

по развертываемой в Сибирском регионе сети приемников навигационных сигналов космических систем ГЛОНАСС и GPS.

Приведены некоторые результаты по детектированию отклика ионосферы на прохождение солнечного терминатора и землетрясения различной интенсивности.

Ключевые слова: Ионосфера, ионосферные неоднородности, глобальные навигационные спутниковые системы, полное электронное содержание.

STUDY OF THE NEAR-EARTH ENVIRONMENT WITH THE GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM

Yu. V. Yasyukevich^{1,2}, N. P. Perevalova¹, V. V. Demyanov³,
I. K. Edemskiy¹, A. A. Markidonova^{1,2}

¹Institute of Solar-Terrestrial Physics of the SB RAS
126a Lermontov str., Irkutsk, 664033, Russia. P. Box 291. E-mail: yasukevich@iszf.irk.ru

²Irkutsk State University

1 Karl Marks str., Irkutsk, 664003, Russia.

³Irkutsk State University of Railroads of the Federal Agency for Rail Transportation
15 Chernyshevskij str., Irkutsk, 664074, Russia

We discuss the technique of study of the Near-Earth environment with Global Navigation Satellite System data by means of the total electron content and navigation satellites phase slips metering.

We analyze global electron content data as well as the near-Earth disturbances influence on positioning with the use of Global Navigation Satellite Systems and present the details of the Siberian GPS/GLONASS receivers network implementation.

Results of detection of ionosphere response to solar terminator and different intensity of earthquakes are shown as well.

Keywords: ionosphere, ionosphere irregularities, global navigation satellite system, total electron content.

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) были разработаны для определения точных координат и составляющих вектора скорости приемника, посредством регистрации сигналов навигационных искусственных спутников Земли (НИСЗ) в глобальной рабочей зоне [1]. В процессе эксплуатации оказалось, что возможности использования ГНСС GPS и ГЛОНАСС значительно шире тех, для которых они были непосредственно разработаны. Так, регулярные синхронные измерения кодовой псевдозадержки и фазы несущей в двух частотных диапазонах L1 и L2, которые проводились на всемирной сети навигационных приемников, позволили за последние годы получить больш-

шее количество новых данных о динамике ионосферной плазмы.

Серьезные перспективы в этом направлении открываются за счет развертывание большого количества плотных региональных сетей. На рис. 1, а точками отмечено расположение станций всемирной сети IGS. В настоящее время существует две полностью развернутых ГНСС: Российская глобальная навигационная система ГЛОНАСС и Американская система глобального позиционирования GPS. Разворачиваются еще две глобальные навигационные системы: китайская система COMPASS и европейская GALILEO. Предполагается, что вновь вводимые системы начнут действовать в глобальной рабочей зоне в 2020 г.

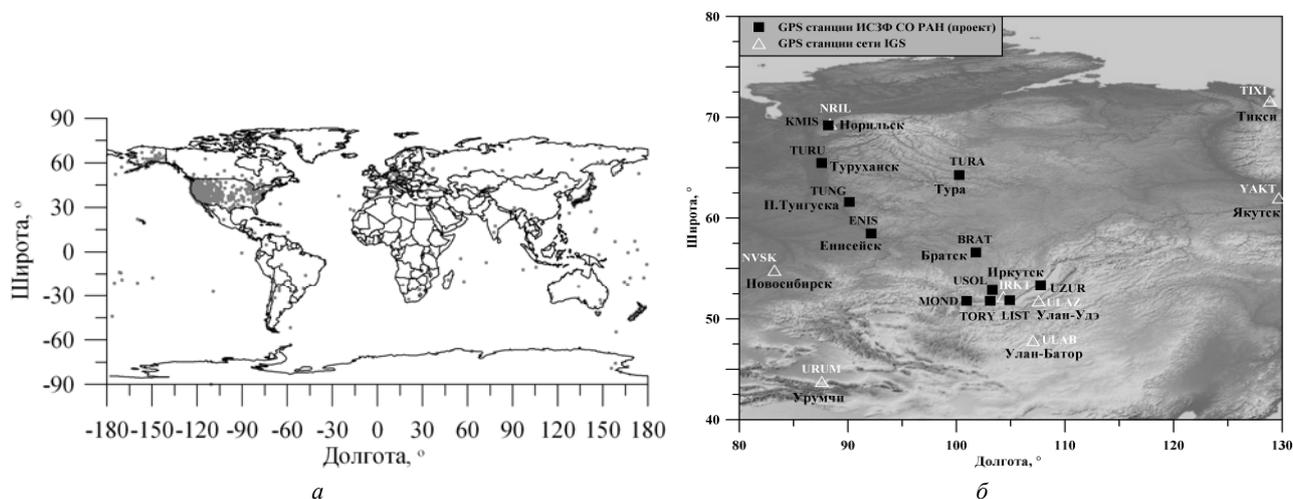


Рис. 1. Глобальная сеть IGS (а), а также сеть приемников, развертываемых в Сибирском регионе (б)

На сегодняшний день навигационные системы позволяют получать ряд параметров, важных для задач диагностики состояния ионосферы и околоземного космического пространства (ОКП): 1) абсолютное полное электронное содержание (ПЭС) вдоль луча «спутник-приемник» и его вариации; 2) глобальное (региональное) электронное содержание, равное полному числу электронов в ионосфере (либо над заданной областью); 3) плотность сбоев навигационно-временных определений, 4) интенсивность мерцаний навигационного сигнала, измеряемая специализированными приемниками.

Первые работы по использованию ГНСС для анализа состояния ионосферы были начаты в 1994 г. [2]. В ИСЗФ СО РАН (г. Иркутск) ионосферные исследования с помощью глобальных навигационных систем начались в 1997 г. под руководством проф. Э. Л. Афраймовича [3]. За период с 1997 г. в ИСЗФ СО РАН получено достаточно большое число значимых результатов по детектированию отклика ионосферы на естественные возмущения (магнитные бури, солнечные затмения, солнечный терминатор, солнечные вспышки, тропические циклоны) и антропогенные воздействия (промышленные взрывы, запуски космических аппаратов) (см. обзор [4]). Существенная часть работ отражена в монографии [5]. Настоящая статья посвящена обзору основных результатов, полученных в 2011–2012 гг. исследовательской группой ИСЗФ СО РАН.

Размещение комбинированных приемников GPS и ГЛОНАСС на территории Сибири. К настоящему моменту на территории РФ в непрерывном режиме функционирует около 50 стационарных станций, входящих в состав трех сетей: международная сеть IGS (11 станций, <http://sopac.ucsd.edu>), сеть НАВГЕОКОМ (32 станции, <http://www.navgeocom.ru>), камчатская сеть KAMNET (11 станций, <http://www.emsd.ru/geodin/regkamnet>). Кроме того, на полигонах ряда институтов и ВУЗов РФ функционируют отдельные приемники GPS, работающие, как правило, в эпизодическом режиме. В Сибири, площадь которой составляет около половины территории России, действует всего шесть станции сети IGS (рис. 1, б). Этого не достаточно для проведения регулярных исследований состояния ОКП.

В продолжение работ, начатых Э. Л. Афраймовичем, в настоящее время в ИСЗФ СО РАН разработан план и начато развертывание региональной сети наземных двухчастотных приемников GPS/ГЛОНАСС (рис. 1, б, квадраты). Размещение приемников в Сибирском регионе будет производиться с учетом использования сети для исследования неоднородностей различных масштабов. Кроме того, предусматривается возможность использования полученных данных для геодинимических исследований, что существенно повысит эффективность сети и позволит проводить изучение литосферно-ионосферных взаимодействий. В составе региональной сети ИСЗФ СО РАН будет две подсети: первая – станции, размещаемые в При-

байкалье; вторая – высокоширотная сеть станций GPS/ГЛОНАСС, размещаемая вдоль р. Енисей.

Для изучения динамики среднemasштабных ионосферных возмущений с характерным размером около 250 км организуется малый измерительный треугольник в Прибайкалье TORU (п. Торы) – USOL (г. Усолье-Сибирское) – LIST (п. Листвянка). Расстояние между пунктами малого треугольника составляет около 120 км. Для изучения динамики крупномасштабных ионосферных возмущений с характерным размером ~1000 км организуется большой измерительный треугольник: MOND (п. Монды) – BRAT (г. Братск) – UZUR (п. Узур). Расстояние между пунктами большого треугольника составляет около 500 км.

Отдельно для исследований особенности высокоширотной ионосферы, планируется организовать меридиональную цепочку станций GPS/ГЛОНАСС вдоль р. Енисей. Предполагается разместить приемники GPS/ГЛОНАСС в г. Норильск (пункт KMIS), п. Туруханск (пункт TURU), п. Подкаменная Тунгуска (пункт TUNG), г. Енисейск (пункт ENIS). Среднее расстояние между пунктами составляет ~500 км. Меридиональная цепочка станций позволит исследовать движение крупномасштабных ионосферных возмущений в меридиональном направлении в приполярных широтах. Кроме того, рассматривается возможность размещения приемника GPS/ГЛОНАСС в п. Тура (пункт TURA). Это позволило бы организовать измерительные треугольники TURU–TUNG–TURA; TUNG–TURA–ENIS для определения полного вектора горизонтальной скорости крупномасштабных возмущений. Расстояние между приемными пунктами в измерительных треугольниках составит ~600 км.

К настоящему времени установлены и функционируют в режиме непрерывных измерений приемники GPS/ГЛОНАСС в пунктах TORU, USOL, LIST, составляющие малый измерительный треугольник.

К методике определения абсолютного полного электронного содержания. Данные кодовых и фазовых измерений псевдодальностей геодезических приемников СРНС GPS и ГЛОНАСС как правило представлены в виде стандартных RINEX-файлов. Методика восстановления наклонного ПЭС по данным двухчастотных приёмников GPS в достаточной степени разработана и описана в ряде источников [5]. ПЭС вдоль луча зрения из точки приёма на навигационный ИСЗ определяется по кодовым и фазовым измерениям, соответственно, как:

$$I = \frac{1}{40.308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(P_2 - P_1) + nP + \delta P]; \quad (1)$$

$$I = \frac{1}{40.308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2) + K + nL], \quad (2)$$

где f_1, f_2 – рабочие частоты СРНС; P_1, P_2 – псевдодальность, измеренная по кодовой псевдозадержке – групповой путь волны, м; $L_1 \lambda_1, L_2 \lambda_2$ – фазовый путь, м; K – параметр неоднозначности фазовых измерений; nP, nL – погрешности определения группового и фа-

зового пути, δP – систематическая погрешность, образованная за счет временной рассинхронизации измерительных каналов в спутнике и приемнике на двух частотах.

Ошибка определения ПЭС nP по формуле (1) может достигать 30–50 % (а в отдельных случаях ~100 %) [6]. В то же время ошибка определения вариаций ПЭС nL по формуле (2) составляет менее 0,1 % по отношению к фоновой концентрации, однако при этом абсолютное значение ПЭС остается неизвестным и требуется разрешение фазовой неоднозначности.

Существует множество алгоритмов восстановления абсолютного значения наклонного ПЭС при фазовых измерениях. Один из алгоритмов – грубое разрешение неоднозначности фазовых измерений за счет их выравнивания по тренду кодовых измерений на длительном ряду непрерывных наблюдений. Предполагая, что $\delta P = 0$, получаем для неоднозначности фазы следующие выражение:

$$K = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ((L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2) - (P_2 - P_1))_i. \quad (3)$$

Точность разрешения фазовой неоднозначности с использованием данного подхода зависит от продолжительности временного интервала регистрации измерений: с увеличением числа независимых измерений N соотношение сигнал/шум повышается в \sqrt{N} раз. Экспериментально нами установлено, что минимальная продолжительность ряда измерений для получения необходимой точности измерений составляет 20 мин.

Систематическая ошибка связанная с рассинхронизацией каналов L1 и L2 навигационного спутника и приемника, известная в англоязычной литературе как дифференциальные кодовые задержки (Differential code bias, DCB), приводит к значительной ошибке определения абсолютного значения ПЭС. На рис. 2, а приведен пример, показывающий, что игнорирование

данной погрешности в процессе определения абсолютного значения ПЭС может приводить к появлению отрицательных значений ПЭС, что физически бессмысленно. Для ГЛОНАСС ошибка определения ПЭС I_{BIAS} , обусловленная дифференциальными кодовыми задержками, может достигать 50 TECU (1 TECU = 10^{16} м⁻²) в аппаратуре приемника и 70 TECU в аппаратуре спутника; для GPS соответствующие значения достигают величин 60 TECU и 30 TECU.

На рис. 2, б представлены ошибки определения ПЭС, связанные с рассинхронизацией частотных каналов для спутников GPS PRN03 и ГЛОНАСС №04. Можно видеть, что имеет место систематическое изменение ошибки ПЭС, связанной с рассинхронизацией частотных каналов. Систематическое изменение гораздо более выражено для каналов на спутниках ГЛОНАСС и составляет ~1,7 нс в год (что соответствует изменению ошибки определения ПЭС на 5 TECU/год), в то время как для каналов спутников GPS – ~0.7 нс в год (2 TECU/год).

Отклик ионосферы на землетрясения с различной магнитудой. Исследования [5] показывают, что отклик ПЭС на ударно-акустические волны (УАВ), генерируемые при землетрясениях (ЗТ), промышленных взрывах и запусках космических аппаратов, независимо от типа источника воздействия, носит характер, соответствующий классической форме ударной волны (последовательно фазы сжатия и разрежения).

С использованием измерений вариаций ПЭС нами были проведены исследования откликов ионосферы на землетрясения различной интенсивности (магнитуды $4,1 \leq Mw \leq 9,0$), зарегистрированных в период 1999–2012 гг. в регионах, заметно отличающихся характером тектонических движений (Байкальская рифтовая зона, Япония, Новая Зеландия, Суматра, Греция). Примеры вариаций ПЭС, отфильтрованных в диапазоне периодов 2–10 мин, для трех землетрясений различной интенсивности ($Mw \leq 6,5$, $6,5 \leq Mw \leq 7,0$, $7,0 \leq Mw$) приведены на рис. 3.

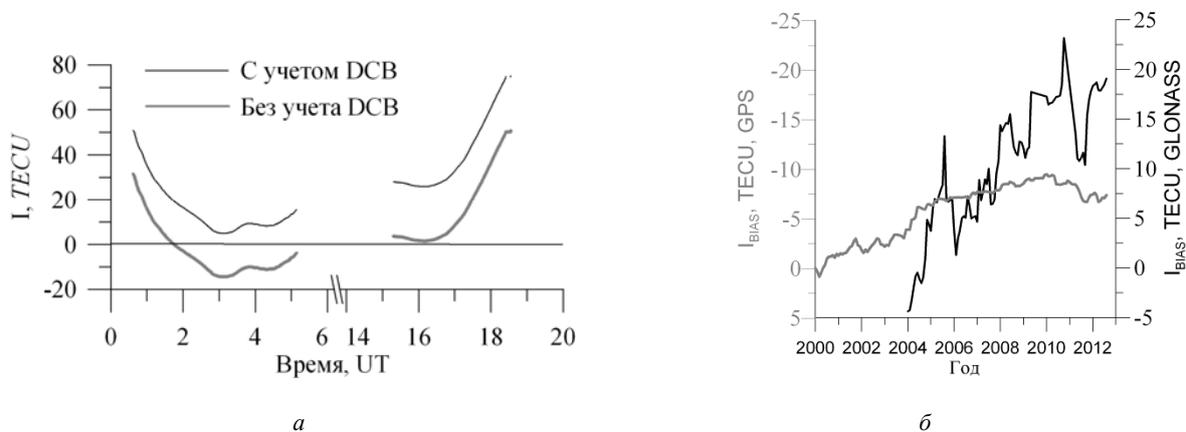


Рис. 2. Абсолютное значение ПЭС рассчитанное с учетом и без учета DCB (а); динамика погрешности определения ПЭС I_{BIAS} , связанная с DCB для спутника ГЛОНАСС 04 (черная кривая, правая ось), и GPS PRN03 (серая кривая, левая ось) (б)

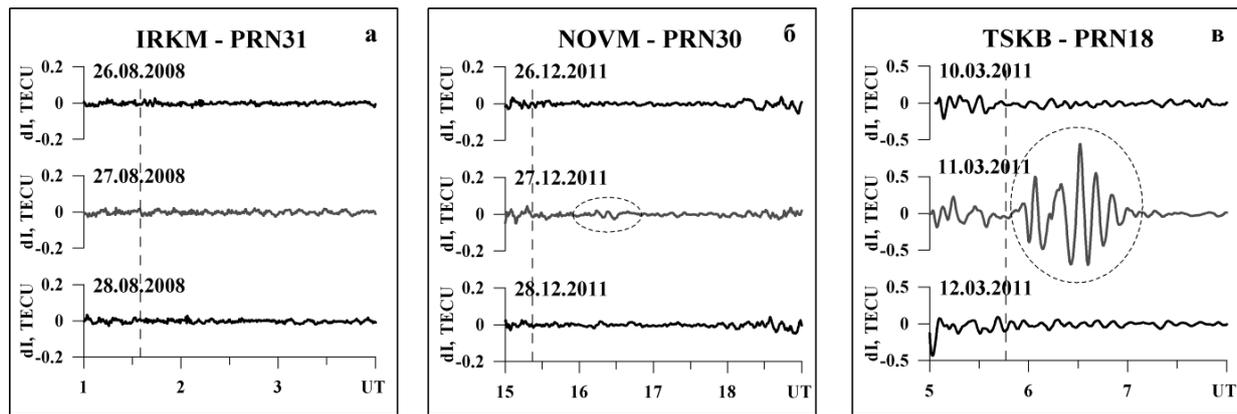


Рис. 3. Примеры вариаций ПЭС для землетрясений различной интенсивности: *a* – 27.08.2008 на Байкале с $M_w = 6.3$, (станция IRKM, спутник GPS PRN31); *б* – 27.12.2011 в Республике Тыва с $M_w = 6.7$ (станция NOVМ, спутник PRN30); *в* – 11.03.2011 в Японии с $M_w = 9.0$ (станция TSKB, спутник PRN18). Показаны вариации ПЭС в день землетрясения и в контрольные дни

Анализ показывает, что после землетрясений с магнитудами $M_w \leq 6,5$ (независимо от механизма очага землетрясения) волновые возмущения в вариациях ПЭС не наблюдаются. Отклики на землетрясения с $6,5 \leq M_w \leq 7,0$ регистрируются на отдельных лучах «приемник – спутник», имеют небольшую амплитуду; их трудно выделять на уровне фоновых колебаний. Возмущения ПЭС, вызванные сильными землетрясениями с магнитудами $7,0 \leq M_w \leq 9,0$, в целом, регистрируются уверенно, что позволяет определять их характеристики и рассчитывать параметры движения. При этом отклики на сильные землетрясения более ярко выражены для толчков, имевших существенную вертикальную составляющую в очаге.

Полученные результаты подтверждаются данными других исследователей: обзор публикаций за период 1964–2012 гг. показал, что землетрясения, вызвавшие заметные волновые возмущения в ионосфере, имели магнитуду не ниже 6.5. Таким образом, величину $M_w = 6.5$ можно считать пороговым значением магнитуды, ниже которого заметных волновых возмущений ПЭС, вызванных землетрясением, не наблюдается. При малых магнитудах сейсмической энергии, очевидно, недостаточно для возбуждения волн в нейтральной атмосфере, способных вызвать возмущения ПЭС в ионосфере, различимые на уровне фоновых флуктуаций. Для уверенного выделения возмущений ПЭС после землетрясения с магнитудой, близкой к пороговому значению, как правило, требуется значительное количество станций GPS в районе землетрясения. Для землетрясений с $M_w > 6.5$ заметное влияние на формирование и интенсивность волновых возмущений в ионосфере оказывает также механизм очага землетрясения. Вертикальные смещения земной поверхности более эффективны как источник внутренних волн в атмосфере, следствием которых являются ионосферные возмущения.

Исследование эффектов солнечного терминатора в ионосфере по данным ГИСС. В более ранних работах на основании измерений вариаций ПЭС нами

было обнаружено появление волновых возмущений крупного (КМ) и среднего масштабов (СМ), связанных с прохождением солнечного терминатора (СТ) в локальной и магнитосопряженной областях [7]. Была предложена гипотеза о переносе возмущения собственными волнами медленного магнитного звука (ММЗ), генерирующимися при прохождении СТ через магнитосопряженную точку. В подтверждение этого, периоды наблюдаемых колебаний ПЭС соответствовали периодам первых гармоник собственных ММЗ колебаний для средних широт [8].

Для получения новых свидетельств в пользу магнитогидродинамической природы волновых пакетов мы исследовали изменение параметров волновых возмущений с широтой. Для этих целей были выбраны два региона в Японии: «Юг» ($30-35^\circ\text{N}$; $130-140^\circ\text{E}$) и «Север» ($38-45^\circ\text{N}$; $138-145^\circ\text{E}$). На рис. 4, *a*, *б* представлены динамические спектры ПЭС в системе локального времени солнечного терминатора. Можно видеть, что регистрация волновых возмущений начинается в северном (рис. 6, *a*) регионе примерно на час раньше, чем в южном (рис. 4, *б*). В обоих случаях время начала регистрации хорошо согласуется с временем прохождения солнечного терминатора через магнитосопряженную область. Пространственное распределение вариаций ПЭС (рис. 4, *в*) показывает, что наклон фазового фронта регистрируемых возмущений хорошо согласуется с наклоном линии магнитосопряженного терминатора. Указанные факты являются дополнительным аргументом в пользу гипотезы о переносе «терминаторного» возмущения волнами медленного магнитного звука из другого полушария.

Глобальное электронное содержание. В 2006 г. в ИСЗФ СО РАН была разработана методика для расчета Регионального (РЭС) и Глобального (ГЭС) электронного содержания, равного полному числу электронов в ОКП. ГЭС и РЭС вычисляется с использованием глобальных ионосферных карт полного электронного содержания GIM (Global ionosphere map),

рассчитываемых по данным сети станций ГНСС [5]. Ряды ГЭС и РЭС характеризуются сильновыраженными годовыми, полугодовыми и 27-дневными вариациями. На рис. 5 представлены вариации ГЭС и РЭС в Сибири, которые получены с использованием сглаживания с окном 10 дней (рис. 5, а) и 365 дней (рис. 5, б). Можно видеть, что ГЭС и РЭС достаточно хорошо следует общей динамике цикла солнечной активности. В этой связи данный параметр может служить индексом состояния ОКП наряду с уровнем потока солнечного радио- и рентгеновского излучения, а также индексами геомагнитной активности.

Амплитуда полугодовых вариаций максимальна при высоком уровне солнечной активности. Годовые вариации РЭС и ГЭС сдвинуты по фазе. Максимум годовых вариаций ГЭС приходится на зимние месяцы. Это означает, что южное полушарие вносит более существенный вклад в годовые вариации. Достаточно хорошо проявляется затянувшийся минимум 23-го цикла солнечной активности и выход на максимум нового цикла в конце 2011 г.

Сбои навигационно-временных определений. В работах [9; 10] было показано, что солнечные вспышки, а также крупномасштабные магнитоориентированные неоднородности могут привести к нару-

шению функционирования ГНСС. Неоднородное состояние среды ОКП является причиной резкого снижения качества измерения радионавигационных параметров – кодовой псевдозадержки и фазы несущей. Главной причиной этого явления служит рассеяние сигналов навигационных спутников на мелко-масштабных неоднородностях электронной концентрации. Таким образом, плотности сбоев измерений кодовой псевдозадержки и фазы несущей могут служить показателями неоднородной пространственно-временной структуры среды ОКП.

На рис. 6 приведены результаты регистрации плотности сбоев сопровождения фазы навигационного сигнала P на частотах L1 (рис. 6, а) и L2 (рис. 6, б) GPS (серые кривые) и ГЛОНАСС (черные кривые) во время магнитной бури 20 ноября 2003 г. Главная фаза магнитной бури имела место в период 16–21 UT. Для GPS имеет место наличие постоянного фонового уровня сбоев на частоте L2 на уровне ~3%. При этом, имеет место рост сбоев сопровождения фазы вспомогательной частоты во время магнитной бури для системы GPS с 3 до 8%. Для ГЛОНАСС увеличение срывов сопровождения фазы на частоте L2 может достигать ~3%. Стоит отметить практически полное отсутствие сбоев на основной частоте L1.

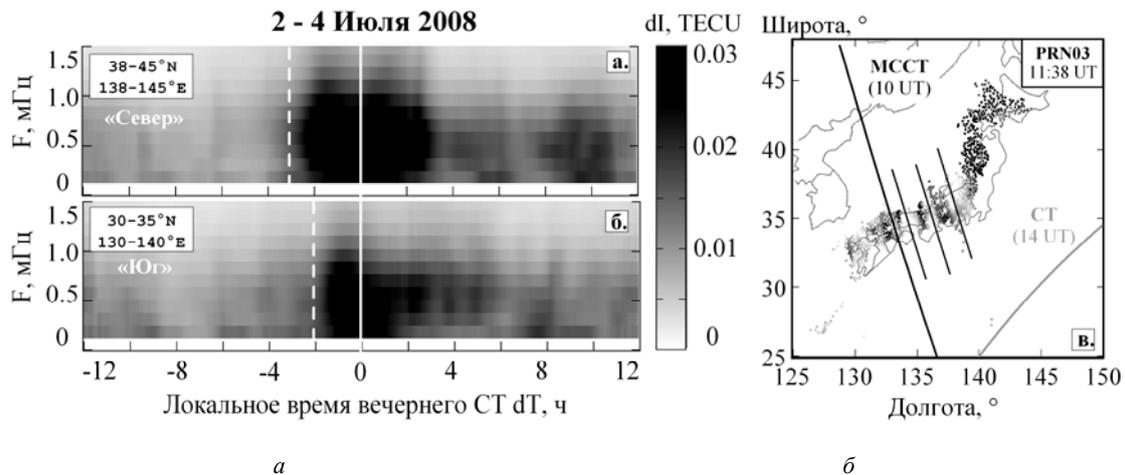


Рис. 4. Динамические спектры ПЭС в северной (а) и южной (б) части Японии, а также пространственное распределение вариаций ПЭС по отношению к линии солнечного терминатора (в)

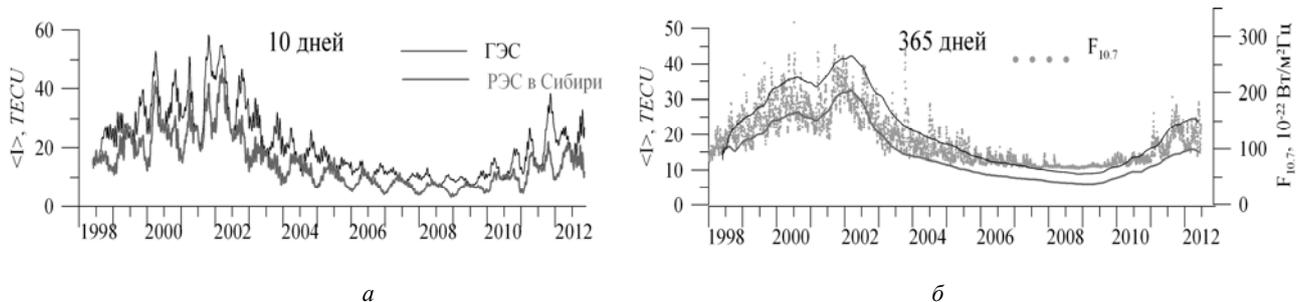


Рис. 5. Динамика ГЭС и РЭС в Сибири, сглаженного с окном 10 дней (а) и 365 дней (б). Серыми точками приведено значение солнечного радиоизлучения на длине волны 10.7 см

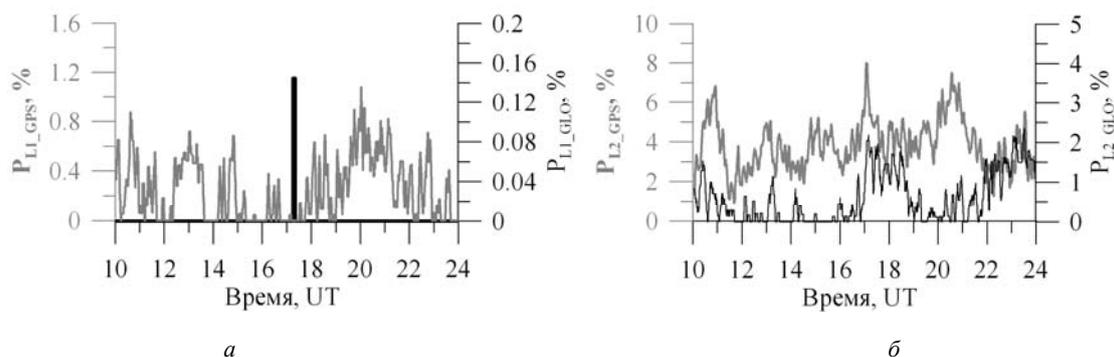


Рис. 6. Плотность сбоев сопровождения фазы P на частоте L1 (а) и L2 (б) GPS (серые кривые) и ГЛОНАСС (черные кривые) во время магнитной бури 20 ноября 2003 г.

В работе представлены возможности использования ГНСС для мониторинга состояния ОКП. Применение данных всемирной и региональных сетей позволяет проводить мониторинг состояния ионосферы в различных точках Земного шара с беспрецедентным разрешением по времени и пространству. Систематическая ошибка определения текущих значений ПЭС, связанная с рассинхронизацией частотных каналов спутников и приемников, достаточно значительна и может составлять десятки TECU. Для ГЛОНАСС изменение этой ошибки (~5 TECU/год) в целом выше, чем для GPS (~2 TECU/год).

На основании данных ПЭС, полученного с помощью ГНСС, определен порог магнитуды, ниже которого заметных волновых возмущений ПЭС, вызванных землетрясением, не наблюдается. Его величина составляет $M_w = 6.5$. Получены новые свидетельства в пользу МГД-природы возмущений, ассоциируемых с прохождением солнечного терминатора.

Ведутся исследования возможности использования информации о плотности сбоев измерений радионавигационных параметров в аппаратуре GPS и ГЛОНАСС для определения уровня возмущенности среды ОКП. Имеет место увеличение плотности сбоев во время магнитных бурь. При этом отмечено, что сбои сопровождения фазы в системе ГЛОНАСС в целом ниже, чем в GPS. Для последней существует регулярный «фоновый» уровень сбоев, особенно существенный на частоте L2.

Использование данных GPS позволяет получить данные о числе электронов в ОКП. Глобальное и региональное электронное содержание хорошо следует динамике цикла солнечной активности и характеризуется 27-дневными, полугодовыми и годовыми вариациями.

Развертываемая в Сибирском регионе сеть станций значительно повысит возможности мониторинга на территории России. После полного развертывания сети будет возможно детектирование крупномасштабных и среднемасштабных возмущений на территории Сибири, а также построение региональных карт ПЭС с точностью, существенно превышающую точность глобальных ионосферных карт. В заключении нам бы хотелось указать на необходимость межведомственного согласования вопроса о возможности

использования полигонов различных научных центров, ВУЗов, метеостанций для размещения навигационных приемников и осуществления мониторинга состояния ОКП над территорией России.

Благодарности

Мы глубоко признательны нашему Учителю проф. Э. Л. Афраймовичу за его активную деятельность на протяжении многих лет, в которой мы имели возможность участвовать. Мы благодарны Э. И. Астафьевой, С. В. Воейкову, Н. С. Гаврилюк, И. В. Живетьеву, А. Б. Ишину, В. В. Кирышкину, Е. А. Косогорову, А. С. Леоновичу, Л. А. Леонович, О. С. Лесюте, К. С. Паламарчуку, А. С. Поляковой, Г. Я. Смолькову, П. В. Татаринovu в различные годы участвовавших в работах по детектированию отклика ионосферы на естественные и антропогенные воздействия, и влиянию ОКП на устойчивость работы ГНСС, а также всем тем, с кем за эти годы шли дискуссии, что, безусловно, позволило более детально понять наблюдаемые эффекты.

Библиографические ссылки

1. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС / под ред. В. Н. Харисова, А. И. Перова, В. А. Болдина. М. : ИПРЖР. 1998. 400 с.
2. Calais E., Minster J. B. GPS detection of ionospheric perturbations following the January 1994, Northridge earthquake // *Geophys. Res. Lett.* 1995. Vol. 22. P. 1045–1048.
3. Afraimovich E. L., Palamartchouk K. S., Perevalova N. P. GPS direct and inverse radiointerferometry – new methods of investigating Travelling Ionospheric Disturbances // *Acta Geod. Geoph. Hung.* 1997. Vol. 32, no. 3–4. P. 469–479. Abstract.
4. Исследования ионосферных возмущений методами GPS-радиозондирования в ИСЗФ СО РАН / Э. Л. Афраймович, Э. И. Астафьева, С. В. Воейков и др. // *Солнечно-земная физика.* 2011. Вып. 18. С. 24–39.
5. Афраймович Э. Л., Перевалова Н. П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск : Изд-во ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАН. 2006. 480 с.
6. Куницын В. Е., Терещенко Е. Д., Андреева Е. С. Радиотомография ионосферы. М. : Физматлит, 2007. 255 с.

7. Spatio-temporal structure of the wave packets generated by the solar terminator / E. L. Afraimovich, I. K. Edemskiy, S. V. Voeykov et al. // *Advances in Space Research*. 2009. Vol. 44, no 7. P. 824–835.

8. The MHD nature of night-time MSTIDs excited by the solar terminator / E. L. Afraimovich, I. K. Edemskiy, A. S. Leonovich et al. // *Geophys. Res. Letters*. 2009. Vol. 36. L15106. doi:10.1029/2009GL039803.36.

9. Сбои функционирования спутниковых навигационных систем GPS-ГЛОНАСС, обусловленные мощным радиоизлучением солнца во время солнечных вспышек 6, 13 декабря 2006 г. и 28 октября 2009 г. / Э. Л. Афраймович, Н. С. Гаврилюк, В. В. Демьянов и др. // *Космические исследования*. 2009. Т. 47, № 2. С. 146–157.

10. Effects of ionosphere super-bubble on the GPS positioning performance depending on the orientation relative to geomagnetic field / V. V. Demyanov, Yu. V. Yasyukevich, A. B. Ishin et al. // *GPS solutions*. 2012. Vol. 16, no. 2. P. 181–189.

References

1. *Global'naya sputnikovaya radionavigatsionnaya sistema GLONASS* (The Global Satellite Radio Navigation System GLONASS). Ed. Kharisov V. N., Perov A. I., Boldin V. A. Moscow, IPRZhR, 1998, 400 p.

2. Calais E., Minster J. B. *Geophys. Res. Lett.* 1995, vol. 22, p. 1045–1048.

3. Afraimovich E. L., Palamartchouk K. S., Perevalova N. P. *Acta Geod. Geoph. Hung.* 1997, vol. 32, no. 3–4, p. 469–479. Abstract.

4. Afraimovich E. L., Astafyeva E. I., Voeykov S. V. et al. *Solnechno-Zemnaya phisika*. 2011, vol. 18, p. 24–39.

5. Afraimovich E. L., Perevalova N. P. *GPS-monitoring verkhney atmosfery Zemli* (GPS monitoring of the Earth's upper atmosphere). Irkutsk, 2006, 480 p.

6. Kunitsyn V. E., Tereshchenko E. D., Andreeva E. S. *Radiotomografiya ionosfery* (Ionospheric radio tomography). Moscow, Nauka, 2007.

7. Afraimovich E. L., Edemskiy I. K., Voeykov S. V., Yasyukevich Yu. V., Zhivetiev I. V. *Advances in Space Research*. 2009, vol. 44, no. 7, p. 824–835.

8. Afraimovich E. L., Edemskiy I. K., Leonovich A. S., Leonovich L. A., Voeykov S. V., Yasyukevich Yu. V. *Geophys. Res. Letters*. 2009, vol. 36, L15106. doi:10.1029/2009GL039803.36.

9. Afraimovich E. L., Demyanov V. V., Gavriluyuk N. S., Ishin A. B., Smolkov G. Ya. *Cosmic Research*. 2009, vol. 47, no. 2, p. 126–137.

10. Demyanov V. V., Yasyukevich Yu. V., Ishin A. B., Astafyeva E. I., Jin S. *GPS solutions*. 2012, vol. 16, no. 2, p. 181–189.

© Ясюкевич Ю. В., Перевалова Н. П., Демьянов В. В., Едемский И. К., Маркидонова А. А., 2013

УДК 629.78

АНАЛИЗ ВЫПОЛНЕНИЯ ТРЕБОВАНИЙ МЕЖАГЕНТСКОГО КООРДИНАЦИОННОГО КОМИТЕТА ПО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЮ ОБРАЗОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

Ю. Л. Булынин, И. Л. Созонова

ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»
Россия, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина 52
E-mail: bulinin@iss-reshetnev.ru

Рассматриваются требования межагентского документа «Руководящие принципы организации работ по снижению техногенного засорения космического пространства» и обсуждается возможность их выполнения.

Проведенный в статье анализ долгосрочной эволюции орбит спутников систем ГЛОНАСС и GPS показал, что минимизация эксцентриситета на момент окончания активного функционирования наиболее простой и эффективный путь для предотвращения столкновений в области средневысотных орбит. В статье показано, что для гарантированной безопасности действующей орбитальной группировки системы ГЛОНАСС, высота орбиты «захоронения» должна отличаться от номинальной не менее, чем на 450 км при эксцентриситете не более 0,0004.

Из приведенных в статье статистических данных следует, что с 1999 по 2011 гг. практически половина спутников была уведена на орбиту, соответствующую требованиям «Руководящих принципов МККМ по предупреждению образования космического мусора».

На примере увода КА Экспресс-А3 продемонстрирована возможность увода на орбиту «захоронения» с ГСО отечественных КА, находящихся на западной границе зоны видимости российских станций слежения.

Ключевые слова: космический мусор, космический объект, оберегаемые районы, область низковысотных орбит, область геостационарной орбиты, область средневысотных орбит, орбита «захоронения».