UT 23.08.2010 нагрев осуществлялся только одним передатчиком на частоте $f_0 = 5,4$ МГц выше критической частоты, которая составляла 5,3 МГц. Из-за того, что излучаемая энергия проходит на просвет, регистрация эффектов в этом эксперименте маловероятна. Тем не менее, мы приводим экспериментальные данные для контроля.

Возможность формирования искусственных ионосферных неоднородностей на значительном удалении от области нагрева связана с генерацией искусственных или усилением естественных перемещающихся ионосферных возмущений. Как показали эксперименты [26–28], подобные возмущения преимущественно наблюдаются, а также имеют максимальную интенсивность в вечерних сеансах, при резонансном нагреве на О-модуле и модуляции эффективной излучаемой мощности волны накачки с частотой меньше или порядка частоты Брента–Вайсяля на ионосферных

Таблица 1. Программа работы стенда «Сура» (здесь f_0 и $P_{\text{эф}}$ — частота волны накачки и эффективная мощность стенда соответственно)

	время работы (MSK), ч:мин	время работы (UT), ч:мин	f_0 , кГц	поляризация	наклон луча, градусы	программа работы (импульс/ пауза)	$P_{\text{эф}}$, МВт
23.08.2010	14:25÷14:43	11:25÷11:43	5 455	O	12	1,5 мин/30 с	12
	14:43÷14:49	11:43÷11:49	5 475	O	12	1,5 мин/30 с	12
	14:49÷15:08	11:49÷12:08	5 435	O	12	1,5 мин/30 с	12
	15:08÷15:13	12:08÷12:13	5 475	O	12	1,5 мин/30 с	12
	15:13÷15:23	12:13÷12:23	5 400	O	12	1,5 мин/30 с	12
				O	12		
	16:00÷18:30	13:00÷15:30	4 785	O	12	3 мин/7 мин	80
	18:40÷23:20	15:40÷20:20	4 785	O	12	10 мин/10 мин	80
	23:20÷23:55	20:20÷20:55	4 785	O	12	6 мин/6 мин	80
19.09.2016	19:11÷20:14	16:11÷17:14	4 785	O	12	3 мин/7 мин	100
20.09.2016	06:45÷06:53	03:45÷03:53	4 785	O	12	9 с/1 с	45
	10:01÷12:51	7:01÷9:51	5 700	X	0	10 мин/10 мин	120
	14:32÷15:22	11:32÷12:22	5 455	O	12	10 мин/10 мин	130
	17:01÷17:54	14:01÷14:54	4 785	O	12	14 мин/6 мин	85
	18:01÷18:31	15:01÷15:32	4 785	O	12	14 мин/16 мин	85

высотах. Таким образом, влияние на точность позиционирования для приёмников, расположенных на значительных удалениях от возмущённой области, можно ожидать в рассматриваемых сеансах с периодом модуляции эффективной излучаемой мощности от примерно 20 мин и более. При этом необходимо учитывать время распространения перемещающихся ионосферных возмущений/акустико-гравитационных волн от возмущённой области до приёмника. Кроме того, необходимо учитывать, что амплитуды искусственных возмущений, наблюдаемые в таких экспериментах, обычно не превышают характерные амплитуды естественных возмущений в среднеширотной ионосфере, особенно во время прохождения солнечного терминатора в области зондирования.

Геомагнитная обстановка в дни рассматриваемых экспериментов была относительно спокойной. В течение 23 августа 2010 года величина глобального планетарного индекса геомагнитной активности K_p изменялась от 0,3 до 3,7, значения индекса глобального симметричного экваториального кольцевого тока SYM-H колебались в пределах $-(4 \div 1)$ нТл. Геомагнитные условия 19–20 сентября 2016 года были более возмущёнными: индекс K_p достигал 4,3 (00÷03 UT 20 сентября), индекс SYM-H дважды опускался до -37 нТл (в 10:30 UT 19 сентября и в 02:30 UT 20 сентября). Это соответствует слабым геомагнитным вариациям.

Для рассматриваемых в работе трёх измерительных дней мы использовали 14 приёмных пунктов сигналов GPS, расположенных на различном расстоянии от стенда «Сура». Приёмники VORO, ZASU, PREG, SURА размещались на полигоне и на удалении до 20 км от него. Остальные приёмники входят в сети SmartNet и TatNet и находятся на расстоянии от 23 до 1 217 км от стенда «Сура». Информация о приёмниках GPS приведена в табл. 2, где указаны координаты приёмных пунктов, их расстояние до стенда «Сура» и до области нагрева на высоте 250 км ($55,7^\circ$ с. ш., $46,01^\circ$ в. д.), а также даны названия антенн и приёмников. Общая схема размещения представлена на рис. 1, где на квадрате справа показана область расположения приёмных пунктов в регионе стенда «Сура» в увеличенном масштабе.

Следует отметить, что антенна приёмника ZASU в период кампании 2010 года была установлена таким образом, что основная часть области её обзора была закрыта, при этом оставалось

Таблица 2. Используемые приёмники GPS

название	с. ш., градусы	в. д., градусы	расстояние от стенда «Сура», км	расстояние от области нагрева на высоте 250 км, км	приёмник	антенна
SURA	56,15	46,10	0	50	JAVAD Alpha-G3	JAVAD GrAnt-G3T
PREG	56,15	46,10	0	50	JAVAD Prego	JAVAD MarAnt+
ZASU	56,03	46,26	16	40	JAVAD Lexon	JAVAD MarAnt+
VORO	56,05	45,86	18	40	JAVAD Sigma-G3T	JAVAD GrAnt-G3T
YADR	55,95	46,20	23	30	PrinCe	CHCC220
CHEB	56,13	47,29	73	92	PrinCe	CHCC220
CHEA	56,08	47,29	74	91	EGGDT_3	TPSPG_A
SHUM	55,50	46,42	75	34	PrinCe	CHCC220
KAYB	55,40	48,20	155	142	NovAtel DL-V3	NOV 702GG
EAOZ	55,84	48,81	172	176	Trimble NetR9	Topcon CR3 GGD
KZN2	55,79	49,12	192	195	Trimble NetR	TRM59800.00 SCIS
ULIA	54,25	48,31	253	218	E_GGD_2	JPSREGA
POLV	49,60	34,54	1 061	1 026	LEICA G	LEIAR10
GLSV	50,36	30,50	1 217	1 191	NOV OEM	NOV702G

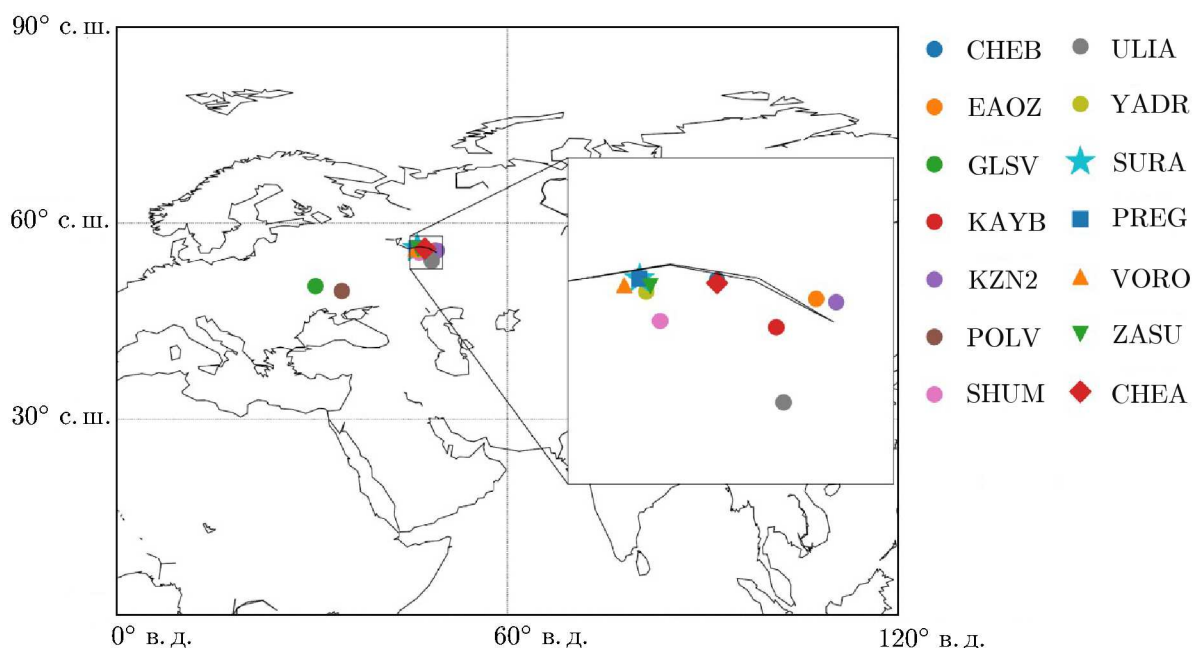


Рис. 1. Геометрия расположения приёмников сигнала GPS

открытым направление в область диаграммы направленности стенда «Сура». Таким образом, в этом случае можно ожидать максимального влияния нагрева на точность позиционирования.

Анализ точности GPS проводился для следующих режимов.

1) Режим PPP. Использовалось двухчастотное динамическое решение. Режим реализуется

в постобработке с привлечением данных о точных эфемеридах, коррекции часов спутников и межчастотных задержек. Для расчётов использовалось программное обеспечение GAMP [51]. Поскольку режим PPP позволяет получать точность порядка десятков сантиметров, то именно при расчёте координат в этом режиме могут проявляться слабые воздействия (например, эффекты солнечных вспышек [45]).

2) Одночастотный режим с использованием итерационного алгоритма решения [52] с ионосферной коррекцией по модели Клобучара [53]. Расчёты осуществлялись с использованием кода C1. В данном режиме реальное состояние ионосферы не может быть учтено, поэтому появление ионосферного возмущения может проявляться в вариациях ошибки измерения координат.

В качестве изучаемой величины рассматривается полная 3D-ошибка σ определения координат

$$\sigma = \sqrt{(\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2 + (\Delta Z)^2},$$

где ΔX , ΔY , ΔZ — ошибки определения координаты по соответствующим осям (X , Y — в горизонтальной плоскости, Z — по вертикали).

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В данном разделе представлены экспериментальные результаты по ошибкам позиционирования в режиме PPP (подраздел 2.1) и одночастотном режиме (подраздел 2.2), а также сбои сопровождения фазы на вспомогательной частоте L2 GPS (подраздел 2.3).

2.1. Ошибки в режиме PPP

На рис. 2 представлена динамика изменения полной 3D-ошибки определения координат в режиме PPP для трёх исследуемых дней. Серыми вертикальными полосами на них отмечены сеансы излучения стенда «Сура». Данные для станций даны в порядке удаления от стенда «Сура»: сверху — самая ближняя, снизу — самая удалённая.

Дополнительно на каждой из панелей приведены индекс AATR [54], представляющий собой среднеквадратичное отклонение производной ПЭС, нормированной на квадрат наклонного фактора, и вариации ПЭС, фильтруемые с окном 10÷20 мин для ближайших к стенду «Сура» станций. Период фильтрации выбран исходя из характерных периодов работы стенда «Сура» (см. табл. 1). Медленное спадание амплитудно-частотной характеристики фильтра скользящего среднего позволяет сохранять в отфильтрованном сигнале компоненты на границах окна фильтрации.

Обрыв данных на рис. 2а для станции ZASU связан с отключением электричества в пункте приёма. Рисунок 2а показывает продолжение снижения ошибки PPP-GPS, начавшегося ранее, для первого длительного импульса для станции ZASU в сеансе 13:00÷15:30 UT 23.08.2010. При этом динамика ошибки не коррелирована с динамикой нагрева, а максимальные выбросы ошибки для ZASU соответствуют паузе в режиме работы. Следует отметить, что в целом уровень ошибок для приёмника ZASU выше, чем для других приёмников. Для промежутка между сеансами нагрева (12:23÷13:00 UT) 3D-ошибка достигает 0,5 м, в то время как для остальных приёмников максимальные значения не достигают 0,25 м. Кроме того, имеется увеличение ошибки для станций VORO для сеанса 13:00÷15:30 UT. При этом динамика ошибки также не коррелирована с работой стенда. Интересен эффект увеличения уровня ошибки на станции KZN2 в районе 16:40 UT на третьем импульсе сеанса 15:40÷20:20 UT. Однако подобное увеличение ошибки не наблюдается на более близких станциях. Особенность изменения ошибки для станции KZN2 в этот

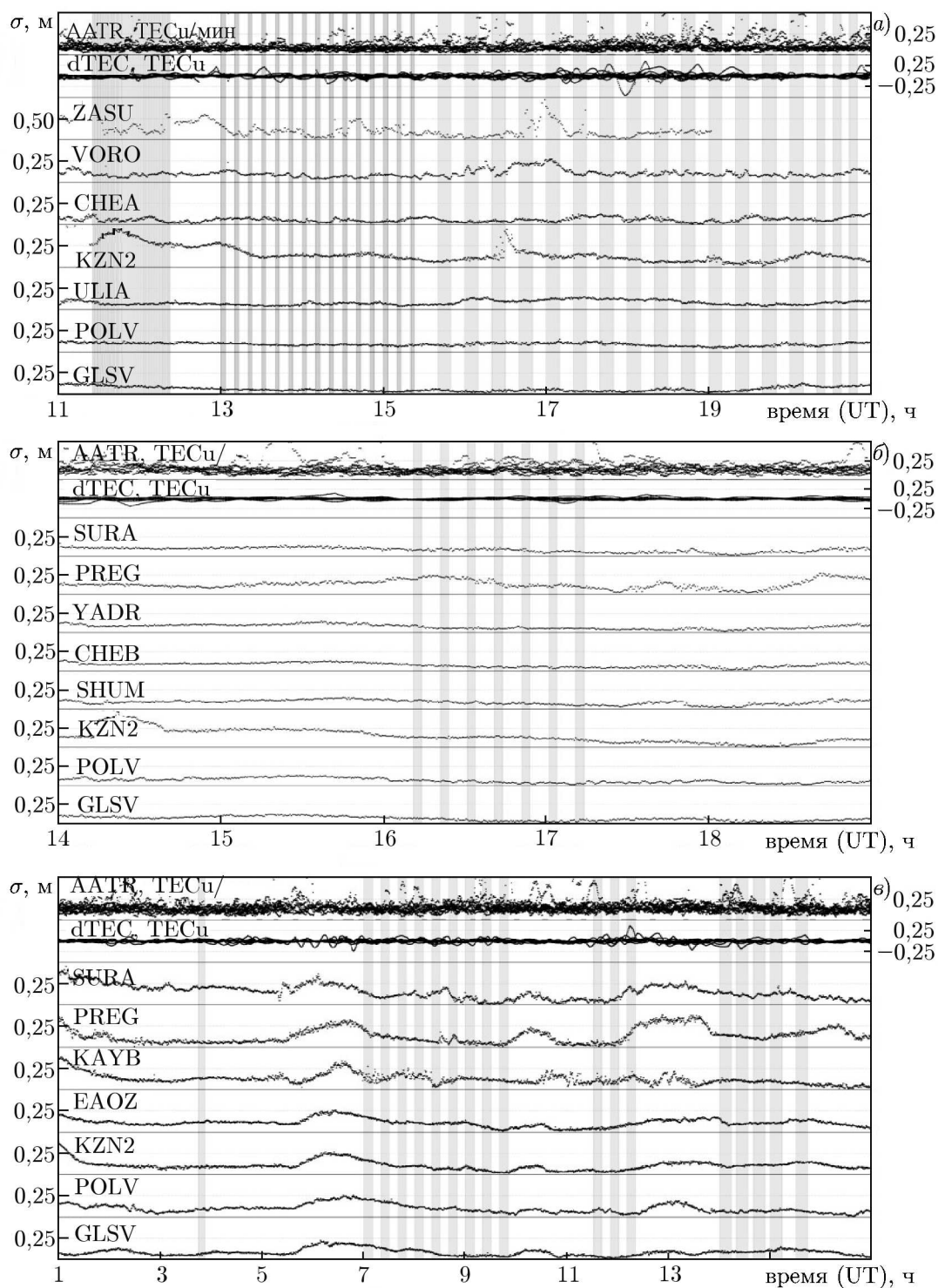


Рис. 2. 3D-ошибка GPS в режиме PPP 23.08.2010 (а), 19.09.2016 (б) и 20.09.2016 (в). Серыми вертикальными полосами указаны периоды нагрева. Наименования приёмников указаны на соответствующих графиках. Дополнительно на каждой из панелей даны индексы AATR и вариации ПЭС в диапазоне периодов 10÷20 мин для ближайших к стенду «Сура» станций (одновременно для всех спутников)

период указывает на проблемы с расчётом PPP. На более близкой к стенду «Сура» станции ZASU на 4-м импульсе возникают резкие увеличения ошибки PPP. Величина ошибки начинает уменьшаться с началом 5-го импульса нагрева. При этом ионосферные эффекты, которые зафиксированы в вариациях ПЭС, наблюдаются и после 17:00 UT и согласуются с периодикой нагрева. В динамике ошибки PPP после 17:00 UT подобных вариаций не регистрируется.

Данные о точности GPS-PPP 19 сентября 2016 года (см. рис. 2б) показывают отсутствие какого-либо воздействия нагрева. Точность GPS-PPP остаётся на практически неизменном уровне. Вариации точности в этот период даже меньше, чем до сеанса нагрева. Кажущаяся большая вариабельность ошибки GPS-PPP 20 сентября 2016 года (см. рис. 2в) относительно 19 сентября связана с большим периодом анализа. Одна из основных причин вариаций величины ошибки в течение дня — смена наблюдаемой группировки спутников с течением времени и изменения точности определения радионавигационных параметров в условиях различной наблюдаемости спутников. Ни для одного из сеансов не регистрируется значимого увеличения ошибки, существенно превышающего её значения для спокойных условий или коррелирующего с режимом нагрева.

В табл. 3 представлены средние значения 3D-ошибки во время сеансов коротковолного излучения и в периоды без нагрева, а также среднеквадратичное отклонение (СКО). Усреднение осуществлялось за весь день. Результаты показывают даже более низкие значения ошибки при выключении нагрева. Следует, однако, отметить, что разность между средней ошибкой при нагреве и без нагрева значительно меньше СКО. Вполне вероятно, что отличие обусловлено разной статистикой.

Таблица 3. Средние значения 3D-ошибки $\langle\sigma\rangle$

станция	$\langle\sigma\rangle \pm \text{СКО}, \text{ м}$ (при излучении стенда)	$\langle\sigma\rangle \pm \text{СКО}, \text{ м}$ (без излучения стенда)
23.08.2010		
ZASU	$0,27 \pm 0,56$	$0,36 \pm 0,70$
VORO	$0,10 \pm 0,05$	$0,11 \pm 0,15$
CHEA	$0,06 \pm 0,02$	$0,11 \pm 0,29$
KZN2	$0,15 \pm 0,10$	$0,14 \pm 0,13$
ULIA	$0,08 \pm 0,03$	$0,10 \pm 0,12$
POLV	$0,09 \pm 0,02$	$0,14 \pm 0,21$
GLSV	$0,06 \pm 0,03$	$0,10 \pm 0,13$
19.08.2016		
SURA	$0,08 \pm 0,02$	$0,10 \pm 0,08$
PREG	$0,13 \pm 0,06$	$0,15 \pm 0,15$
YADR	$0,07 \pm 0,03$	$0,12 \pm 0,12$
CHEB	$0,07 \pm 0,03$	$0,11 \pm 0,09$
SHUM	$0,09 \pm 0,03$	$0,12 \pm 0,10$
KZN2	$0,39 \pm 0,43$	$0,21 \pm 0,29$
POLV	$0,05 \pm 0,02$	$0,09 \pm 0,09$
GLSV	$0,06 \pm 0,03$	$0,08 \pm 0,08$
20.08.2016		
SURA	$0,11 \pm 0,04$	$0,15 \pm 0,10$
PREG	$0,11 \pm 0,04$	$0,15 \pm 0,16$
KAYB	$0,11 \pm 0,03$	$0,15 \pm 0,20$
EA0Z	$0,11 \pm 0,03$	$0,12 \pm 0,12$
KZN2	$0,10 \pm 0,03$	$0,13 \pm 0,17$
POLV	$0,09 \pm 0,04$	$0,12 \pm 0,09$
GLSV	$0,09 \pm 0,04$	$0,08 \pm 0,04$

2.2. Ошибки в одночастотном режиме позиционирования

На рис. 3 представлены вариации 3D-ошибок, рассчитанных в одночастотном режиме для 23.08.2010 (а), 19.08.2016 (б), 20.09.2016 (в). Можно видеть, что в целом ошибки в одночастотном режиме на один-два порядка выше, чем в режиме PPP.

С учётом того, что область нагрева составляет около 70 км, основные эффекты локального нагрева должны наблюдаться на приёмниках ZASU, VORO и, возможно, CHEA (91 км от области нагрева). При достаточно длительном воздействии с периодикой 10÷20 мин 23 августа 2010 года (см. рис. 3а) выделить синхронные увеличения, связанные с воздействием работы стенда «Сура», не представляется возможным. Небольшой волновой пакет с амплитудой около 1 м в вариациях ошибки регистрируется в этот день на станции GLSV (примерно 1200 км от области нагрева). Это возмущение могло бы быть эффектом волн, генерируемых при нагреве, однако такое возмущение

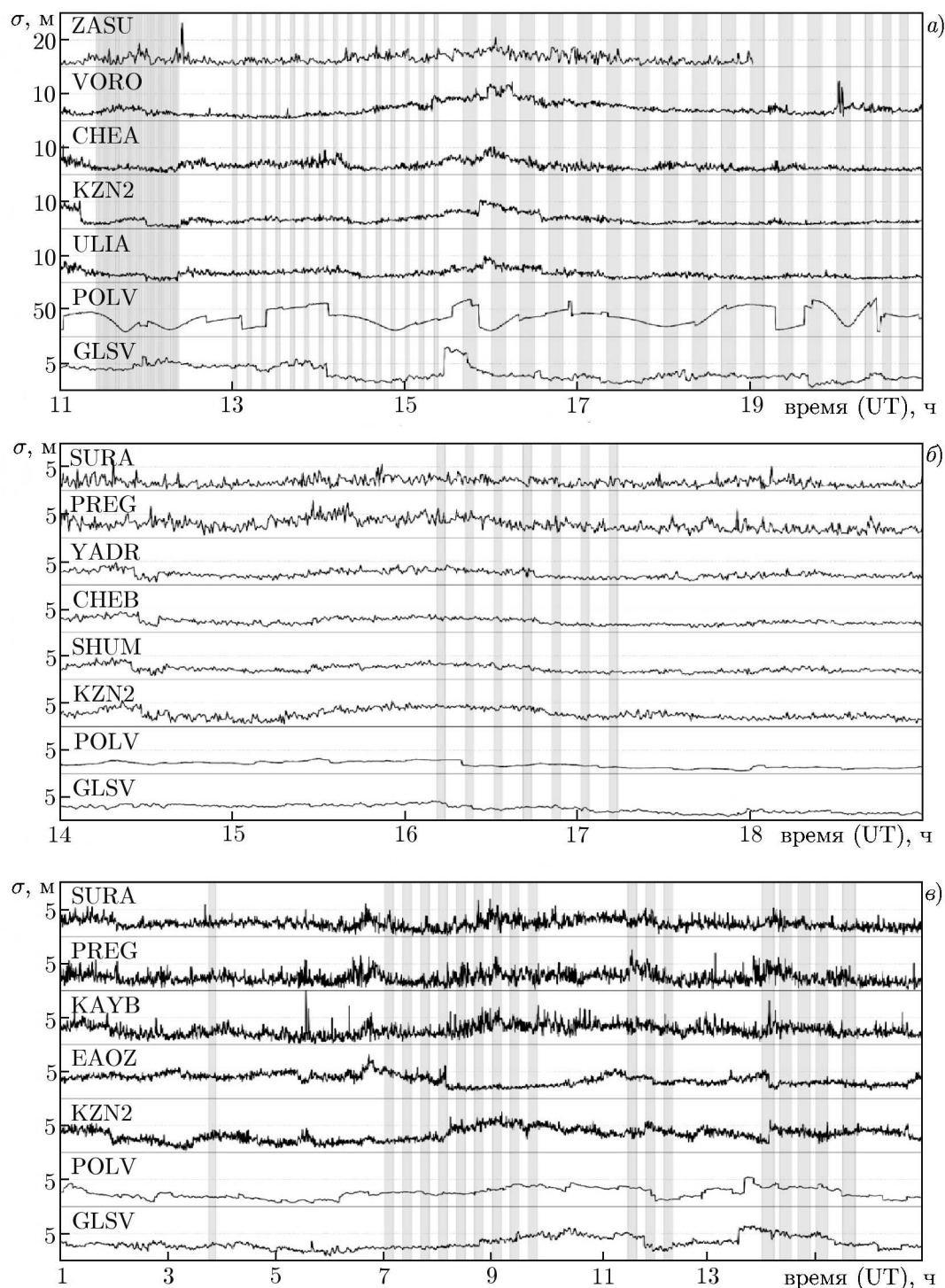


Рис. 3. 3D-ошибка GPS в одночастотном режиме 23.08.2010 (а), 19.09.2016 (б) и 20.09.2016 (в). Серыми вертикальными полосами указаны периоды нагрева. Наименования приёмников указаны на соответствующих графиках

не регистрируется на станциях, расположенных ближе к стенду, где эти эффекты следовало бы ожидать. Других совпадений между вариациями ошибки и сеансами нагрева также не наблюдается. В данном эксперименте на станции ZASU в связи с расположением антенны (видимая

область ограничена, а её большая часть соответствует области нагрева) ожидалось максимальные эффекты влияния нагрева на позиционирование, но даже для этого пункта не наблюдается связи между динамикой величины ошибки и периодами активного воздействия.

В дни 19 и 20 сентября 2016 года (см. рис. 3б, в) обстановка для выделения возможных эффектов нагрева была оптимальная. Собственные шумы измерений координат были существенно меньше, чем в 2010 году. Пятичасовой ряд данных 19 сентября 2016 года ясно показывает, что вариации ошибки для всех станций во время сеанса нагрева не превышают (и даже меньше) аналогичных вариаций до начала нагрева. Следует отметить усиление вариабельности 3D-ошибки в период 15:30÷17:00 UT, которое, по всей видимости, связано с усилением амплитуды естественных ионосферных возмущений, генерируемых солнечным терминатором [55].

В вариациях ошибки в одночастотном режиме 20 сентября (рис. 3в) также не удаётся выделить однозначной связи с активным воздействием. Наблюдается как увеличение ошибки, так и спад для различных станций. Незначительный рост ошибки регистрируется в начале сеанса 11:32÷12:32 UT на станциях SURA и PREG. На станции SURA аналогичный рост продолжается в паузе после первого импульса и сменяется снижением в начале второго импульса. В сеансе 14:01÷14:54 UT в первом импульсе на удалённых от стенда станциях KAYB и KZN2 наблюдается резкое увеличение ошибки. При этом оно отсутствует на близких к стенду станциях, а на станции EAOZ имеет место снижение ошибки.

2.3. Сбои сопровождения фазы навигационного сигнала

На рис. 4 представлены вариации плотности сбоев сопровождения фазы навигационного сигнала на частоте L2 GPS для трёх изучаемых дней. Станции и временные интервалы те же, что и приведённые на рис. 2 и 3. Сбои на вспомогательной частоте L2 являются более чувствительным индикатором в силу более низкой мощности передатчика на второй частоте GPS [7, 46].

По измерениям в 2010 году интересно отметить, что в период 13:00÷17:00 UT на станции СНЕА повышения плотности сбоев совпадали с периодами нагрева. В то же время, большинство периодов включения нагрева не сопровождалось увеличением плотности сбоев сопровождения фазы L2 GPS. Отметим здесь также, что приёмник СНЕА находился на границе области нагрева, что могло приводить к большим градиентам и скоростям изменениям параметров плазмы, а также к более интенсивному возбуждению километровых неоднородностей [25]. На 3D-ошибку эти сбои практически не влияли (см. рис. 2 и 3).

Для приёмника VORO, находившегося существенно ближе к центру области активного воздействия, повышения плотности сбоев сопровождения фазы L2 GPS регистрировались чаще не во время импульсов нагрева, а в промежутке между импульсами (и между сеансами). Приёмник ZASU характеризовался менее стабильными по сравнению с VORO измерениями фазы L2.

Для кампании 2016 года значимой корреляции между увеличениями плотности сбоев фазы L2 GPS и импульсами нагрева не наблюдается. Не наблюдается также возможного запаздывания «импульсов» увеличения плотности сбоев фазы L2 GPS на более удалённых приёмниках, что могло бы иметь место при распространении перемещающегося ионосферного возмущения от источника.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе на основе данных двух измерительных кампаний в 2010 и 2016 годах впервые проведён детальный анализ ошибок позиционирования GPS во время воздействия на ионосферу мощным коротковолновым радиоизлучением стенда «Сура». Анализ данных 14 станций, расположен-

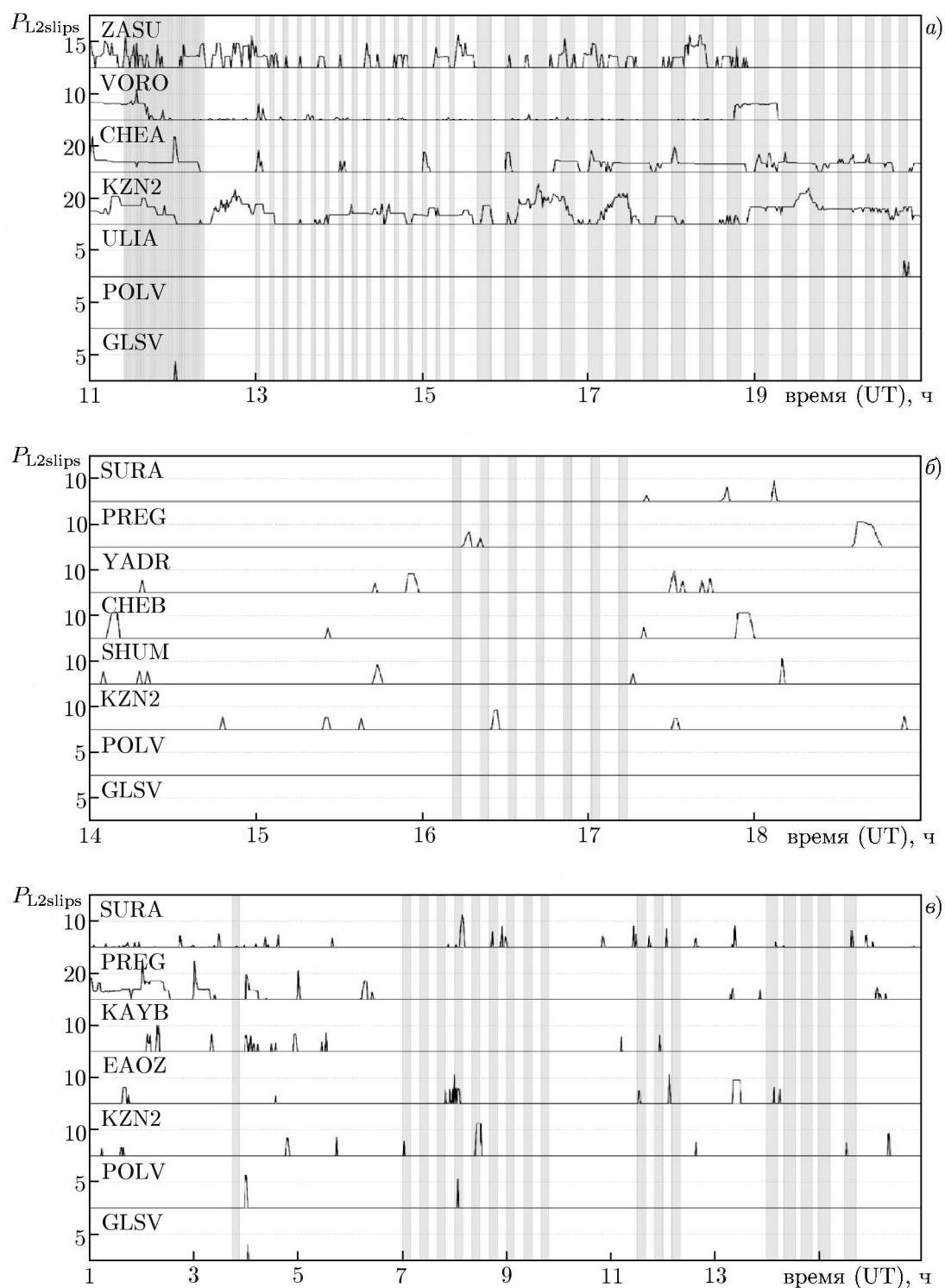


Рис. 4. Вариации плотности сбоев $P_{L2slips}$ сопровождения фазы сигнала на частоте L2 GPS 23.08.2010 (а), 19.09.2016 (б) и 20.09.2016 (в). Серыми вертикальными полосами указаны периоды нагрева. Наименования приёмников приведены на соответствующих графиках

ных непосредственно вблизи стенда и на различном удалении от него, от десятков километров до более тысячи километров, показал отсутствие значимых эффектов коротковолнового нагрева в основных режимах: в режиме позиционирования высокой точности, а также при стандартном итерационном решении навигационной задачи в одночастотном режиме.

Следует сказать, что одной из возможных причин отсутствия значимых эффектов нагрева в навигационном решении является относительно малая область нагрева и низкая амплитуда генерируемых возмущений. В связи с локальностью возмущённой области только малая часть лучей «спутник—приёмник» может пройти через область нагрева. При наблюдении станцией одновременно 8÷12 спутников GPS это приводит к малому статистическому весу возможных ошибок в координатных измерениях и значительному снижению возможной итоговой ошибки. Аналогичное заключение можно сделать и для приёмников, находящихся на значительных удалениях от возмущённой области. Для них возможное влияние искусственных перемещающихся ионосферных возмущений на точность позиционирования оказывается замаскированным естественной изменчивостью среднеширотной ионосферы. Также следует отметить, что прямые рефракционные эффекты, обусловленные ионосферным возмущением, ожидаемо малы: возмущения с амплитудой 0,5 TECU приводят к вариации дальности на луче «спутник—приёмник» с амплитудой около 10 см. Зарегистрировать такие эффекты на фоне стандартных ошибок одночастотного режима порядка нескольких метров достаточно затруднительно. Следует также отметить, что вклад ошибки, возникающей на отдельном луче в результате локального воздействия, снижается при вычислении координат на основе данных со всех лучей, в том числе не проходящих через область нагрева. При этом эффекты воздействия в режиме позиционирования высокой точности GPS могли бы наблюдаться, однако в данных экспериментах это предположение не подтвердилось.

Авторы выражают признательность ООО «Гексагон Геосистемс РУС» (сеть SmartNet) и Казанскому федеральному университету (TatNet) за предоставленные данные ГНСС.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (Фролов В.Л., проект 3.1844.2017/4.6), гранта Президента Российской Федерации МК-3265.2019.5 (А.С. Ясюкевич), РФФИ (Падохин А.М., проект 19-05-00941А), базового финансирования программы ФНИ П.16. Часть измерений выполнена на оборудовании, полученном в рамках Программы развития МГУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Herring T. A. // Proc. IEEE. 1999. V. 87, No. 1. P. 92.
2. Afraimovich E. L., Astafyeva E. I., Demyanov V. V., et al. // J. Space Weather Space Clim. 2013. V. 3. Art. no. A27.
3. Куницын В. Е., Терещенко Е. Д., Андреева Е. С., Нестеров И. А. // Успехи физ. наук. 2010. Т. 180, № 5. С. 548.
4. Bust G. S., Mitchell C. N. // Rev. Geophys. 2008. V. 46, No. 1. Art. no. RG1003.
5. Bevis M., Businger S., Herring T. A., et al. // J. Geophys. Res. 1992. V. 97, No. D14. P. 15 787.
6. Klobuchar J. A., Kunches J. M., Van Dierendonck A. J. // GPS Solutions. 1999. V. 3, No. 2. P. 69.
7. Демьянов В. В., Ясюкевич Ю. В. Механизмы воздействия нерегулярных геофизических факторов на функционирование спутниковых радионавигационных систем. Иркутск: ИГУ, 2014. 349 с.
8. Гуревич А. В. // Успехи физ. наук. 2007. Т. 177, № 11. С. 1 145.
9. Streltsov A. V., Berthelier J. J., Chernyshov A. A., et al. // Space Sci. Rev. 2018. V. 214, 118.
10. Pedersen T. R., Carlson H. C. // Radio Sci. 2001. V. 36, No. 5. P. 1 013.

11. Stubbe P. // J. Atmos. Terr. Phys. 1996. V. 58. No. 1–4. P. 349.
12. Rietveld M. T., Senior A., Markkanen J., et al. // Radio Sci. 2016. V. 51, No. 9. P. 1533.
13. Carlson H. C., Djuth F. T., Zhang L. D. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2017. V. 122, No. 1. P. 978.
14. Беликович В. В., Грач С. М., Караштин А. Н., и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 7. С. 545.
15. Фролов В. Л., Бахметьева Н. В., Беликович В. В., и др. // Успехи физ. наук. 2007. Т. 177, № 3. С. 330.
16. Шлюгер И. С. // Письма в ЖЭТФ. 1974. Т. 19, № 5. С. 247.
17. Виленский И. М. // Докл. АН СССР. 1953. Т. 92. С. 525.
18. Гуревич А. В., Шлюгер И. С. // Изв. вузов. Радиофизика. 1975. Т. 43, № 9. С. 1237.
19. Гетманцев Г. Г., Гульельми А. В., Клайн Б. И. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1977. Т. 20, № 7. С. 1017.
20. Котик Д. С., Трахтенгерц В. Ю. // Письма в ЖЭТФ. 1975. Т. 21, № 2. С. 114.
21. Ерухимов Л. М., Метелёв С. А., Мясников Е. Н. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1987. Т. 30, № 2. С. 208.
22. Leyser T. B. // Space Sci. Rev. 2001. V. 98, No. 3–4. P. 223.
23. Stubbe P., Hagfors T. // Surveys Geophys. 1997. V. 18, No. 1. P. 57.
24. Грач С. М., Сергеев Е. Н., Мишин Е. В. и др. // Успехи физ. наук. 2016. Т. 186, № 11. С. 1189.
25. Фролов В. Л. Искусственная турбулентность среднеширотной ионосферы. Нижний Новгород: Изд.-во ННГУ, 2017. 468 с.
26. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л., Комраков Г. П., Пушин В. Ф. // Изв. вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54, № 2. С. 81.
27. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л. // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 5. С. 307.
28. Kunitsyn V. E., Andreeva E. S., Frolov V. L., et al. // Radio Sci. 2012. V. 47, No. 4. Art. no. RS0L15.
29. Mishin E., Sutton E., Milikh G., et al. // Geophys. Res. Lett. 2012. V. 39, No. 11. Art. no. L11101.
30. Pradipta R., Lee M. C., Cohen J. F., et al. // Earth, Moon, and Planets. 2015. V. 116, No. 1. P. 67.
31. Jakowski N., Sardon E., Engler E., et al. // Ann. Geophys. 1997. V. 14, No. 12. P. 1429.
32. Milikh G., Gurevich A., Zybin K., et al. // Geophys. Res. Lett. 2008. V. 35, No. 22. Art. no. L22102.
33. Kunitsyn V. E., Padokhin A. M., Vasiliev A. E., et al. // Adv. Space Res. 2011. V. 47, No. 10. P. 1743.
34. Фролов В. Л., Комраков Г. П., Куницын В. Е. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 7. С. 421.
35. Nasyrov I. A., Kogogin D. A., Shindin A. V., et al. // Adv. Space Res. 2016. V. 57, No. 4. P. 1015.
36. Grach S. M., Nasyrov I. A., Kogogin D. A., et al. // Geophys. Res. Lett. 2018. V. 45, No. 23. P. 12749.
37. Kunitsyn V. E., Padokhin A. M., Andreeva E. S., et al. // Procs. of. XXXth URSI General Assembly and Scientific Symposium. 13–20 August 2011, Istanbul, Turkey. P. 1.
38. Yeh K. C., Liu C.-H. // Procs. IEEE. 1982. V. 70, No. 4. P. 324.
39. Bernhardt P. A., Siefing C. L., Briczinski S. J., et al. // Radio Sci. 2016. V. 51, No. 7. P. 1081.
40. Tereshchenko E. D., Kozlova M. O., Evstafiev O. V., et al. // Ann. Geophys. 2000. V. 18, No. 9. P. 1197.
41. Tereshchenko E. D., Khudukon B. Z., Gurevich A. V., et al. // Phys. Lett. A. 2004. V. 325, No. 5–6. P. 381.
42. Marques H. A., Marques H. A. S., Aquino M., et al. // J. Space Weather Space Clim. 2018. V. 8. Art. no. A15.
43. Luo X., Gu S., Lou Y., et al. // Sensors. 2018. V. 18, No. 6. P. 1784.
44. Luo X., Lou Y., Xiao Q., et al. // GPS Solutions. 2018. V. 22, No. 2. Art. no. 63.

45. Yasyukevich Y., Astafyeva E., Padokhin A., et al. // Space Weather. 2018. V. 16, No. 8. P. 1013.
46. Захаров В. И., Ясюкевич Ю. В., Титова М. А. // Космич. исслед. 2016. Т. 54, № 1. С. 23.
47. Astafyeva E., Yasyukevich Y., Maksikov A., Zhivetiev I. // Space Weather. 2014. V. 12, No. 7. P. 508.
48. Гуревич А. В., Зыбин К. П., Карлсон Х. С. // Изв. вузов. Радиофизика. 2005. Т. 48, № 9. С. 772.
49. Фролов В. Л., Болотин И. А., Комраков Г. П. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2014. Т. 57, № 6. С. 437.
50. Фролов В. Л., Болотин И. А., Рябов А. О. и др. // Труды конф. РРВ-26. 1–6 июля 2019, Казань, Россия. Т. 2. С. 96.
51. Zhou F., Dong D., Li W., et al. // GPS Solutions. 2018. V. 22, No. 1. Art. no. 23.
52. Антонович К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. М.: Картогеоцентр, 2006. Т. 2. 360 с.
53. Klobuchar J. // IEEE Trans. Aerospace Electron. Systems. 1987. V. AES-23, No. 3. P. 325.
54. Juan J. M., Sanz J., Rovira-Garcia A., et al. // J. Space Weather Space Clim. 2018. V. 8. Art. no. A14.
55. Afraimovich E. L., Edemskiy I. K., Voeykov S. V., et al. // Adv. Space Res. 2009. V. 44, No. 7. P. 824.

Поступила в редакцию 25 октября 2019 г.; принята в печать 16 декабря 2019 г.

GPS POSITIONING ACCURACY IN DIFFERENT MODES WITH ACTIVE FORCING ON THE IONOSPHERE FROM THE SURA HIGH-POWER HF RADIATION

*Yu. V. Yasyukevich, S. V. Syrovatskiy, A. M. Padokhin, V. L. Frolov, A. M. Vesnin, D. A. Zatolokin,
G. A. Kurbatov, R. V. Zagretdinov, A. V. Pershin, and A. S. Yasyukevich*

The global navigation satellite system accuracy and the possibility to actively affect it is quite a relevant problem. Based on two experimental campaigns (2010 and 2016), we analyzed the GPS positioning accuracy with forcing from the Sura high-power HF radiation. Analysis of the positioning error variations for 14 stations at different distances from the heater (directly near the latter and more than a thousand kilometers away from it) showed the absence of significant effects both in the precise point positioning (PPP) mode and in a standard iterative single-frequency positioning mode that is most frequently used.