

ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ ИОНОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ ДВУХЧАСТОТНЫХ GPS-ПРИЕМНИКОВ

К.В. Черкашин, Л.В. Козиенко

Иркутский государственный университет путей сообщения

c33c@mail.ru, leo@leoartz.com

Аннотация. В настоящей статье обсуждается методика и результаты диагностики состояния ионосферы по данным международной сети двухчастотных GPS-приемников. Рассмотрены основные этапы обработки спутниковых данных формата RINEX. В качестве примера приведены результаты анализа сигналов навигационных ИСЗ во время подземного ядерного взрыва в Северной Корее 25 мая 2009 г. и сейсмических событий в Японии 13 июня 2008 г.

Помимо практической задачи определения координат и скорости потребителей, спутниковые радионавигационные системы (СРНС) представляют большой интерес для научного сообщества. Ряд работ посвящен методам зондирования и диагностики трансионосферного радиоканала по сигналам системы GPS. Главной причиной, влияющей на качество функционирования СРНС, является изменение величины задержки радиосигналов при распространении в ионосфере и тропосфере. Величина задержки пропорциональна полному электронному содержанию (ПЭС) вдоль траектории распространения. Изменения ПЭС вызывают пропорциональные изменения фазы и искажения амплитуды радиосигнала. Значения ПЭС в ионосфере вычисляются по данным фазовых измерений. Использование двухчастотного режима позволяет компенсировать влияние ионосферных задержек и значительно повысить точность определения координат.

Для анализа сигналов системы GPS необходимо прежде получить данные от какой-либо региональной или международной сети GPS-приемников. Наибольшей популярностью и доступностью отличается международная сеть IGS (International GPS Service), данные которой хранятся в архиве SOPAC (Scripps Orbit and Permanent Array Center) [1] начиная с 1990 г. Доступ в архив возможен через стандартный Интернет-браузер (используется протокол HTTP) или специализированную программу, работающую с сервером напрямую через протокол FTP. Данные суточных наблюдений GPS-приемников за всеми видимыми спутниками записываются с общепринятым интервалом 30 с в файлы стандартного формата RINEX [2], которые содержат измерения псевдодальности P1 и P2 на частотах f_1 и f_2 , фазы сигналов L1, L2 и некоторые другие параметры.

Помимо IGS, можно обратиться к региональным GPS-сетям, некоторые из которых предоставляют информацию бесплатно.

Первичная обработка подразумевает извлечение (вычисление) необходимых параметров из исходных RINEX-файлов. Для этого используется программа TEQC (Translate / Edit / Quality Check) [3], которая «умеет» работать как с RINEX-файлами, так и со специальными форматами GPS-приемников (т.н. «сырые» данные). Программа не имеет привычного «оконного» интерфейса Windows и не является интерактивной – работа производится с помощью командной строки. В результате формируется набор ASCII-файлов COMPACT, содержащих рабочие параметры.

Этап первичной обработки включает в себя следующие шаги:

1) получение из Интернет данных в формате RINEX от сети двухчастотных GPS-станций;

2) обработка данных RINEX для получения навигационного файла и файла наблюдений (используется программа TEQC);

3) извлечение из навигационного файла и файла наблюдений данных об углах возвышения и азимутах спутников, величине временной задержки, ошибки определения координат и др.

Итогом первичной обработки является набор информационных параметров для каждого спутника, наблюдаемого двухчастотным приемником GPS-станции. Стандартный набор файлов COMPACT содержит: значения азимутов (файлы с расширением *.azi), углов возвышения (*.ele), величины среднеквадратичного отклонения на частотах L1 и L2 (*.mp1 и *.mp2), отношения сигнал/шум на частотах L1 и L2 (*.sn1 и *.sn2), значение полного электронного содержания (*.tec) и ее производной (*.ted), величины ионосферной задержки (*.ion), и ее производной (*.iod). Возможно также дополнительное вычисление координат GPS-станции в течение суток.

Основными задачами вторичной обработки является анализ данных в формате COMPACT для восстановления геометрии эксперимента и пространственно-временных параметров ПЭС при различных геофизических условиях, определение статистических характеристик погрешностей определения координат (σ), сглаживание временных рядов, снятие нелинейного тренда и др.

В качестве платформы для вторичной обработки данных выбрана среда MatLab, которая является мощным инструментом научно-технических расчетов. Наличие встроенного языка программирования, а также большого количества сторонних разработок (модулей) позволяет реализовать практически любые прикладные задачи. Модульная структура MatLab дает возможность наращивать и расширять функциональность пакета, путем разработки новых модулей по мере освоения новых исследовательских задач.

Диагностика состояния трансионосферного радиоканала на примере подземного ядерного взрыва

По сообщениям СМИ, 25 мая 2009 г. в 04:45 МСК на полигоне в районе города Кильчжу на северо-востоке КНДР, было испытано ядерное взрывное устройство. Согласно информации службы Специального контроля Министерства обороны РФ, сила подземного взрыва составила от 10 до 20 Кт. По данным геологической службы США U.S. Geological Survey (USGS) взрыв породил землетрясение магнитудой 4,7 балла по шкале Рихтера, при этом сейсмическая волна распространялась на глубине порядка 10 км и на поверхности Земли практически не ощущалась.

Для анализа ионосферных откликов события было выбрано пять рабочих GPS-станций (см. табл.1), находящихся в Южной Корее и Китае. По понятным причинам, получить какую-либо информацию непосредственно с территории КНДР не представляется возможным.

Табл.1 Рабочие GPS-станции.

Станция	Город	Широта, N	Долгота, E	Высота, м	Тип приемника
DAEJ	Daejeon	36,39942	127,37448	116.83	Trimble NETRS
OSN	Osan	37,07752	127,02388	48.94	Ashtech Z-XII3
SG26	Seoul	37,46250	126,95527	200.4	Trimble 4700
CHAN	Changchun	43, 79027	125,44305	268.3	Ashtech UZ-12
SUWN	Suwon-shi	37,27551	127, 05424	82.26	Trimble NETRS

Согласно информации USGS землетрясение произошло в 00:54:43 UTC, с координатами эпицентра 41.306^0 северной широты и 129.029^0 восточной долготы. Наилучшие условия для регистрации ионосферных откликов наблюдаются при прохождении трассы «спутник-приемник» в непосредственной близости от эпицентра события, с углами наблюдения свыше 60 градусов. Для восстановления пространственно-временной картины мы вычисляли проекции подионосферных точек SIP (Sub-Ionosphere Point) для спутников с наилучшими углами возвышения, как показано на рис.1. SIP представляет собой проекцию на земную поверхность точки, находящейся на высоте максимума F-слоя на трассе «спутник-приемник». Данные проекции позволяют оценить время регистрации и вероятную величину отклика на каждом луче.

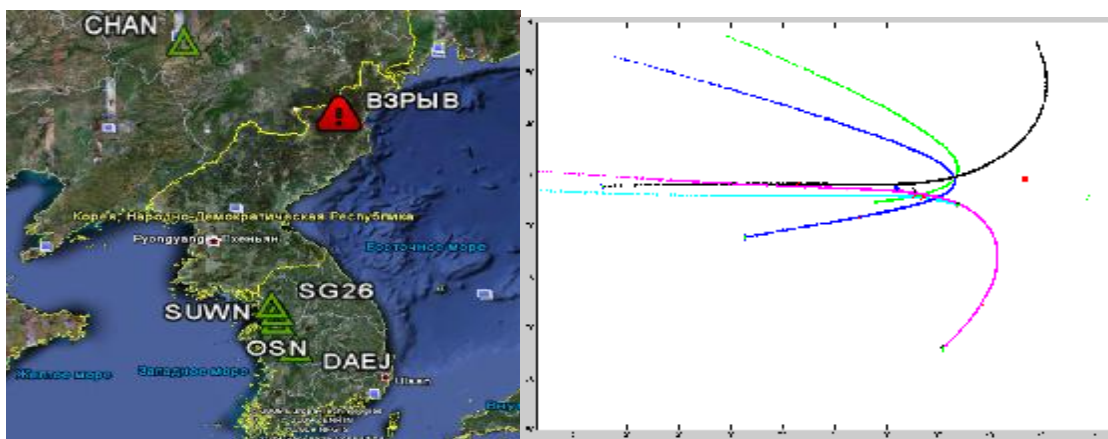


Рис.1 Координаты рабочих GPS-станций (слева) и проекции траекторий движения подионосферных точек SIP (справа).

По результатам первичной обработки определено, что наилучшими углами возвышения над станциями в момент события обладают спутники PRN 15, PRN 18, PRN 24, PRN 26 и PRN 27. Далее, получив необходимые данные с выбранного созвездия спутников, мы построили и проанализировали графики производной ПЭС по каждой из рабочих GPS-станций. В предыдущих исследованиях отмечается [4], что ионосферные эффекты, возникающие при взрывах, визуально схожи с возмущениями, генерируемыми землетрясениями. Выяснено, что скорость распространения возмущений на среднеширотных трассах составляет в среднем 600-800 м/с. Наиболее сильные эффекты взрывов наблюдаются при слабой геомагнитной активности. Акустические сигналы, зарегистрированные на земной поверхности на расстояниях больше 50 км, превращаются в волновой пакет с изменяющейся амплитудой.

Как видно на рис.2, наблюдаются возмущения производной ПЭС длительностью 25 мин и амплитудой 0.025-0.03 TECU через 20-30 мин. после взрыва, при этом колебания хорошо заметны и превышают обычный фоновый уровень. Анализ графиков производной ПЭС последующих и предыдущих дней подобных возмущений не выявил, как видно на рис.3 .

Так или иначе, ионосферное возмущение детектируется на всех рабочих станциях, при этом на станциях DAEJ и OSN наблюдается наибольший отклик. Производная ПЭС на всех графиках 25 мая имеет выраженную особенность. Для более подробного рассмотрения приведем графики PRN 15, PRN18, PRN 24 со станции DAEJ и графики PRN 26, PRN 27 со станции OSN. На всех графиках видно характерное возмущение между 140-170 отсчетами. На графике PRN 18 станции DAEJ возмущение наблюдается позже между 230-250 отсчетами, однако эта неоднородность имеет ту же амплитуду, что и неоднородности, зафиксированные на других графиках. На графике PRN 27 станции OSN,

всплеск около 150 отсчета не так заметен, однако наблюдается возмущение около 320 отсчета, схожее с возмущением с PRN 18 станции DAEJ.

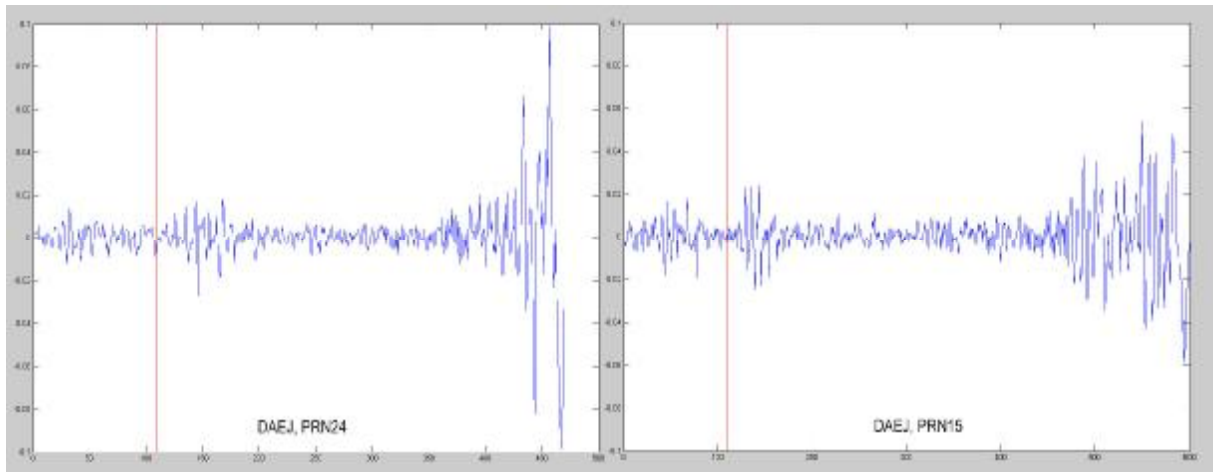


Рис.2 Значения производной ПЭС по данным PRN15 и PRN26 25 мая

Были рассмотрены графики с тех же спутников и станций за два дня до события. Единичные возмущения видны на графиках PRN 15 и PRN 18 в районе 90 отсчета, однако не стоит забывать, что спутники находились на более низких углах возвышения над станциями, соответственно и колебания производной ПЭС в районе этих отсчетов объясняются плохими условиями наблюдений. Графики производной ПЭС в течение двух дней после события отличаются небольшой амплитудой и отсутствием каких-либо серьезных возмущений.

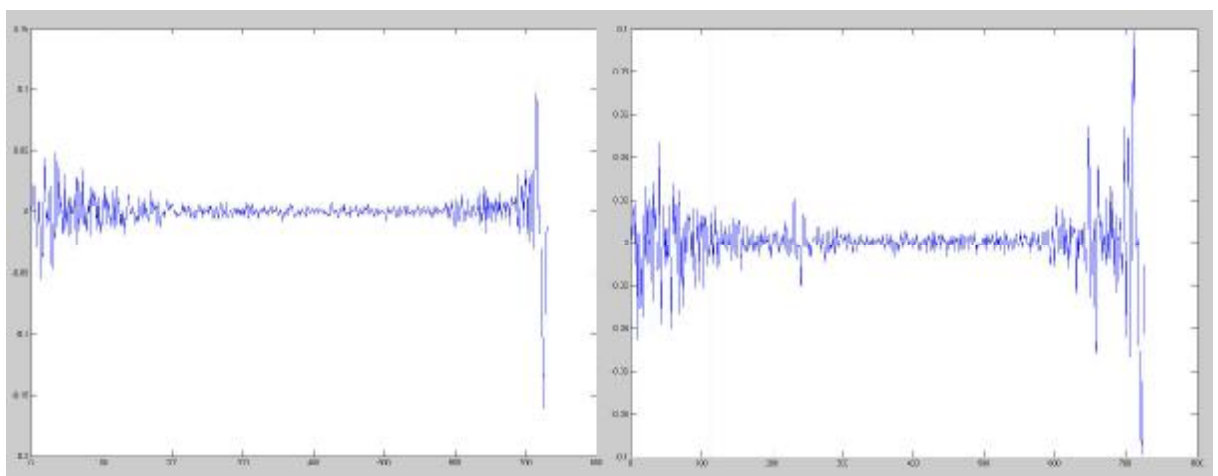


Рис.3 Значения производной ПЭС по данным PRN 26 станции OSN. Слева график производной ПЭС за день до события, справа – в день события

Анализ геомагнитных индексов (Ap, Am, Kp, Cp и C9) показывает, что рассматриваемый интервал времени с 23 по 27 мая можно отнести к периоду с низкой геомагнитной активностью. Как видно из рис.4 24 мая наблюдается увеличение индекса Kp до 2, в дальнейшем его значение падает до 1 и ниже. Поведение остальных индексов идентично.

Таким образом, можно сказать, что проведенное исследование выявило реакцию ионосферы на ядерный взрыв и последующее землетрясение. Полученные результаты, хорошо согласуются с данными, полученными в ходе других исследований.

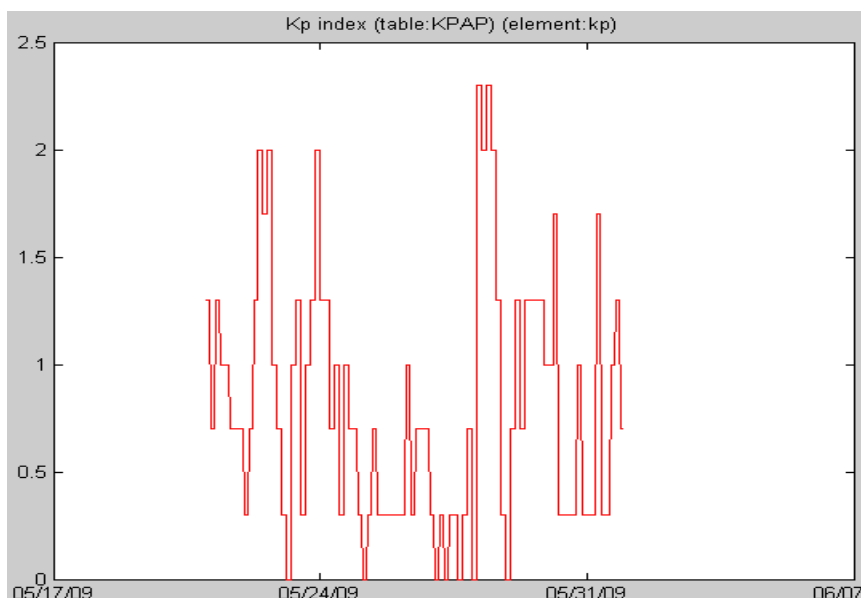


Рис.4 График изменения индекса геомагнитной активности Kp в период с 20 по 31 мая 2009 г.

Диагностика состояния трансionoсферного радиоканала на примере сейсмического события M>6.0

Согласно информации USGS, землетрясение магнитудой M=6.3 произошло в 23:43:46 UTC (08:43:46 LT) на глубине около 10 км, с координатами эпицентра 39.122° северной широты и 140.678° восточной долготы в северной части острова Хонсю. Информация о землетрясении взята из каталога геологической службы USGS, доступного в Интернет по адресу: http://earthquake.usgs.gov/recenteqsww/Quakes/quakes_all.html. Результаты измерений ПЭС получены от сети двухчастотных GPS-приемников, расположенных в районе землетрясения (табл.2).

Табл.2 Рабочие GPS-станции.

Станция	Город	Широта, N	Долгота, E	Высота, м	Тип приемника
G205	Ofunatoshi	39.01972	141,75306	47.04	Trimble 5700
019b	Sakataka	39,18556	139,54756	46.38	Trimble 5700
G105	Atsumi	38,56333	139,54583	45.53	Trimble 5700
G104	Oga	39,94194	139,70333	44.69	Trimble 5700
G106	Souma	37,83056	140,96222	48.89	Trimble 5700

На рис.5 показаны координаты рабочих GPS-станций, эпицентры землетрясений и обозначены проекции траекторий движения подионосферных точек SIP для соответствующих спутников, наблюдаемых с рабочих GPS-станций.

Обработав RINEX-файлы от каждой станции, было выяснено, что условия приема сигнала являются, как минимум, удовлетворительными. Наилучшие углы возвышения над станциями в момент землетрясения имеют спутники PRN 10 и PRN 26. PRN 10 в момент землетрясения находился на угле возвышения 60° , а PRN 26 – 40° .

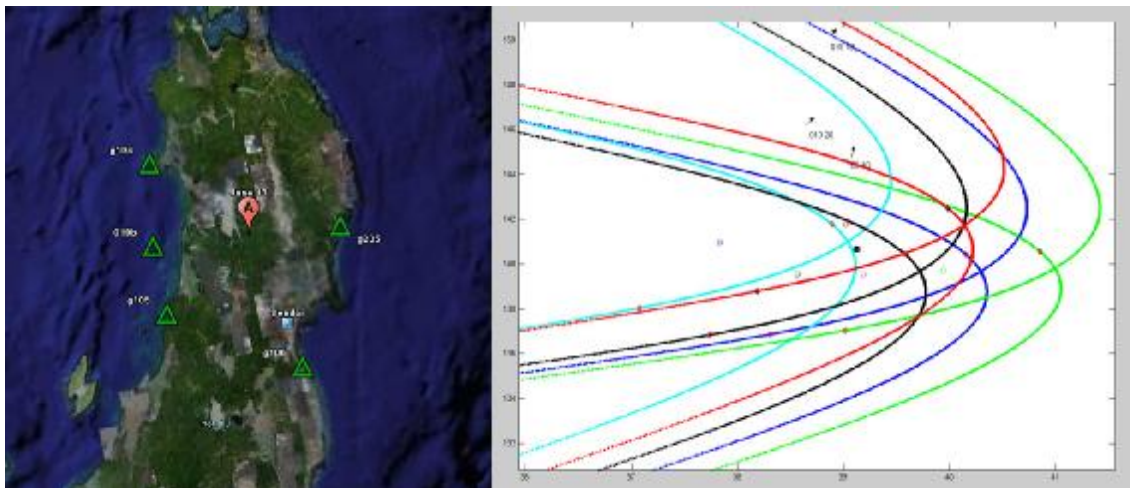


Рис.5 Координаты рабочих GPS-станций (слева) и проекции траекторий движения подионосферных точек SIP (справа).

Для анализа состояния ионосферы над сейсмоопасными регионами достаточно использовать результаты наблюдений за пять суток. Необходимо отметить, что имеющиеся в Интернет данные имеют достаточно низкое временное разрешение. GPS-приемники рабочих

станций принимают сигналы со спутников с общепринятым временным интервалом в 30 с, поэтому выявление быстроизменяющиеся процессов в ионосфере затруднено.

Значения производной ПЭС представлены на графиках рис.6. Производная ПЭС в день события при наблюдении как на PRN10, так и на PRN26 имеет своеобразный характер. Определенная неоднородность проявляется в промежутке между 200-300 отсчетами, она обладает большой амплитудой, W-образной формой и наблюдается в течении 100 отсчетов (50 мин). Во время землетрясения PRN26 находился прямо над неоднородностью, а на PRN10 она проявилась еще раньше. По этим данным можно сказать, что область к юго-западу от эпицентра землетрясения характеризуется W-аномалией. На наш взгляд, это возмущение в ионосфере связано с землетрясением, причем оно появилось еще за сутки до сейсмического события, о чем говорят графики за 164 день, где область аномалии сдвинута примерно на 40 отсчетов вправо относительно 165 дня, однако имеет ту же амплитуду и длительность, что и сейсмический отклик 165 дня. Рассматриваемая неоднородность надежно детектируется на PRN26 за сутки до сейсмического события, однако по PRN10 трудно сделать какие-то определенные выводы. Проанализировав данные этих же спутников за предыдущие дни, можно сказать, что подобных неоднородностей не наблюдалось.

Анализируя данные за 166 день, можно отметить большую амплитуду колебаний на графиках, как для PRN10, так и для PRN26. Характерные явления выделяются в районе 500 и 600 отсчетов. Возмущения сходны по форме, но имеют гораздо меньшую амплитуду и длительность, чем рассматриваемая выше аномалия. Такие явления вполне можно характеризовать как единичные всплески и связать их с чем-либо трудно.

Данные по геомагнитным индексам (Ap, Am, Kp, Cp и C9) дают основание отнести интервал времени с 11 по 14 июня (163-166 дни) к периоду низкой геомагнитной активности (величина индекса Kp изменялась в диапазоне от 0 до 1). Поэтому, наблюдаемые в ионосфере неоднородности могут быть вызваны эффектами сейсмического происхождения. 14 июня (166 день) во второй половине дня индекс Kp увеличивается до 3, а 15 июня (167 день) достигает значения 5,5. Поведение остальных индексов идентично. Все это говорит о начале слабой магнитной бури, с которой связаны последующие возмущения в ионосфере, наблюдаемые 15 и 16 июня.

Таким образом, определено формирование возмущенной зоны в ионосфере в течение 2-х дней до сейсмического события, окончательное оформление аномалии в день события и последующее ее исчезновение. Выявленные аномалии определены как изолированные ионосферные неоднородности (ИИН). Результаты предыдущих исследований говорят

о том, что в эпицентральных районах на стадии подготовки землетрясений наблюдаются вариации ПЭС, по форме и амплитуде аналогичные отклику на главный толчок. Для всех случаев характерен слабый или средний уровень геомагнитной возмущенности [4]. По исследуемому землетрясению можно надежно детектировать ИИН за сутки до события. Важно заметить, что ИИН наблюдается в темное время суток, когда вариации ПЭС, как правило, ниже. Считаем возможным предположить, что наблюдаемые явления в ионосфере, скорее всего, связаны с последующим землетрясением. Стоит отметить, что наблюдаемые после землетрясений, ударно-акустические волны (УАВ) в ходе исследования обнаружить не удалось. Единственное, что может быть определено, как УАВ - это всплеск на станции 019b, наблюдаемый PRN10 через 25 минут после землетрясения, что с трудом согласуется со средним временем появления УАВ, составляющим, как правило, 5-15 минут.

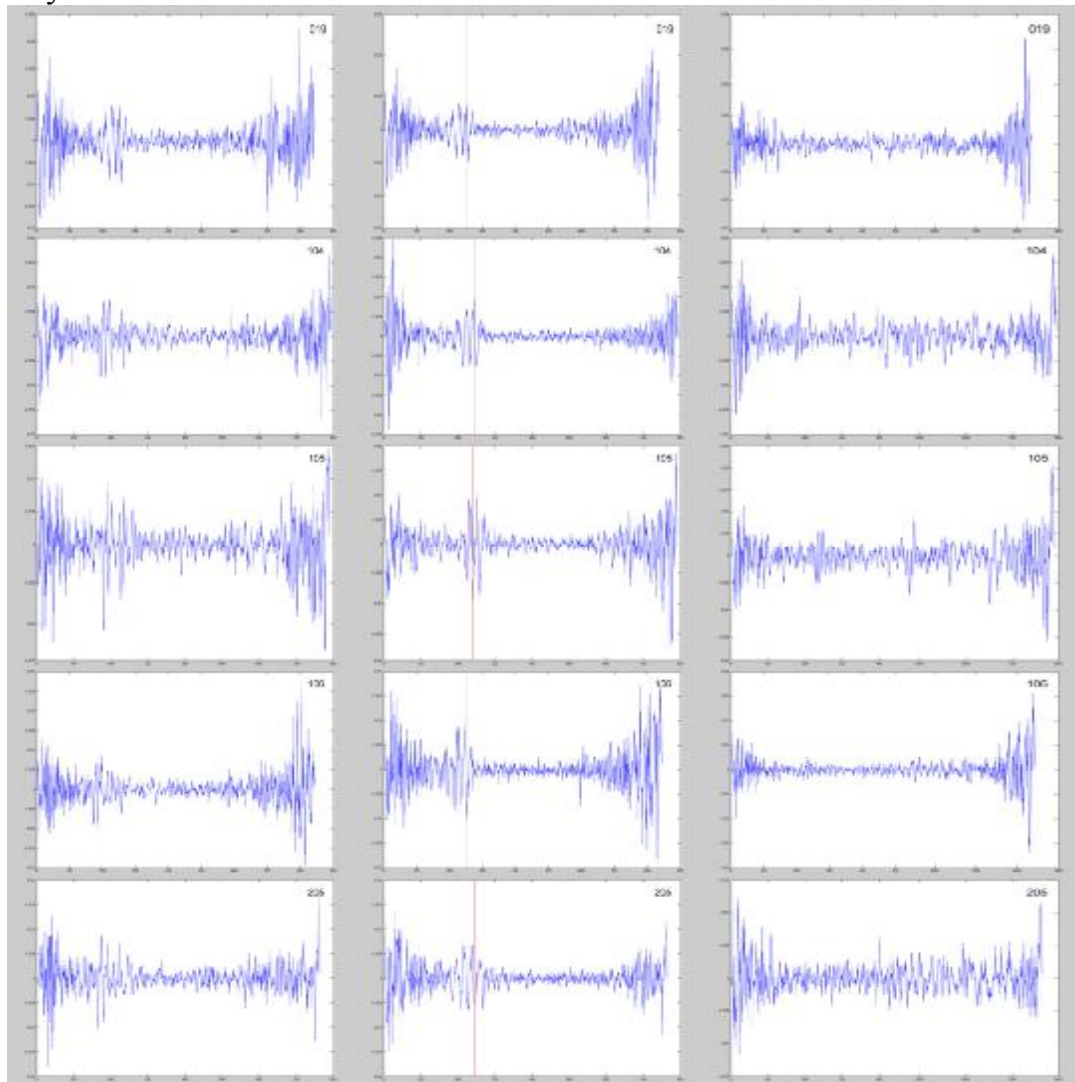


Рис.6 Значения производной ПЭС по данным PRN26 12-14 июня. Панель слева – 164 день, в центре – 165 и справа – 166 дни соответственно.

Выводы

Ранее в ходе исследований были выявлены проблемы, связанные с файлами спутниковых измерений, неподдающихся загрузке в среду MatLab для дальнейшей обработки. Проведенный анализ показал некоторые изменения в структуре заголовка СОМРАСТ-файлов, что и приводило к некорректному считыванию данных. После внесения изменений в модуль СОМРАСТ-load загрузка данных в MatLab проходила без проблем.

Тем не менее, получаемые из сети Интернет файлы RINEX не всегда поддаются обработке стандартными средствами. Ряд файлов наблюдений содержит данные, получаемые как от системы GPS, так и от ГЛОНАСС. Упомянутая ранее программа TEQC является универсальной по своим функциям, но не "умеет" обрабатывать подобные смешанные файлы. Аналоги программы TEQC имеют ограниченный инструментарий и зачастую предназначены для работы с GPS-приемниками конкретной фирмы (напр. Trimble). Кроме того, общепринятые 30 с временные интервалы не позволяют достаточно точно представить характер изменений ПЭС. Появляющиеся в Интернет пяти- и односекундные RINEX-файлы улучшают разрешающую способность от 6 до 30 раз соответственно, однако до сих пор не существует надежного, подобно TEQC инструментария, для работы с такими файлами.

Так же отмечается отсутствие или недостаточная функциональность программного обеспечения для вторичной обработки больших массивов данных. Наиболее серьезные по функциональности программы и модули MatLab представлены только в коммерческих версиях, при этом их стоимость доходит до \$7000 и выше. Программы, размещенные в свободном доступе (freeware и Opensource-проекты), значительно уступают им по функциональности и к тому же их немного. В основном, это утилиты для пересчета координат, построения орбит спутников и анализа временных рядов с использованием фильтров различного типа.

В целом темпы изменений в сфере обработки данных и совершенствование программного инструментария, позволяют надеяться, что методика диагностики состояния ионосферы по данным сети двухчастотных GPS-приемников будет востребована в научной среде.

Библиографический список

1. Scripps orbit and permanent array center [Электронный ресурс]. - Режим доступа: URL: <http://sopac.ucsd.edu/> (дата обращения: 1.10.09).

2. The Receiver Independent Exchange Format [Электронный ресурс]. - Режим доступа: URL: <http://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/data/format/rinex2.txt> (дата обращения 16.08.09)
3. TEQC: The toolkit for GPS/GLONASS Data [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://www.unavco.org/facility/software/teqc/teqc.html> (дата обращения 12.08.09)
4. Афраймович. Э. Л., Первалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: Изд-во ИЦ ВСИЦ СО РАН, 2006. 480 с.