

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ДИАГНОСТИКЕ СОСТОЯНИЯ ИОНОСФЕРЫ НАД БАЙКОНУРОМ ПО СИГНАЛАМ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ ГЛОНАСС/GPS

А.В.Тертышников

The experimental results on ionosphere sounding above the spaceport 'Yuzhny' according to Global Navigation satellite systems(GNSS), GLONASS/GPS/GALILEO signals are provided. During the experiment, the launching of the space rocket were carried out, which appeared in the variations of the ionosphere and troposphere signal delay of GNSS GLONASS/GPS/GALILEO.

Key words: experiment, navigation receiver, GLONASS, small spacecraft, ionosphere.

Приведены результаты эксперимента по зондированию ионосферы над космодромом «Южный» по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) ГЛОНАСС/GPS/Galileo. В период эксперимента проводились запуски ракет, проявившиеся в вариациях ионосферных и тропосферных задержек сигналов ГНСС ГЛОНАСС/GPS/Galileo.

Ключевые слова: эксперимент, навигационный приемник, ГЛОНАСС, КА, ионосфера, архив, experiment navigation receiver, GLONASS, small spacecraft, ionosphere, SBAS.

Введение

В системе мониторинга геофизической обстановки над территорией Российской Федерации активно используются сигналы ГНСС ГЛОНАСС/GPS/Galileo, геостационарных КА, космических ионозондов, обновленная технологическая база сети наземных ионозондов. Многочастотные навигационные приемники устанавливаются на каждой второй реперной метеостанции наблюдательной сети Росгидромета, что позволит достигнуть к 2015 г. европейской плотности навигационных приемников-станций, зарегистрированных в IGS.

Получаемая с помощью навигационных приемников информация о состоянии ионосферы в оперативном режиме обрабатывается в информационно-аналитическом центре Института прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова (ФГБУ «ИПГ»). С использованием принятых создается ряд информационных продуктов: карты ионосферной задержки и полного электронного содержания в ионосфере, вертикальные разрезы ионосферы, карты тропосферной задержки сигналов ГНСС ГЛОНАСС/GPS/Galileo, карты геодвижений и др. Значительные потоки информации определили необходимость формирования в ФГБУ «ИПГ» соответствующих архивов гелиогеофизических данных.

Формирование раздела архива магнитоионосферной службы Росгидромета с данными о характеристиках сигналов ГНСС началось с данных сети навигационных приемников ООО «НАВГЕОКОМ». К участию в проекте формирования архива были приглашены: Геофизическая служба РАН (www.gps.gsras.ru), системы дифференциальной коррекции и мониторинга (СДКМ) ГНСС ГЛОНАСС (www.cdkm.ru), ведомственные сети

навигационных приемников ОАО РЖД, Роскосмоса, ОАО «НПК "РЕКОД"», Роскартографии, образовательные и исследовательские учреждения. Реализуется проект по оснащению и использованию многочастотных навигационных приемников морских и речных судов, получению данных с навигационных приемников на российских космодромах.

Формируемая в Росгидромете национальная сеть навигационных приемников для геофизического мониторинга с участием ведомственных сетей навигационных приемников требует разработки технологий наполнения архивов с данными геофизического мониторинга.

Схема эксперимента

В 2010 г. для отработки вопросов формирования архива и национальной сети навигационных приемников для геофизического мониторинга специалистами ФБГУ «ИПГ», НТЦ «Космонит», Западного отделения ИЗМИРАН, отдела астрономо-геодезического обеспечения метеорологического комплекса филиала Центра эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры (ФГУП «ЦЭНКИ») Роскосмоса космического центра «Южный» был организован специальный эксперимент. Исследовалась возможность использования удаленного навигационного приемника на космодроме «Южный» для информационного обеспечения формируемой сети навигационных приемников системы геофизического мониторинга (рис. 1).



Рис. 1 Схема эксперимента по зондированию ионосферы над Байконуром.

В ходе эксперимента предполагалось исследовать технические и геофизические вопросы. К техническим вопросам относились: анализ возможностей штатного навигационного приемника космодрома, прием и дешифрирование характеристик сигналов ГНСС ГЛОНАСС/GPS, расчет ионосферных и тропосферных задержек сигналов ГНСС, вопросы хранения и передачи информации, отработка технологий формирования раздела национального архива с данными мониторинга ионосферы.

При решении геофизических задач и диагностике эффектов в ионосфере после запуска ракет-носителей предполагалось некоторое сходство с эффектами в ионосфере от мощных промышленных взрывов. После запуска ракета с формируемыми в атмосфере конусами Маха начинает уходить на восток-северо-восток и находится под F2-слоем ионосферы. Даже через 10 минут после старта и на удалении около 1800 км от точки

запуска (после отделения ускорителя 3 ступени) разгонный блок достигает высоты только 150-155 км и скорости $\sim 7,2$ км/с. Поэтому при диагностике эффектов запуска в ионосфере можно ограничиться временным отрезком в десятки минут и диагностикой волновых возмущений ионосферы.

Для оценивания среднемесячных полуденных оценок полного электронного содержания в атмосфере (ПЭС с единицей TECU= 10^{16} электронов на m^2) использовалась эмпирическая модель ионосферы IRI-2007, в которой предусмотрены возможности учета возмущенного состояния ионосферы, а также коррекции по данным текущей диагностики. Можно использовать и другие адаптируемые модели.

Для восстановления ПЭС над приемником на космодроме «Южный» (условное обозначение ВАИК) использовалась локальная модель для суточной вариации в виде разложения по суточным гармоникам [1, 2]. Рассчитывались задержки в аппаратуре приемника и всех спутников ГНСС ГЛОНАСС и GPS, что обеспечило получение информации об абсолютной величине ионосферной задержки. Восстанавливалась изменение ПЭС ионосферы над космодромом по всем пролетам в течение суток.

Результаты зондирования ионосферы

На рис. 2 показан сетевой график пролетов навигационных КА с указанием их длительности. По вертикальной оси отложены порядковые номера спутников, на горизонтальной – время UT. – В любой момент времени в зоне радиовидимости над станцией находится 8-10 спутников навигационных КА ГНСС GPS.

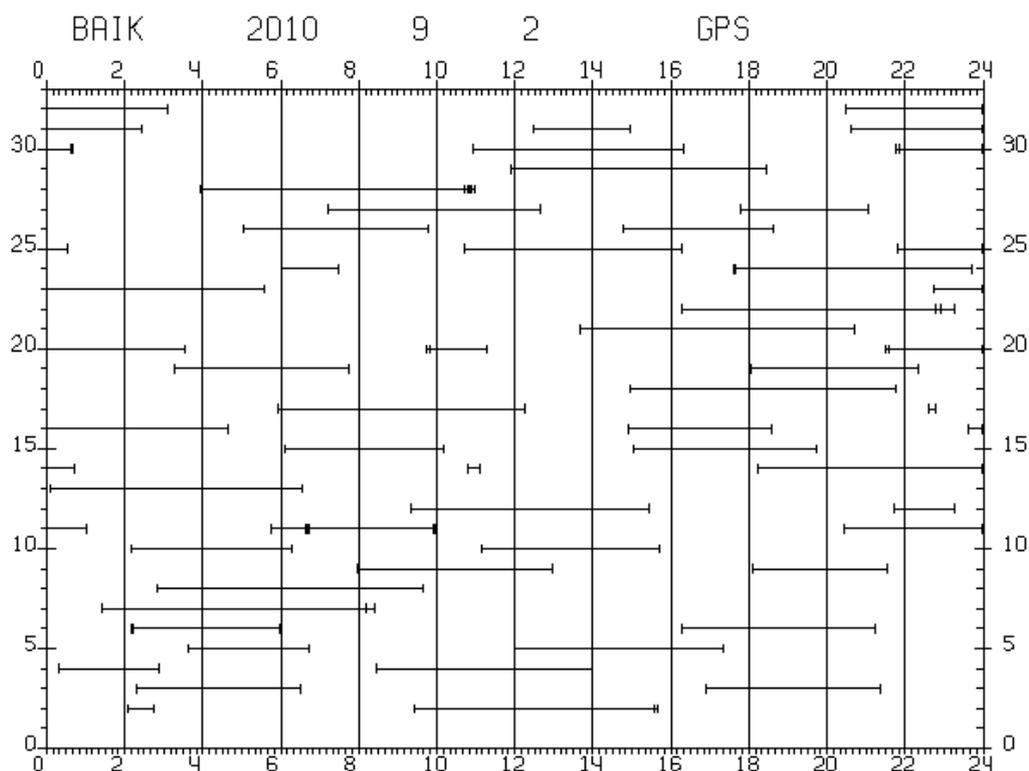


Рис. 2 Сетевой график пролетов КА GPS над станцией ВАИК 2.09.2010 г.

На рис. 3 в качестве примера представлены рассчитанные проекции на географическую сетку координат подионосферных точек КА ГЛОНАСС и GPS, наблюдаемых в зоне радиовидимости над станцией ВАИК в течение суток с запуском ракеты 2.09.2010 г.

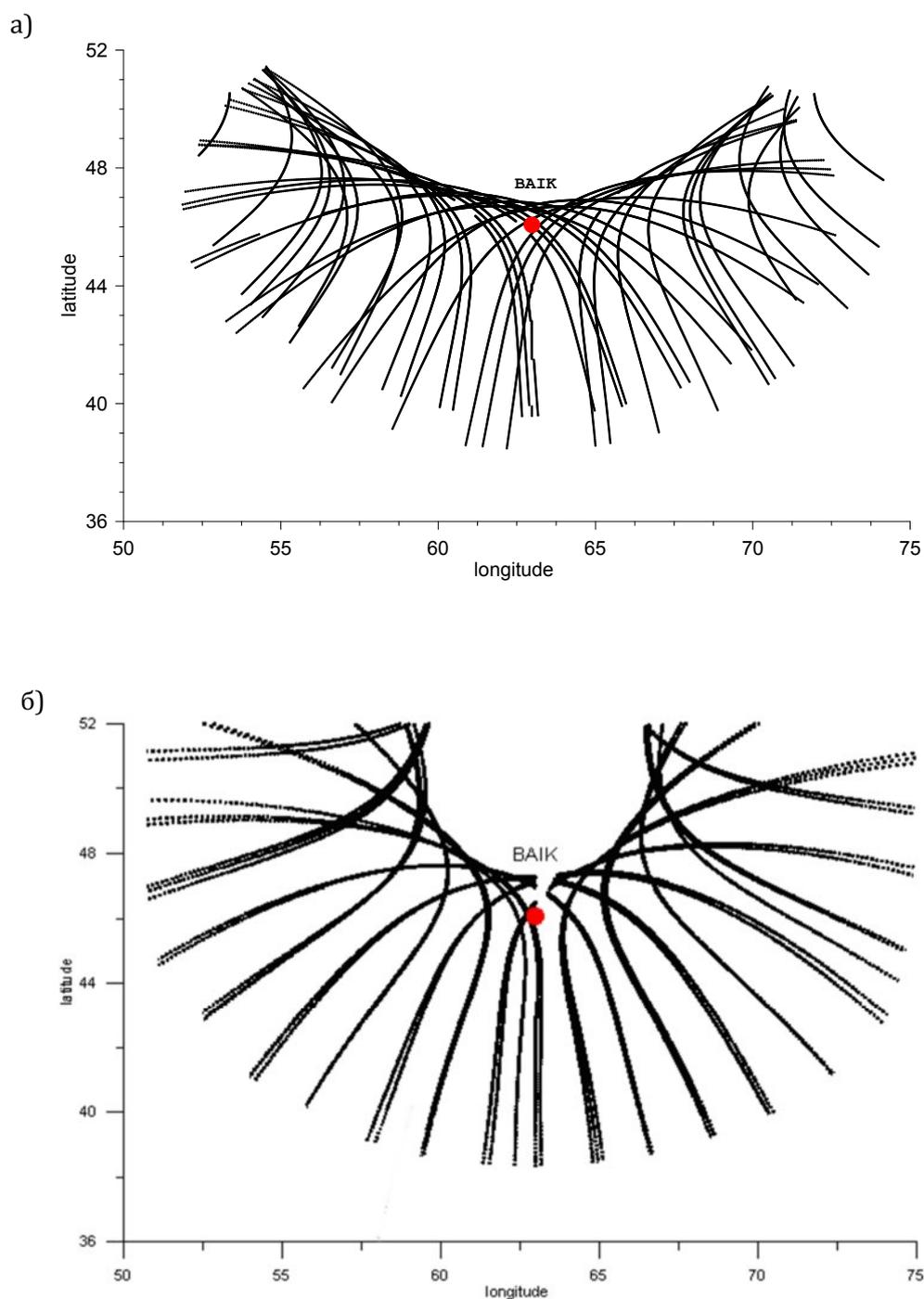


Рис. 3 Географические проекции на высоту 400 км траекторий пролетов КА и GPS (а) и ГЛОНАСС (б) над станцией ВАИК за 2.09.2010 г.

На рис. 4 представлены суточные вариации ПЭС, рассчитанные по данным навигационного приемника космодрома «Южный» для 1-3 сентября 2010 г.

По данным о Dst-индексе увеличение магнитной возмущенности 2.09.2010 г. не подтверждается. Повышенное ПЭС благоприятствует диагностике эффектов запуска ракет в ночной ионосфере.

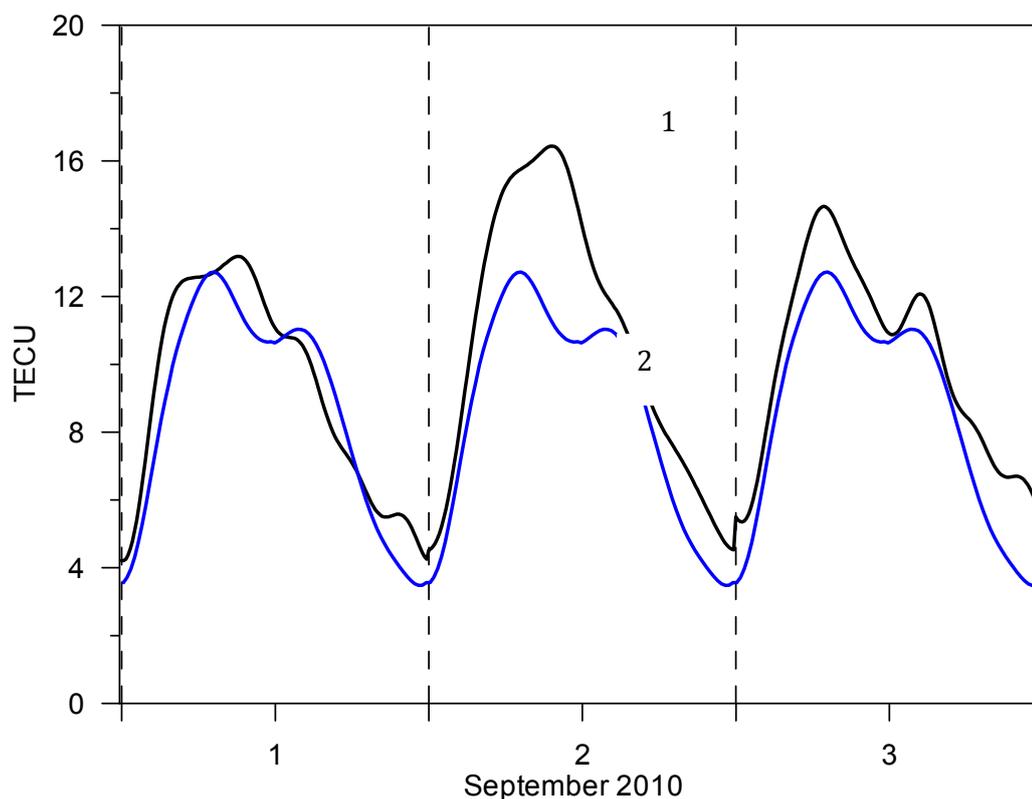


Рис. 4. Суточные вариации вертикального ПЭС 1-3.09.2010 г. (1) над Байконуром и расчеты по модели IRI-2007 (2)

Обсуждение полученных результатов

Вариации ПЭС обуславливают ионосферные задержки сигналов ГНСС ГЛОНАСС/GPS и ошибки позиционирования. Анализ ионосферных задержек показал, что использование навигационного приемника на космодроме «Южный» обеспечивает высокую эффективность мониторинга ионосферы в радиусе 1000 км относительно местоположения приемника.

В ходе эксперимента исследовались вариации позиционирования приемника после запусков и возмущения ионосферы над космодромом, которые могли быть обусловлены запусками ракет. Выявленные изменения в географической привязке приемника не превышали установленных допусков.

Различными методами зондирования установлено [2], что первый пакет внутренних гравитационных волн в атмосфере (ВГВ) генерируется факелом ракеты и распространяется практически нормально к поверхности конуса Маха со скоростью 0,45-0,55 км/с. Пакет включает короткий цуг из 2-3 полуволн с периодами 20-30 минут и фиксируется на расстояниях более 1000 км от активного участка траектории движения ракеты. Второй пакет ВГВ с меньшей амплитудой проявляется через несколько десятков минут после первого. Возможность регистрации ВГВ зависит от циркуляции атмосферы.

Для обнаружения ионосферных эффектов, связанных с запусками ракет, были проанализированы вариации ПЭС вдоль отдельных пролетов навигационных КА. Поскольку амплитуда предполагаемых эффектов мала, для их диагностики использовались относительные изменения ПЭС на одноминутном интервале – общепринятый параметр ROT (rate of TEC). Данный параметр позволяет исследовать флуктуации ПЭС, обусловленные ионосферными неоднородностями различных масштабов.

На рис. 5-6 представлены флуктуации ПЭС для 20 и 31 КА GPS, пролеты которых соответствовали времени запуска 2 сентября 2010 в 0h 53' 50" UT.

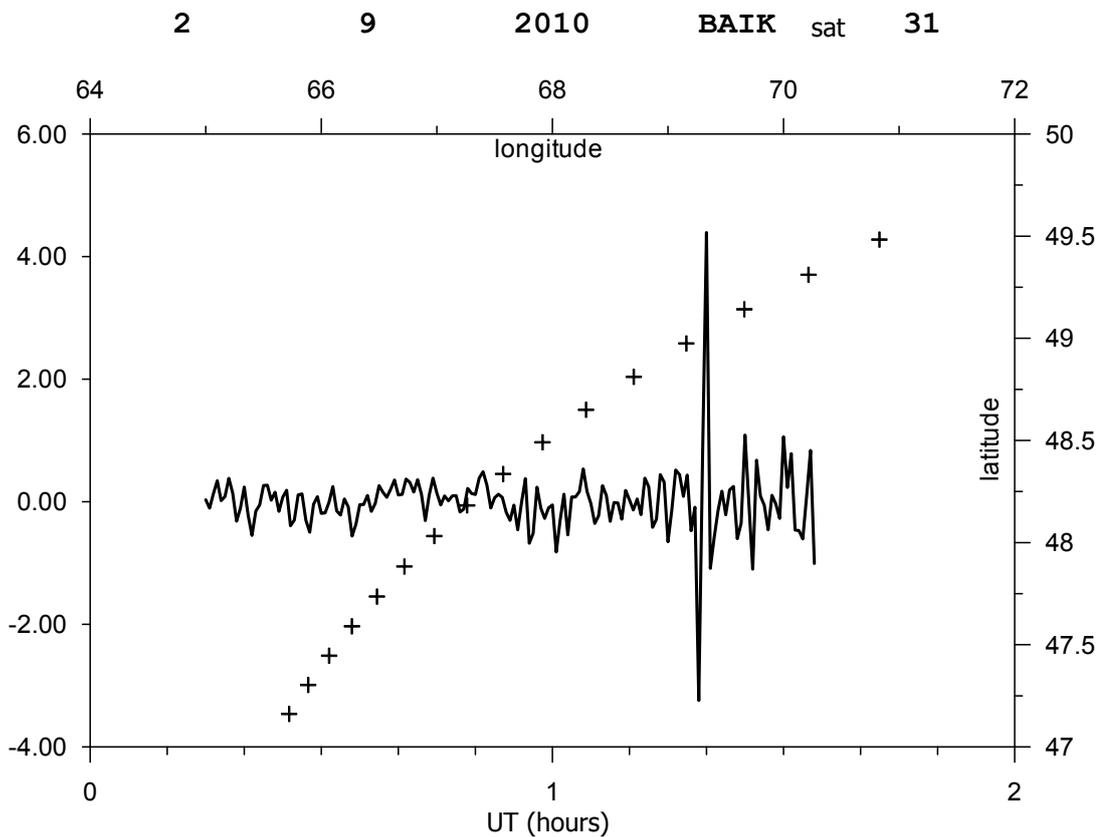


Рис. 5 Изменение ПЭС для 31 КА GPS над станцией ВАИК 2.09.2010 г.

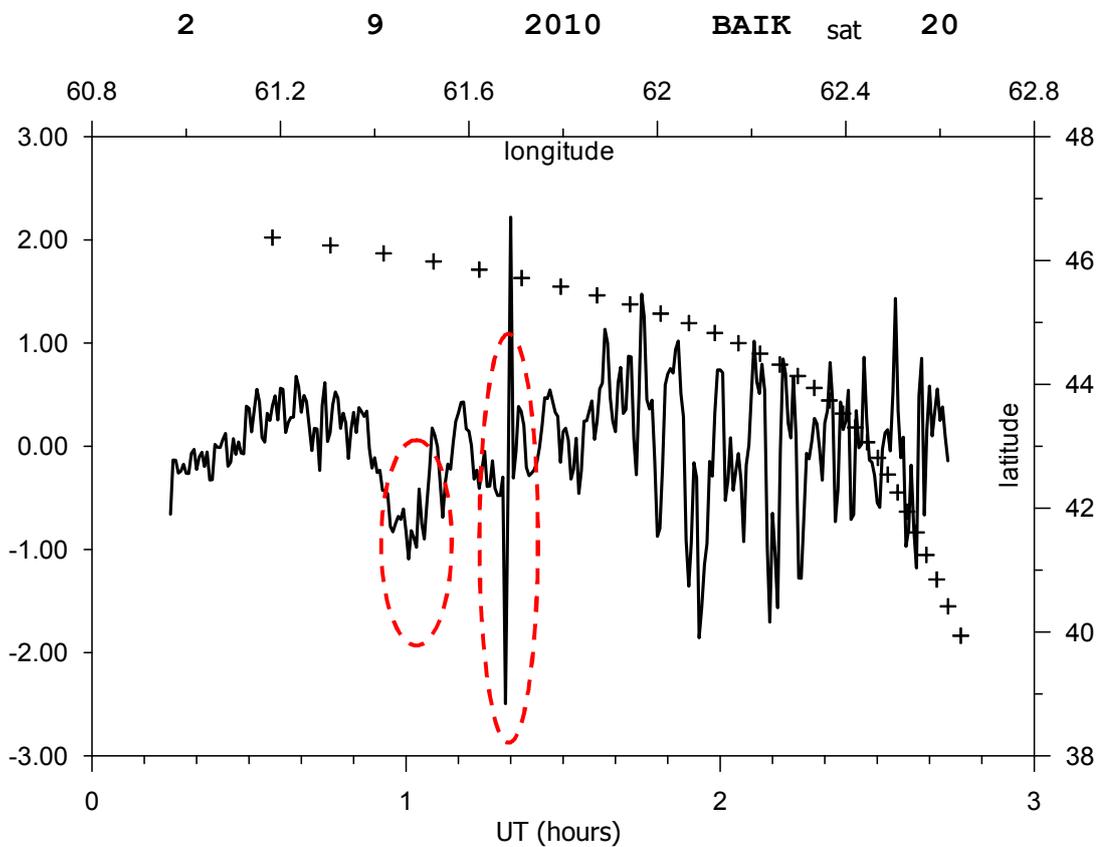


Рис. 6 Изменение ПЭС для 20 КА GPS над станцией ВАИК 2.09.2010 г.

Моменту в 1h 19' соответствует характерный всплеск в скорости изменения ПЭС,

который может быть ассоциирован с ионосферным эффектом запуска ракеты. Данный эффект регистрировался одновременно на пролетах различных спутников.

Выброс в 1h 20' проявился также по сигналам 23, 13, 7 КА GPS. Для 13 КА всплеск был положительным, что связано, скорее всего, с автоматической коррекцией времени.

Момент отделения ускорителя 2 ступени ракеты-носителя происходит, примерно, через 5,5 минут после запуска на высоте около 120 км. Указанное время соответствует задержке отклика ионосферы на промышленные взрывы и, возможно, на запуск. Вариации анализируемого параметра, связанные с этими эффектами, проявились через 5-7 минут для сигналов 20 КА GPS (с северо-запада).

На станции ARTU по сигналам КА GPS № 32 также были выявлены значительные изменения диагностируемых параметров относительно момента запуска. По сигналам с приближающегося с юго-востока КА GPS № 16 проявился второй всплеск, а по сигналам удаляющихся на юго-восток от космодрома КА GPS №№ 31 и 32 этот эффект был слабым и на несколько минут позже. На станции KIT3 и TASH существенные возмущения ионосферы проявились примерно через час после запуска.

В целом следует признать локальность проявления эффекта запуска в ионосфере, как и по результатам исследований экологических проблем и рисков воздействия ракетно-космической техники на окружающую природную среду в [2–4]. Не при всех анализируемых запусках в 2010 г. фиксировались возмущения ионосферы. Это обусловлено тем, что атмосфера интенсивно фильтрует проникновение вверх акустико-гравитационных волн, генерируемых ракетой. Перемещающиеся возмущения ионосферы с периодом около 20 минут, фиксируемые после запусков, могут быть обусловлены естественными процессами и повышенной магнитной возмущенностью [1, 4].

Заключение

В ходе эксперимента с навигационным приемником на космическом центре «Южный» удалось решить ряд вопросов по формированию национальной системы навигационных приемников для геофизического мониторинга и информационного обеспечения архивов магнитоионосферной службы Росгидромета. Проведен удаленный (Байконур-Москва, Москва-Калининград-Москва) прием и оперативное дешифрирование характеристик сигналов ГНСС ГЛОНАСС/GPS, расчет ионосферных задержек сигналов ГНСС, организована оперативная передача и обработка информации в установленном формате. Разработаны предложения по формированию архива постоянных наблюдений сигналов ГНСС ГЛОНАСС/GPS, необходимому программному обеспечению, созданию региональной модели ионосферы, восстановлению вертикальных профилей заряженных частиц в атмосфере.

С помощью навигационного приемника на космодроме «Южный» обнаружены эффекты запусков ракет в электронном содержании ионосферы. Разгонные блоки, удаляющиеся на восток по наклонной параболической траектории, инициировали возникновение перемещающихся ионосферных возмущений, но не вносили существенных погрешностей в характеристики принимаемых сигналов ГНСС ГЛОНАСС/GPS.

В ходе эксперимента был определен перечень минимально необходимых мероприятий к регламенту функционирования станции-приемника сигналов ГНСС ГЛОНАСС/GPS в системе мониторинга геофизической обстановки. Разработаны предложения по информационному взаимодействию, технологии передачи информации, конвертации RINEX-файлов.

Литература

1. *Тертышников А.В., Большаков В.О.* Технология мониторинга ионосферы с помощью приемника сигналов навигационных КА GPS/ГЛОНАСС (Galileo) // *Информация и космос*, 2010, № 1. С.100-105.
2. Экологические проблемы и риски воздействия ракетно-космической техники на окружающую природную среду. Справочное пособие./Под общей редакцией В.В. Адушкина, С.И. Козлова, А.В. Петрова. – М.: Изд-во «Анкил». 2000. 640 с.
3. *Тертышников А.В., Гутенев В.В.* и др. Экология. Военная экология – М.-Смоленск: Маджента, издательский дом КАМЕРОН, 2006. 728 с.
4. *Черногор Л.Ф.* Радиофизические и геомагнитные эффекты стартов ракет. – Харьков:ХНУ им. В.Н. Каразина, 2009. 386 с.