

ISSN 1609-7742

Наукові праці

Випуск 36. 2006

ІСТОРІЯ
ТЕХНІКА
ЕКОЛОГІЯ
ФІЛОЛОГІЯ
ЕКОНОМІКА
ПЕДАГОГІКА
ПОЛІТИЧНІ НАУКИ
ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА
КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Серія

**ТЕХНОГЕННА
БЕЗПЕКА**

*Сливинский А.П., Бушув Ф.И., Калюжный Н.А., Шульга А.В.,
Научно-исследовательский институт "Николаевская Астрономическая Обсерватория" (НИИ
НАО), Украинский радиотехнический институт (УРТИ), г. Николаев*

ОСОБЕННОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛОВ СДВ И GPS СТАНЦИЙ ПРИ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШКАХ И НАД ГЕОТЕКТОНИЧЕСКИМИ РАЗЛОМАМИ

Проведен сравнительный анализ среднесуточных значений разности групповых путей для двух различных частот излучаемых спутником системы GPS, принимаемых перманентной GPS станцией НИИ НАО, и данных измерений спутников GOES по потокам протонов, электронов и геомагнитного поля. Результаты анализа показали, что при солнечных рентгеновских вспышках и мощных магнитных бурях происходит увеличение среднесуточных значений разности, пропорциональной полному электронному содержанию на пути распространения радиоволн в такие периоды времени. Помимо влияния солнечной активности на концентрацию ионосферной плазмы, по имеющимся экспериментальным данным, над очагами подготовки землетрясений происходит заметное увеличение концентрации ионосферной плазмы, что также приводило к увеличению оценок полного электронного содержания.

Carried out the comparative analysis of daily average values of a difference of group ways for two various frequencies radiated the satellite of system GPS, accepted permanent GPS station of scientific research institute NAO and the given measurements of satellites GOES on streams of protons, electrons and a geomagnetic field. Results of the analysis have shown, that at solar x-ray flux and powerful magnetic storms there is an increase of daily average values of the difference proportional to the total electronic contents for a way of propagation of radiowaves in such periods of time. Besides influence of solar activity on concentration ionospheric plasmas, on available experimental data, above the centers of preparation of earthquakes there is an appreciable increase of concentration ionospheric plasmas, that also resulted in increase of estimations of the total electronic contents.

Введение

Проблема прогноза и диагностики неблагоприятных периодов как для биологических объектов, так и для сложных техногенных объектов всегда вызывала пристальное внимание общества. В связи с этим любое продвижение в решении этой проблемы является актуальным. Предполагая возможность проявлений влияния солнечной активности на первичную сигнальную информацию данных спутников системы GPS, сравнительный анализ текущих мониторинговых среднесуточных значений, принимаемых перманентной GPS станцией НИИ НАО (шифр mikl), и данных измерений спутников GOES по потокам протонов, электронов и геомагнитного поля. Увеличение плотности потока солнечного ветра, потока рентгеновского излучения и возмущений геомагнитного поля может также способствовать использованию результатов такого анализа для прогноза и диагностики неблагоприятных периодов. Комплекс аппаратуры НИИ НАО обеспечивает постоянный приём сверхдлинноволновых (СДВ) радиосигналов передатчиков времени и частоты навигационной системы РНСЕ, осуществляемых в цифровом виде [1]. В проводимых экспериментальных работах принимались и регистрировались сигналы радиопередатчика DCF-77, расположенного в западной части Германии в районе Франкфурта-на-Майне, излучающего на частоте 77 кГц. При наклонном зондировании сигнала СДВ передатчика, по откликам динамики нижнего D-слоя ионосферы на поведении амплитуды

ды сигнала СДВ передатчика, производятся наблюдения внезапных изменений солнечной активности, сейсмоионосферной активности и геомагнитных возмущений.

Метод оценки полного электронного содержания

Фаза сигнала, принимаемого GPS приёмником, с помощью которой оцениваются координаты, определяется состоянием ионосферной плазмы на пути L распространения радиоволны от спутникового передатчика к приёмнику. В свою очередь, длина группового пути определяется через коэффициент преломления n в заданной точке r и зависит от частоты f радиоволны и концентрации ионосферной плазмы N . Для используемых величин частот в системе GPS без учета тропосферной поправки, $n \approx 1 - e^2 N(r)/(2mf^2)$, и тогда для длины группового пути P имеем:

$$P = \int_0^H n^{-1}(z) dz \approx H + (e^2/2pmf^2) \int_0^H N(z) dz, \quad (1)$$

где H – расстояние до спутника системы GPS, e и m – заряд и масса электрона.

Согласно (1) следует, что любое заметное увеличение либо уменьшение концентрации плазмы $DN(z)$ над её регулярным значением $N_0(z)$ на пути распространения радиоволны должно приводить к соответствующему изменению оценки группового пути.

Для разности групповых путей $P2 - P1$, полученной на двух разных частотах излучения f_1 и f_2 ($f_1 > f_2$) спутников системы GPS, согласно (1) можно записать:

$$P2 - P1 = (e^2/2pm)(1/f_2^2 - 1/f_1^2) \int_0^H N(z) dz,$$

откуда для полного электронного содержания имеем:

$$\int_0^H N(z) dz = 2pm(P2 - P1)/e^2(1/f_2^2 - 1/f_1^2). \quad (2)$$

Аналогичное выражение для разности фазовых путей ($L2-L1$) имеет вид:

$$\int_0^H N(z) dz = -2pm(L2 - L1)/e^2(1/f_2^2 - 1/f_1^2) \quad (3)$$

и отличается от ($P2-P1$) только знаком.

Из выражений (2) и (3) следует, что с увеличением концентрации плазмы при возмущениях над её фоновым значением разность групповых путей ($P2-P1$) должна увеличиваться, а разность фазовых путей ($L2-L1$) должна уменьшаться.

Влияние солнечной активности

В октябре и ноябре 2003 года произошли наиболее яркие проявления возмущений солнечной активности. На рис. 1 для указанного двухмесячного интервала сверху вниз приведены следующие графики данных измерений:

а) данные спутников GOES солнечного потока рентгеновского излучения (P), потоков протонов (Π_p) и электронов (Π_e), геомагнитного поля Земли (H_p) и оценки значений планетарных K_p -индексов;

б) данные измерений трех компонент геомагнитного поля Земли (H , E и Z), регистрируемые в пункте наблюдения ИЗМИРАН (г. Троицк, Московской обл., WEB-адрес сайта: <http://izmiran.troitsk.ru>);

в) данных среднесуточных оценок значений высоты (h) перманентной GPS-станции mkl1, расположенной в НИИ НАО (файлы mkl12740.mes.z ÷ mkl13340.mes.z за 2003 г).

В соответствии с графиками, представленными на рис. 1, аномалии в текущих данных измерения среднесуточных значений высоты GPS станции НИИ НАО синхронно возникали во время усиления рентгеновского потока солнечного излучения и при внедрении потоков солнечных корпускул в околоземное пространство, сопровождающихся развитием сильных магнитных бурь. Ответственные за это возмущения геомагнитного поля, как на высотах орбит спутников GOES, так и по данным наземной службы мониторинга геомагнитного поля на станции ИЗМИРАН, выражались в резком увеличении величин оценок планетарных K_p -индексов.

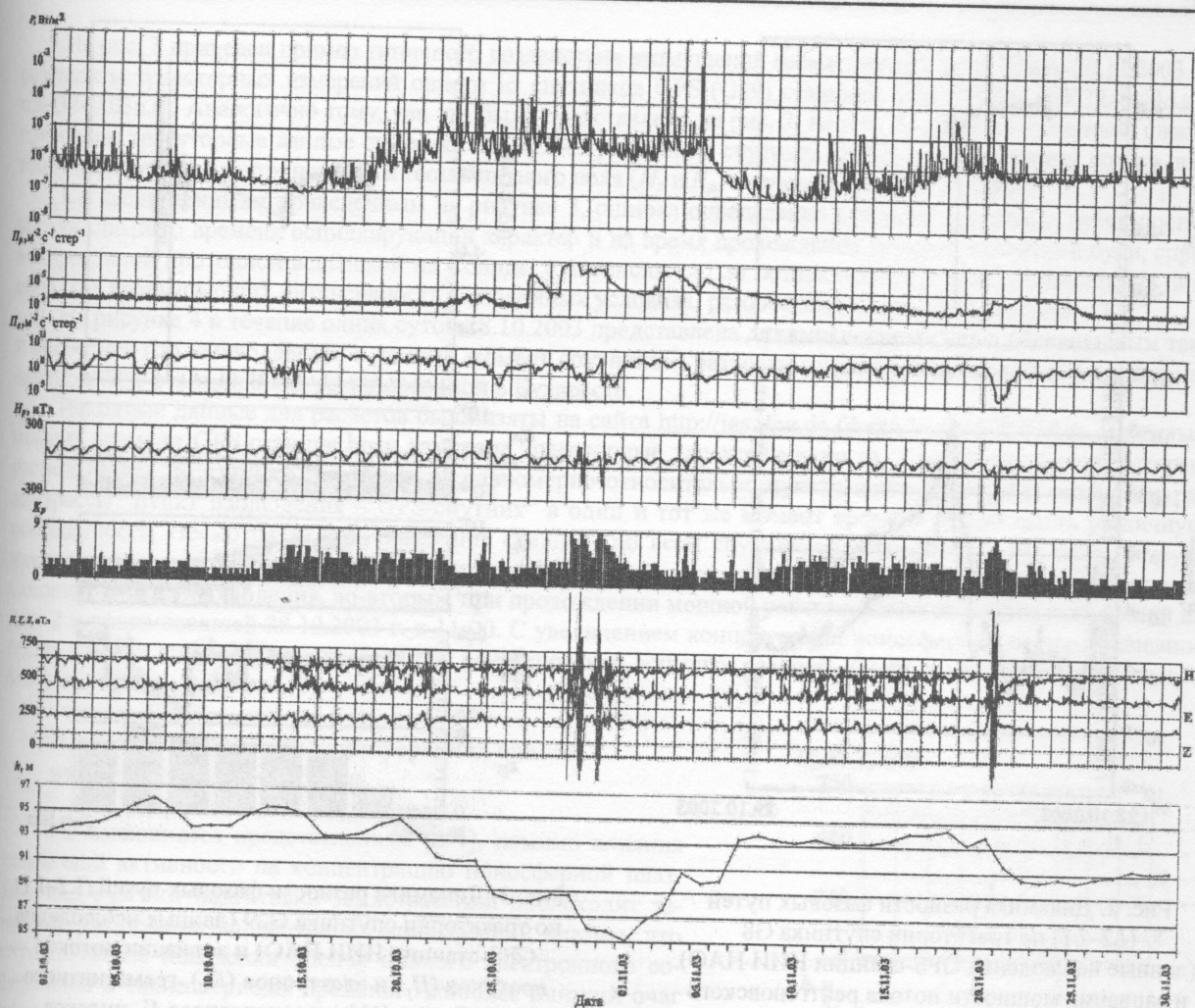


Рис. 1. Временные вариации мощности потока рентгеновского излучения (P), потоков протонов (P_p) и электронов (P_e), геомагнитного поля Земли (H_p), планетарного K_p -индекса (по данным сайта <http://sec.noaa.gov/today.html>), трех компонент геомагнитного поля Земли (H , E и Z) (по данным сайта <http://www.izmiran.troitsk.ru>) и среднесуточных оценок значений высоты (h) перманентной GPS-станции mkl (НИИ НАО)

Увеличение концентрации ионосферной плазмы происходит при увеличении потока рентгеновского излучения Солнца, а также при увеличении потоков солнечных протонов и электронов в околоземном пространстве. В то же время при прохождении сильных магнитных бурь, как правило, также происходит увеличение концентрации ионосферной плазмы. Временная зависимость среднесуточных значений высоты GPS станции НИИ НАО, представленная на рис. 1, подтверждает подобную качественную их зависимость от состояния солнечной активности.

На рис. 2 приведена иллюстрация воздействия мощной рентгеновской вспышки 28.10.2003 на динамику разности фазовых путей (L_2-L_1) по траектории спутника G8 (файл mkl3010.03d.z и mkl3010.03n.z, сайт <http://igs.ifag.de>) и полученной для GPS станции НИИ НАО, с помощью программы teqc (взята на сайте <http://www.unavco.org/facility/software/software.html>). По оси абсцисс на протяжении суток отложены 30-секундные отсчеты времени, начиная с 0 часов по Гринвичу, по оси ординат – разность групповых путей в метрах. В нижней части рисунка, в той же временной шкале, приведены данные рентгеновского мониторинга спутника GOES для этих же суток.

Из данных, приведенных на рис. 2, следует, что ошибка определения дальности носила кратковременный характер и, на момент рентгеновской вспышки на Солнце с интенсивностью класса X, составила по модулю более 3 м в сторону увеличения. В то же время в невозмущенных условиях разброс значений оценок не превышал долей метра.

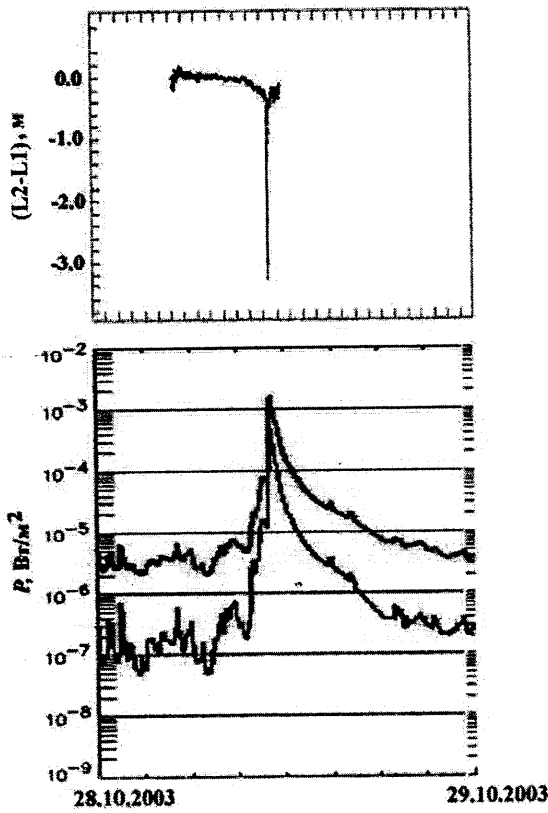


Рис. 2. Динамика разности фазовых путей $(L2-L1)$ по траектории спутника G8 (данные наблюдения GPS-станции НИИ ААО) и вариации мощности потока рентгеновского излучения (P_x) (по данным измерений спутников GOES) 28.10.2003 во время рентгеновской вспышки класса X

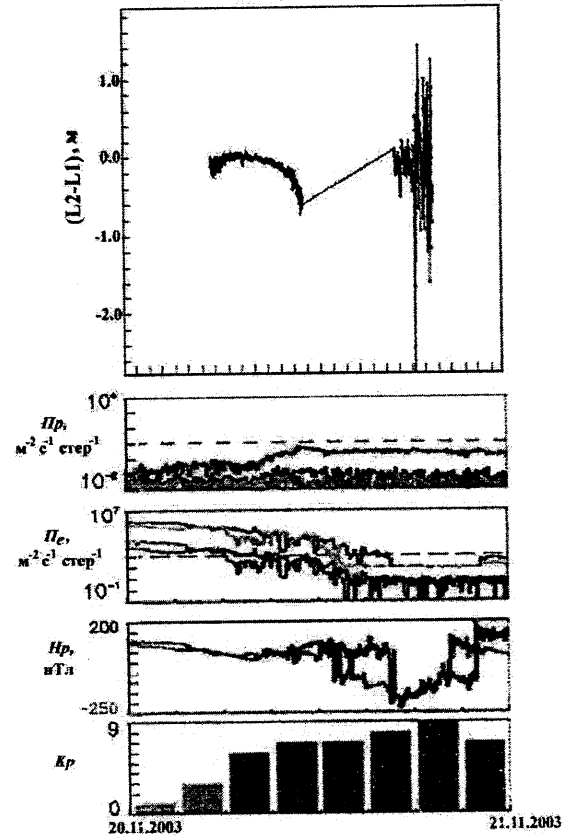


Рис. 3. Динамика разности фазовых путей $(L2-L1)$ по траектории спутника G29 (данные наблюдения GPS-станции НИИ ААО) и вариации потоков протонов (P_p) и электронов (P_e) , геомагнитного поля Земли (H_p) и планетарного K_p -индекса (по данным измерений спутников GOES) 20.11.2003 во время мощной геомагнитной бури

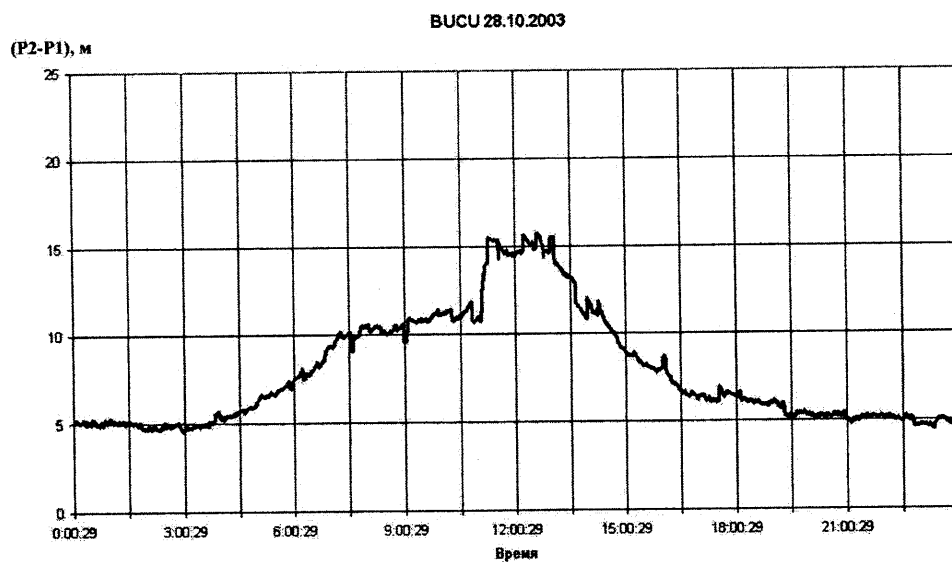


Рис. 4. Динамика изменений с 30-секундным тактом средней (по спутникам) разности групповых путей $(P2-P1)$, наблюдавшаяся на GPS-станции вису (Бухарест) 28.10.2003 во время возмущенных геофизических условий

На рис. 3 приведен пример типичного воздействия возмущений геомагнитного поля Земли 20.11.2003 на результаты траекторных измерений одного из спутников GPS (G29) станцией mikl (файлы mikl3240.03d.z и mikl3240.03n.z). Аналогично тому, как это было представлено на рис. 2, на рис. 3, в той же временной шкале, приведены траекторные данные спутника G29 (L2-L1) и данные спутника GOES по мониторингу потока протонов (I_p), потока электронов (I_e) и геомагнитного поля (H_p и K_p) в течение суток 20.11.2003 г.

Согласно данным приведенным на рисунке 3, ошибка определения разности групповых путей носила протяженный во времени осциллирующий характер и на время прохождения мощной магнитной бури, спровоцированной протонной вспышкой на Солнце, с интенсивностью потока протонов приблизительно на пять порядков превышающей интенсивность в спокойных условиях, разброс значений составил также ~ 3 м.

На рисунке 4 в течение одних суток 28.10.2003 представлена динамика изменений с 30 секундным тактом средней (по наблюдаемым в данный момент спутникам) разности групповых путей ($P2-P1$) для перманентной GPS-станции bucu, расположенной в Бухаресте.

Исходные данные для расчетов были взяты на сайте <http://igs.ifag.de> (файл bucu3010.03d.z). В каждый момент времени GPS-станция bucu измеряла траекторные характеристики от 7 до 10 спутников, которые располагались по азимуту сравнительно равномерно относительно пункта наблюдения, т.е. различные радиотрассы "пункт наблюдения – GPS-спутник" в один и тот же момент времени могли иметь различную освещенность. Несмотря на это, поведение средней (по всем спутникам) разности ($P2-P1$) соответствует изменению концентрации ионосферной плазмы, во-первых, в течение суток в зависимости от освещенности Солнцем пункта наблюдения, во-вторых, при прохождении мощной рентгеновской вспышки, показанной на рис. 2 и произошедшей 28.10.2003 г. в 11:00. С увеличением концентрации ионосферной плазмы в дневное время суток и при прохождении мощной рентгеновской вспышки разность $P2-P1$ также увеличивается, как это следует из выражения (2).

Влияние возмущений ионосферы над очагом подготовки землетрясения

По имеющимся представлениям [2-4], помимо влияния солнечной активности на концентрацию ионосферной плазмы, над очагами подготовки землетрясений происходит заметное увеличение концентрации ионосферной плазмы, что отражается на поведении оценок полного электронного содержания в такие периоды времени. Наиболее близкий очаг подготовки землетрясений к пункту приёма GPS станции НИИ НАО располагается в сейсмоактивной зоне Вранча (Румыния). На протяжении 2002-2004 гг. в этом сейсмоактивном районе на интервале сентябрь – октябрь 2004 года произошло три землетрясения, характеристики которых взяты на сайте http://www.neic.cr.usgs.gov/neis/general/handouts/general_seismicity.html и приведены в табл. 1. В таблице 1 используются следующие условные обозначения: θ , ϕ – северная широта и восточная долгота эпицентра землетрясения, H – глубина эпицентра, M – магнитуда землетрясения, D – расстояние эпицентра до радиотрасс НАО-DCF (в числителе) и НАО-РБУ (в знаменателе).

На рис. 5 сверху вниз приведены графики временных последовательностей данных наземной службы мониторинга трех компонент геомагнитного поля Земли (H , E и Z) на станции ИЗМИРАН, среднесуточных значений высоты (h) GPS станции НИИ НАО, амплитуды сигнала передатчика DCF-77 (U_{DCF}) и амплитуды сигнала передатчика РБУ-77 ($U_{РБУ}$, Москва), принимаемых на комплексе аппаратуры НИИ НАО (сайт <http://www.mao.nikolaev.ua>).

Момент землетрясения отмечен на рис. 5 стрелкой. По данным наземной службы мониторинга геомагнитного поля на станции ИЗМИРАН (см. рис. 5), гелио-геофизическая обстановка на интервале времени, предшествующем землетрясению, оставалась слабо возмущенной. Согласно данным о среднесуточных значениях высоты, полученным на GPS станции НИИ НАО (см. рис. 5), заметное и длительное уменьшение оценки высоты произошло с 25.10 по 28.10.2004. На фоне

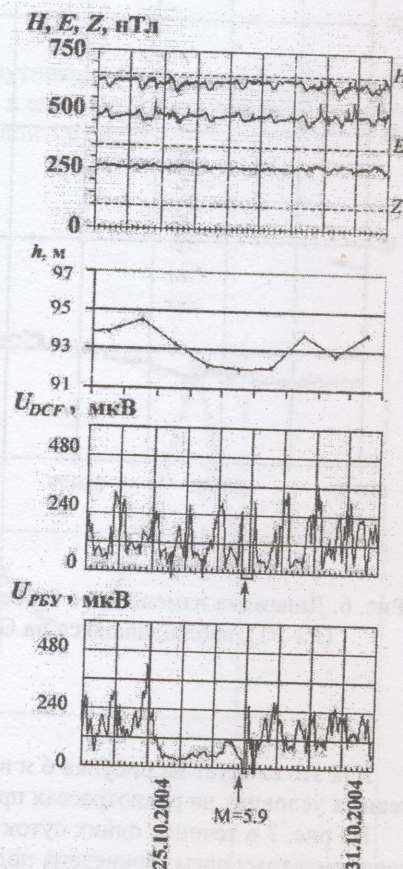


Рис. 5. Временные вариации трех компонент геомагнитного поля Земли (H , E и Z) (по данным сайта <http://www.izmiran.troitsk.ru>), среднесуточных оценок значений высоты (h) перманентной GPS-станции mikl (НИИ НАО) и амплитуды сигналов СДВ радиостанций DCF-77 (U_{DCF}) и РБУ-66 ($U_{РБУ}$) за период с 20.10 по 31.10.2004 г.

спокойной обстановки по солнечной активности синхронное с этим процессом уменьшение амплитуды сигналов передатчиков DCF-77 и RBU-77 может быть связано с ухудшением условий распространения радиоволн в канале Земля – ионосфера за счёт увеличения концентрации плазмы в атмосфере [5] над очагом подготовки землетрясения, произошедшего 27.10.2004.

Подобное поведение сигналов может указывать на локальный характер возмущений ионосферы, обусловленный близостью к очагу подготовки землетрясения. Особенности поведения сигнала передатчика РБУ-77 могут быть связаны с достаточно сильной пространственной анизотропией возмущения ионосферы. Радиотрасса Николаев – Москва простирается практически вдоль меридиана, тогда как радиотрасса Николаев – Майнфлинген – приблизительно вдоль параллели. Если ионосферное возмущение вытянуто преимущественно вдоль меридиана, то понятно, что сигналы на радиотрассе Николаев – Москва были подвергнуты наиболее сильному искажению.

На рис. 6 в течение одних суток 02.09.2004 в спокойных гелио-геомагнитных условиях и задолго до землетрясения с 30 секундным тактом представлена динамика изменения средней (по спутникам) разности групповых путей ($P2-P1$), полученная по данным наблюдений румынской станцией *bucu* (файл *bucu2460.04d.z*).

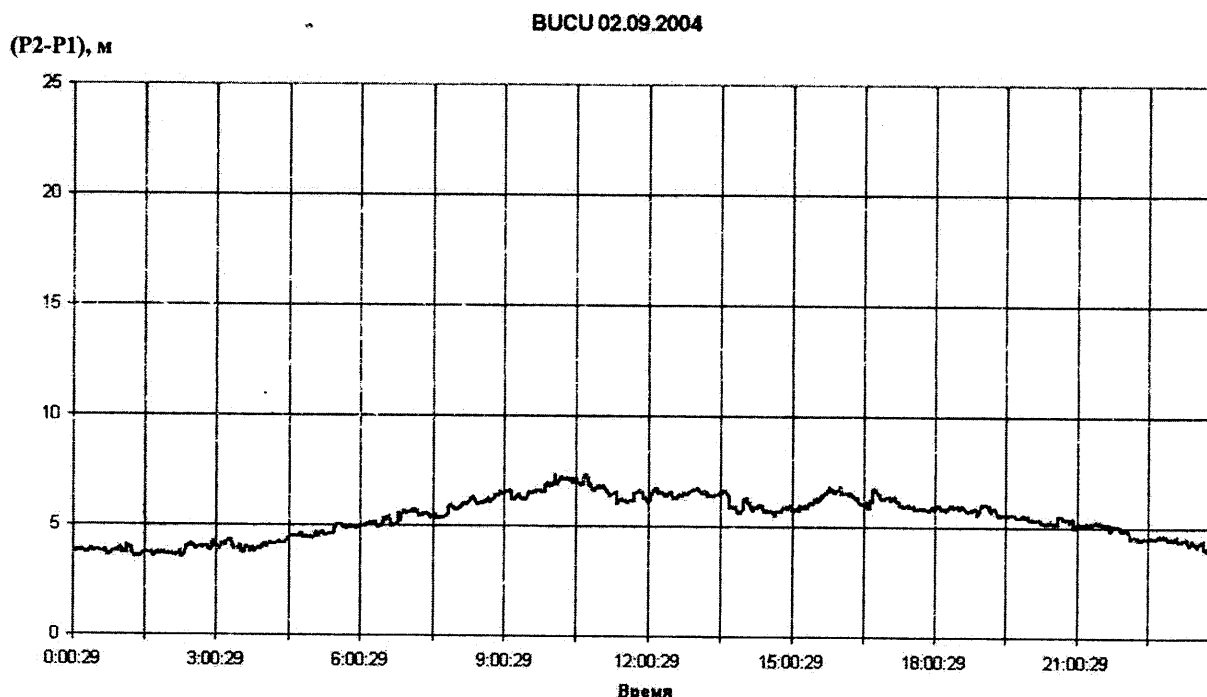


Рис. 6. Динамика изменений с 30-секундным тактом средней (по спутникам) разности групповых путей ($P2-P1$), наблюдавшаяся на GPS-станции *bucu* (Бухарест) 02.09.2004 в слабо возмущенных геофизических условиях

Как это следует из рисунка 6 и в соответствии с выражением (2), значения средней разности ($P2-P1$) в дневных условиях на радиотрассах превышают аналогичные величины в ночных условиях.

На рис. 7 в течение одних суток 25.10.2004 для спокойной гелио-геомагнитной обстановки, за два дня перед землетрясением, приведена подобным образом, как и представленная на рисунке 6, заготовленная по наблюдениям станции *bucu* (файл *bucu2990.04d.z*) сигнальная информация о средней (по спутникам) разности ($P2-P1$). Согласно данным, приведенным на рисунках 6 и 7, и в соответствии с выражением (2), следует, что 25.10.2003 действительно произошло заметное увеличение концентрации $DN(z)$ ионосферной плазмы над очагом подготовки землетрясения по сравнению с её регулярным значением $N_0(z)$, проиллюстрированным на рисунке 6, как в ночных, так и в дневных условиях на радиотрассах.

Для демонстрации динамики изменений концентрации ионосферной плазмы над очагом подготовки землетрясения на рис. 8 приведены средние значения ($P2-P1$) по полуденным траекториям спутника G7 для станции *bucu* (файлы *bucu2800.04d.z* ÷ *bucu3040.04d.z*).

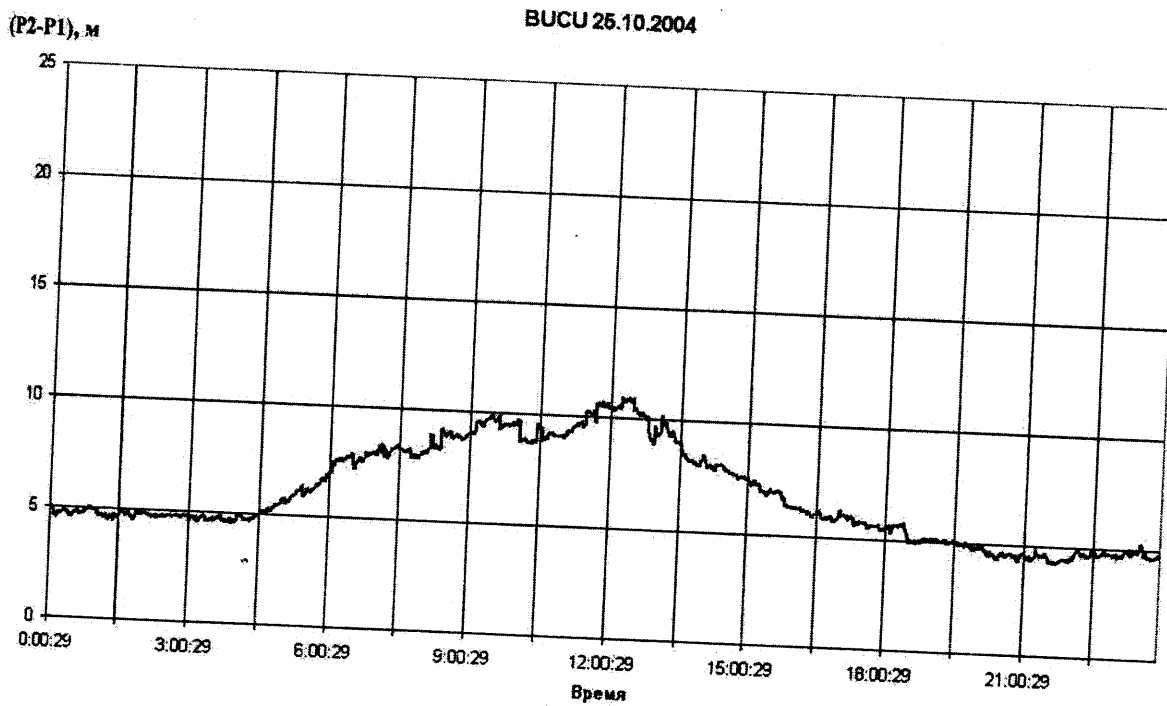


Рис. 7. Динамика изменений с 30-секундным тактом средней (по спутникам) разности групповых путей (P2-P1), наблюдавшаяся на GPS-станции вусу (Бухарест) 25.10.2004 в слабо возмущенных геофизических условиях за двое суток до землетрясения силой 5.9 балла

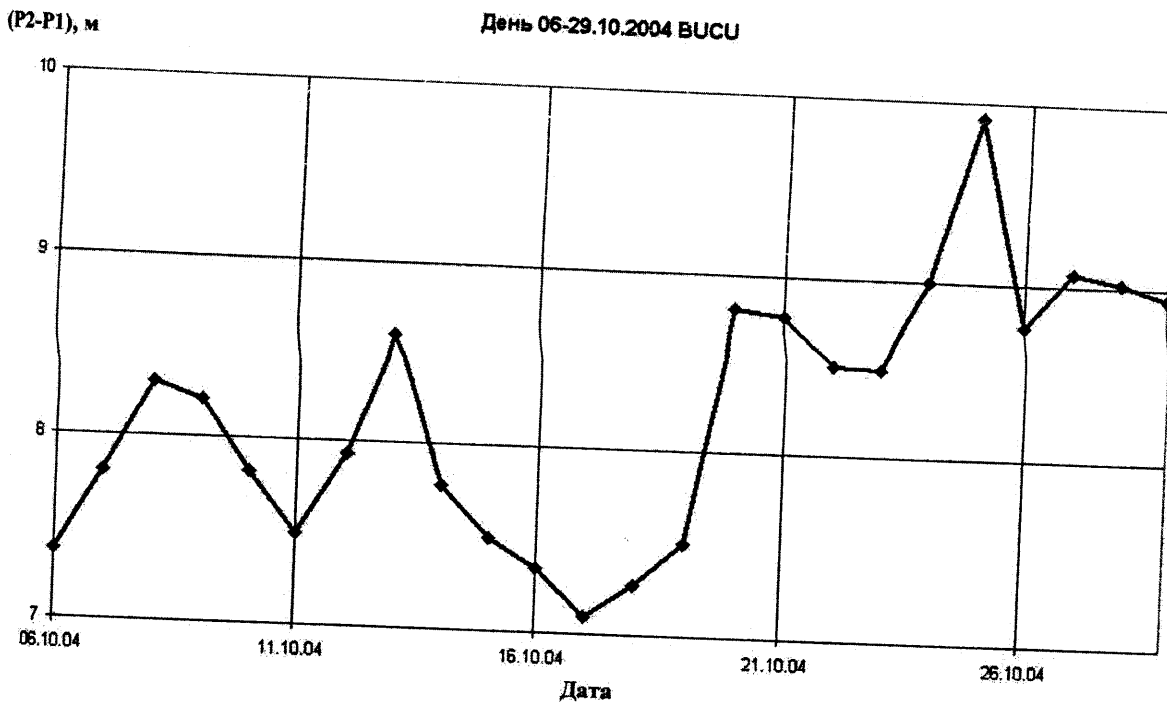


Рис. 8. Динамика изменений средних значений (P2-P1) по полуденным траекториям спутника G7, наблюдавшаяся на GPS-станции вусу (Бухарест) с 06.10 по 30.10.2004 г.

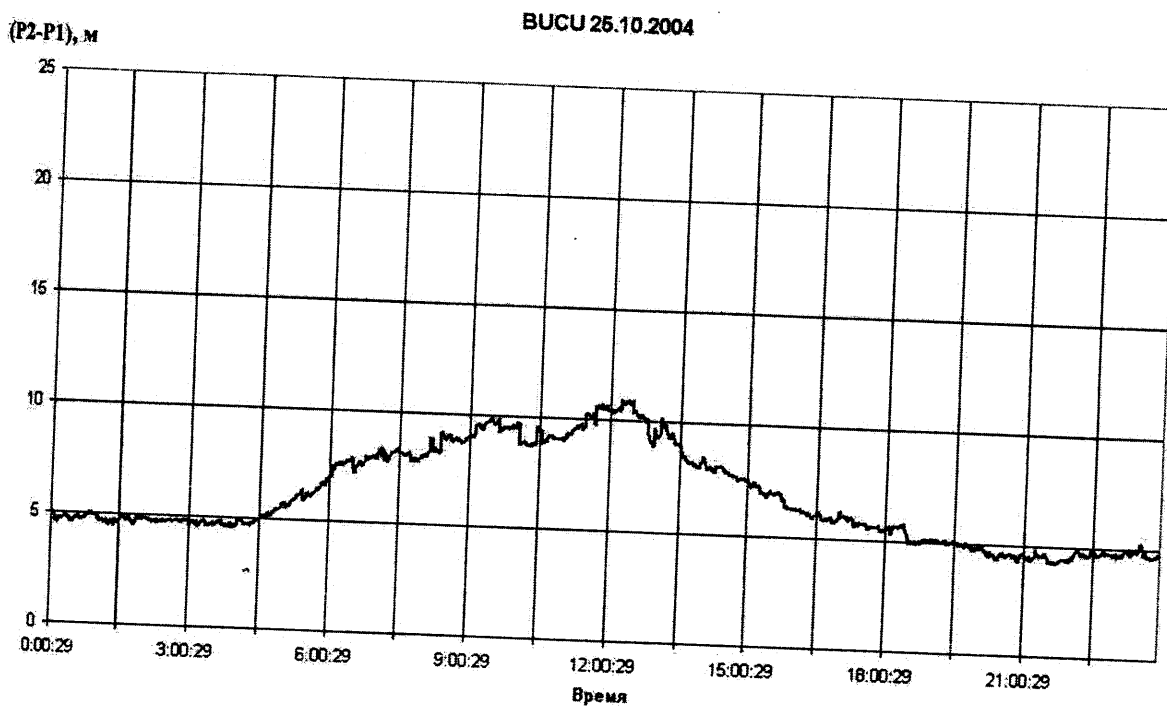


Рис. 7. Динамика изменений с 30-секундным тактом средней (по спутникам) разности групповых путей (P2-P1), наблюдавшаяся на GPS-станции вису (Бухарест) 25.10.2004 в слабо возмущенных геофизических условиях за двое суток до землетрясения силой 5.9 балла

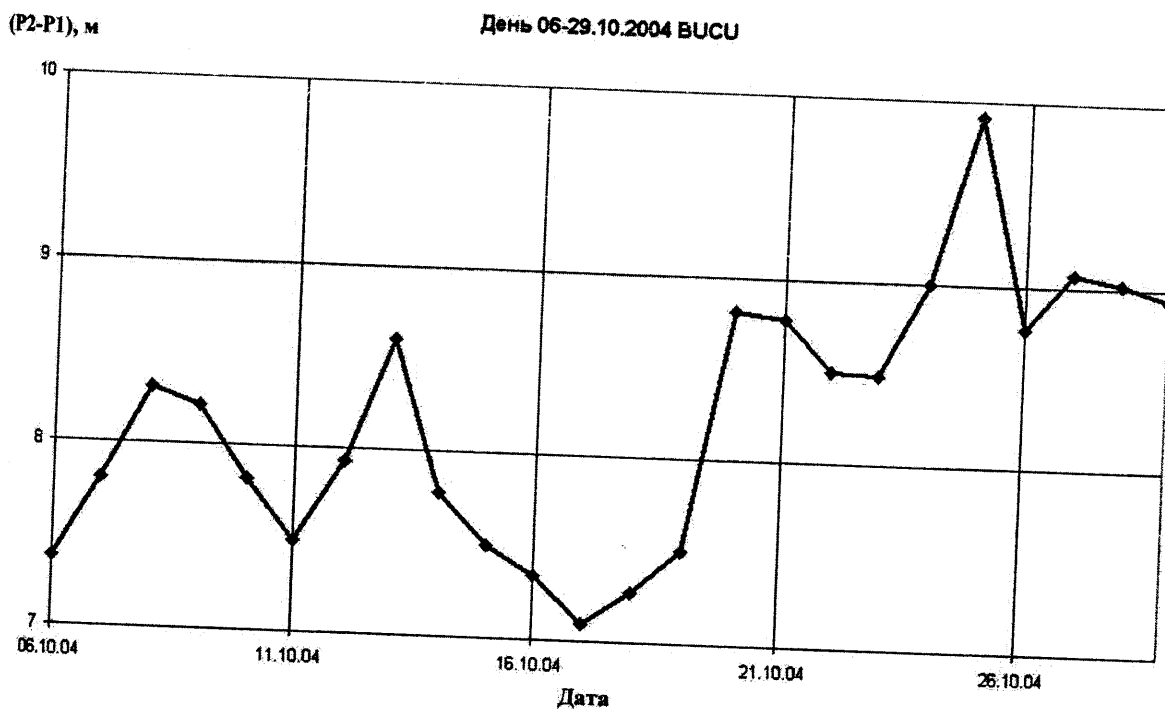


Рис. 8. Динамика изменений средних значений (P2-P1) по полуденным траекториям спутника G7, наблюдавшаяся на GPS-станции вису (Бухарест) с 06.10 по 30.10.2004 г.

Согласно данным на рисунке 8 следует, что заметный рост концентрации ионосферной плазмы начался за пять суток перед землетрясением. На рис. 9 представлена аналогичная информация, полученная по данным перманентной GPS-станции НИИ НАО (файлы mikl2800.04d.z ÷ mikl3040.04d.z).

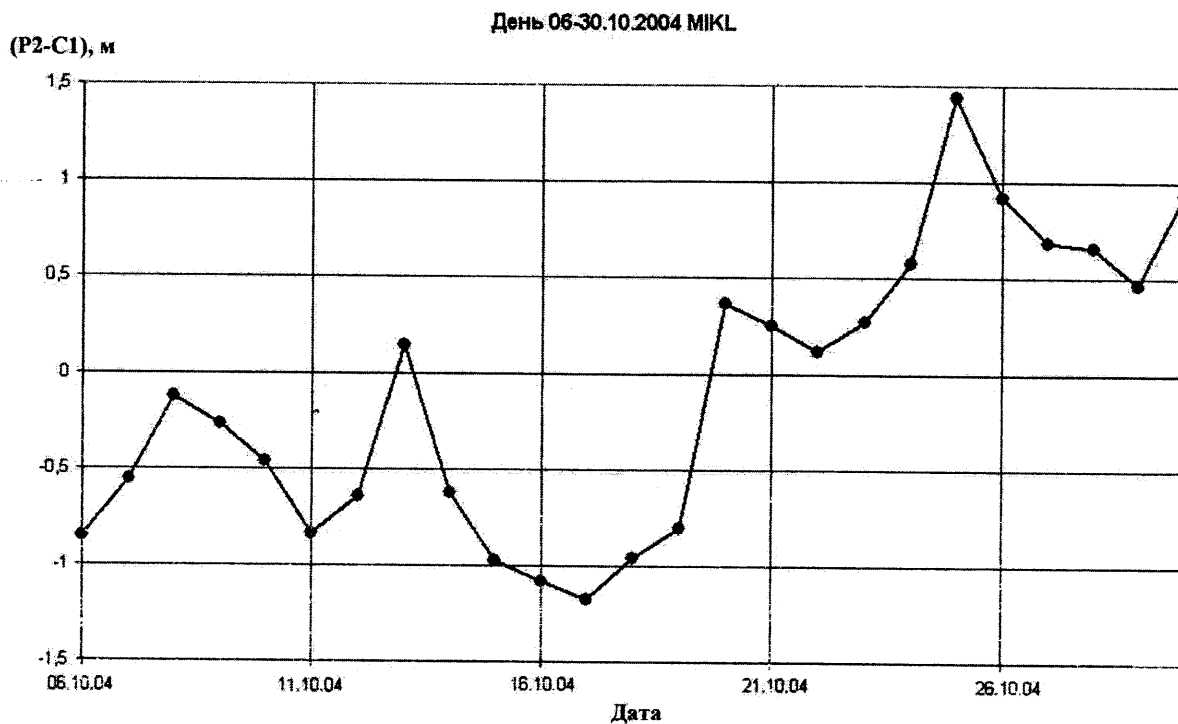


Рис. 9. Динамика изменений средних значений $(P2-C1)$ по полуденным траекториям спутника G7, наблюдавшаяся на GPS-станции mikl (НИИ НАО) с 06.10 по 30.10.2004 г.

Для станции mikl, в отличие от станции busu, не приводятся оценки псевдодальности $P1$. По этой причине на рис. 9 в качестве оценки разности $(P2-P1)$ даны значения $(P2-C1)$. Известно [6], что разность $(C1-P1)$ зависит от номера спутника и по модулю не превышает 1 м. Величины отклонений средних значений $(P2-P1)$ по данным приёмника GPS станцией НИИ НАО несколько меньше, чем на станции GPS в Бухаресте, что может указывать на уменьшение интенсивности возмущения ионосферы с удалением от очага подготовки землетрясения.

Заключение

Проводимые в НИИ НАО в режиме круглосуточного дежурства регулярные наблюдения состояния нижнего D-слоя ионосферы, по результатам анализа цифровой сигнальной информации СДВ передатчиков, совместно с анализом спутниковых данных системы GPS, представляют возможность их эффективного использования в таких прикладных целях как: текущий прогноз условий распространения коротких и средних радиоволн, изучение и контроль состояния солнечной активности, предсказание разрушительных землетрясений и др. Наличие достаточно плотной дислокации станций системы GPS, при соответствующей доработке программного обеспечения, позволяет надеяться на возможность локализации очагов подготовки землетрясений. При постановке дополнительных пунктов регистрации сигналов СДВ передатчиков и объединении подобных пунктов в общую систему также представит возможность локализации ионосферных возмущений и атмосферных возмущений над очагами подготовки землетрясений.

Таблиця 1

Список землетрясений, произошедших на интервале времени с апреля 2002 г. по октябрь 2004 в зоне Вранча (Румыния).

Дата	Время	Координаты, град.		Н, км	М	D, км
		θ	ϕ			
27.09.04	09:16:23	45.69	26.47	146	4.7	265
03.10.04	09:02:03	45.21	29.02	5	5.1	260
27.10.04	20:34:36	45.7	26.578	95	5.9	270/440

Література

1. Bushuev F.I, Obratsov Y.M., Slivinsky A.P., Shulga.V. Research of the ionosphere data for studying solar activity, earthquake forecasting and correction geodetic information GPS receivers. International conference research of artificial and other solar system bodies with CCD ground-based telescopes, may 17-20, 2004, Nikolaev, Ukraine.
2. Гохберг М.Б. и др. Ионосферные эффекты процессов подготовки сильных землетрясений. Препринт N, М., ИФЗ АН СССР, 1985, стр. 26.
3. Гуфельд И.Л., Маренко В.Ф., Пономарев Е.А., Ямпольский В.С. Исследование D-области ионосферы методом наклонного зондирования на сверхдлинных волнах // Сб. "Поиск электромагнитных предвестников землетрясений". – Москва: ИФЗ, 1988.
4. Бушуев Ф.И., Сливинский А.П. Предшествующие сильным землетрясениям возмущения амплитуд сигналов радиостанций служб точного времени // Сб. Extension and Connection of Reference Frames using CCD ground-based Technique, October 10-13, 2001, Nikolaev, Ukraine.
5. Воинов В.В., Гуфельд И.Л., Кругликов В.В., Ледовский И.С., Маренко В.Ф., Миранян Ф.П., Панаджян В.Г., Ямпольский В.С. Эффекты в ионосфере и атмосфере перед спитакским землетрясением 7 декабря 1988 г. Известия АН СССР, сер. Физика Земли, 1992, №3, с. 98 – 101.
6. Письмо "[IGSMail-2320] Handling mixed receiver types" на сайте <http://igscb.jpl.nasa.gov/mail/igsmail/1999/msg00564.html>. 1999 г.

Надійшла до редколегії 11.11.05.