

Комплексное исследование волновых процессов в ионосфере над Камчаткой

Богданов В.В.¹, Живетьев И.В.¹, Кайсин А.В.¹, Полюхова А.Л.¹,
Романов А.А.²

¹Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
Россия

²ОАО Российские космические системы, Россия
i.zhivetiev@gmail.com

Аннотация.

В работе представлены предварительные результаты одновременных наблюдений за состоянием ионосферы методами радиотомографии, GPS-зондирования и вертикального радиозондирования.

Введение.

Известно, что ионосфера земли чутко реагирует на изменения параметров солнечного излучения, изменения геомагнитного фона, а также на различные природные катастрофы (извержения вулканов, землетрясения, тайфуны). Изучению ионосферного отклика на такого рода воздействия посвящено много работ, однако постоянно совершенствующиеся инструменты сбора и обработки ионосферных данных, дополняют наши знания о характере и параметрах протекающих процессов. К таким динамично развивающимся инструментам можно отнести методы GPS-мониторинга [1] и томографии [2]. На п-ове Камчатка, во многом уникальном, благодаря своему географическому расположению, существует сеть станций GPS, которая уже была успешно использована в ряде экспериментов, а также недавно созданная цепочка томографических станций. Данная работа посвящена изучению возможностей совместного использования этих двух инструментов для получения новых данных о протекающих в ионосфере процессах в различных сезонных и геомагнитных условиях.

Метод исследования.

Процедура получения данных об ионосфере с помощью технологии GPS хорошо описана в [1]. Относительное приращение “наклонного” полного электронного содержания (ПЭС) I_0 определяется на основе измерений фазового пути трансionoсферного навигационного радиосигнала GPS:

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

где $f_1 = 1575.42$ МГц, $f_2 = 1227.6$ МГц, (λ_1, λ_2) - частоты (длины волн) навигационных радиосигналов GPS; $L_1 \lambda_1$ и $L_2 \lambda_2$ - приращения фазового пути радиосигналов, обусловленные их распространением в ионосфере (L_1 и L_2 - число полных оборотов фазы); $const$ - неизвестный начальный фазовый путь; nL - ошибка в определении фазового пути. Эксперимент состоял из нескольких этапов. Сначала ряды $I(t)$ исходного ПЭС сглаживались с временным окном 30 мин., и подвергались процедуре удаления тренда с окном 60 мин. Далее, из сформированных таким образом рядов приращений ПЭС $dI(t)$ выбирались данные высокого качества, полученные со спутника GPS, траектория которого характеризовалась наилучшими ракурсными условиями для регистрации перемещающегося

ионосферного возмущения (ПИБ). Затем, с использованием разработанного в [1] метода определялись скорость V и азимут α распространения ПИБ, отсчитываемый по часовой стрелке от севера N . Метод основан на расчете пространственных и временных градиентов электронной концентрации по измерениям ПЭС на трех разнесенных в пространстве наземных станциях GPS (GPS-решетке). В каждом случае использовалось максимально возможное количество решеток.

В свою очередь, томографическая реконструкция представляет собой обратную задачу: по данным о ПЭС вдоль луча "приемник-спутник" необходимо восстановить функцию пространственных переменных $(Ne)_{ij}$ в узлах заданной сетки. Интегральной характеристикой при радиопросвечивании ионосферы является полная фаза радиосигнала, пропорциональная ПЭС вдоль распространения луча зондирования, однако физически измеряется только фаза в пределах 2π , а количество полных циклов неизвестно, поэтому необходимо решать задачу определения начальной фазы. Авторами [3] был предложен метод фазоразностной томографии, его суть состоит в использовании производной фазы, которая не содержит неизвестную постоянную константу, соответствующую начальной фазе сигнала, в этом случае отпадает необходимость ее (константы) определения. Далее, по набору изменений интегральной характеристики формируется система алгебраических уравнений, которую можно решать различными способами. В данной работе для реконструкции реальных данных использовался Байесовский подход к решению задачи томографии [4].

Результаты.

С целью проведения исследования было отобрано несколько дней 2011 - 2012 г.г. (таблица 1), а затем, для выбранных дней был проведен анализ данных, полученных с помощью описанных методов томографии и GPS.

Таблица 1. Даты экспериментов

Дата	ΣKp	Время, UT	V , м/с	α , град.	Амплитуда, TECU
06.09.2011	14	01:00	608.1	118.3	0.4
19.09.2011	4	00:00	416.8	121.9	0.37
19.02.2012	23	00:00	231.8	180.4	0.4
20.02.2012	27	01:00	38.1	133.4	1.8
22.02.2012	18	02:00	160.8	177.3	1.2
23.04.2012	27	21:00	958.9	121.4	0.7
17.06.2012	37	11:00	233.0	190.6	1.4
15.07.2012	47	08:00	1697.1	125.2	1.5

Рассмотрим для примера 06.09.2011 г. Геомагнитная обстановка за этот день была спокойной (суммарный индекс $Kp = 14$). Геометрия эксперимента приведена на рис.1. Темно-серыми треугольниками показано положение станций камчатской региональной сети GPS, квадратами – положение томографических станций. Сплошными кривыми показаны траектории движения подионосферных точек для спутника GPS № 16 на высоте 250 км, длинным пунктиром – для спутника GPS № 13. Точками на траекториях показаны моменты времени t_{min} , соответствующие минимальным значениям отфильтрованных рядов ПЭС, знание этих моментов и соответствующих им координат позволяет оценить скорость V и азимут α перемещения возмущения ПЭС. Траектории томографических реконструкций показаны линиями с коротким пунктиром; на траекториях указано время реконструкции по UT.

На врезке рис. 1 изображён отфильтрованный в диапазоне 30-60 мин. ряд ПЭС dI , зарегистрированный на одной из станций GPS. Черной точкой показан момент времени t_{min} . Возмущение представляет собой колебание в форме уединенной волны, длительностью порядка 30 мин и амплитудой до 0.3 TECU. Подобные ряды были полученных для всех доступных на тот момент станций GPS. В свою очередь, такие данные были получены для всех рассматриваемых дней, и на их основе рассчитывались скорости и направления перемещения ионосферных возмущений. Результаты расчета приведены в таблице 1.

На рис. 2 показана томографическая реконструкция состояния ионосферы 06.09.2011 г. по данным двух спутников (COSMOS-2454 – 01:18, UT и COSMOS-2414 – 02:20, UT). Анализируя рис. 2 можно сделать вывод, что за время между пролетами двух спутников (~ 1 ч.) произошли заметные структурные и количественные изменения в распределении электронов над Камчаткой. По состоянию на 01:18, UT максимум концентрации электронов, равный приблизительно $4.5 \cdot 10^{11}$ эл./м⁻³, располагался достаточно равномерно на высоте ~ 250 км, через час (в 02:20, UT) область максимума сместилась к югу, а концентрация увеличилась до $\sim 5.5 \cdot 10^{11}$ эл./м⁻³. Северная граница этой области располагается на широте 54°, с увеличением широты концентрация на этой высоте спадает.

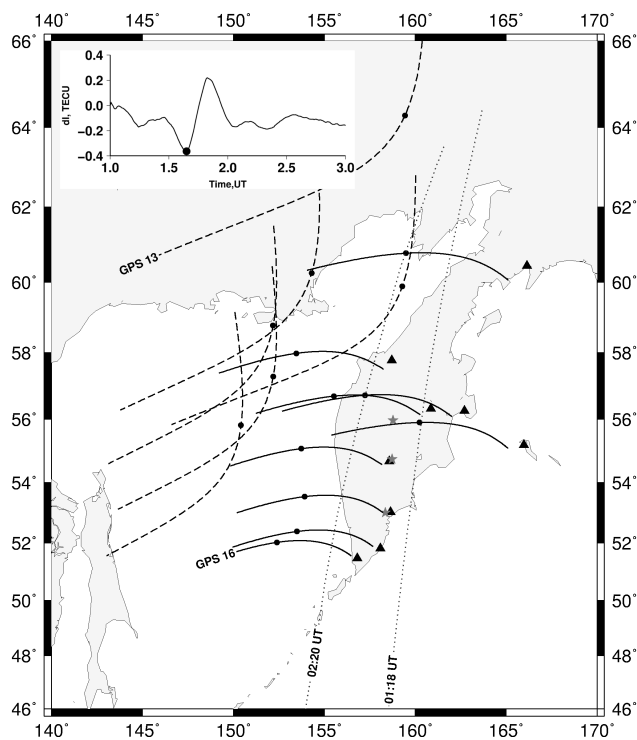


Рис. 1. Геометрия эксперимента

Таким образом, с помощью методов томографии мы можем оценить структурные и количественные изменения в электронной концентрации над рассматриваемым регионом, отметить наличие дрейфа максимума концентрации, в то время как технология GPS позволяет нам получить параметры скорости и направления перемещения этого дрейфа или возмущения.

Далее, с помощью методов вейвлет-анализа была предпринята попытка выделить высоты повышенной электронной концентрации, соответствующие корпускулярным слоям. На основе непосредственного анализа ионограмм определялся эффект высыпания заряженных частиц и фиксировался временной интервал, когда наблюдалось явление. Затем, исходные данные томографического зондирования (меридиональный разрез распределения электронов) обрабатывался базисным вейвлетом Добеши 3-го порядка.

На рис. 3 приведены графики распределения концентрации электронов, градиентов

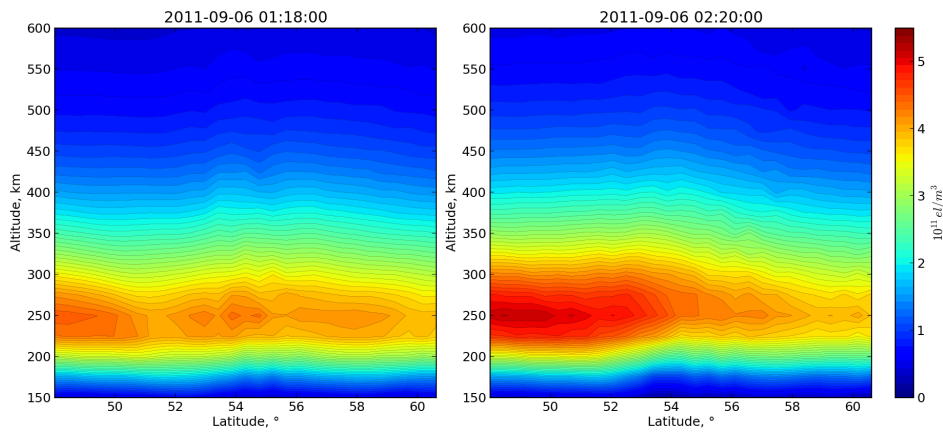


Рис. 2. Томографическая реконструкция на 06.09.2011 г.

концентрации и "градиентов" суммы коэффициентов вейвлет-разложения для широты близкой к широте с. Паратунка для пролета спутника в 12:32, UT за 19.02 2012 г. На рис. 3 видно, что если концентрация и градиент сохраняют нулевые значения до ~ 175 км, то "градиент" суммы отличен от нуля на высотах от 0 до 150 км и далее, но в целом, повторяет характер изменения градиента концентрации. Данный вопрос требует дальнейшего исследования.

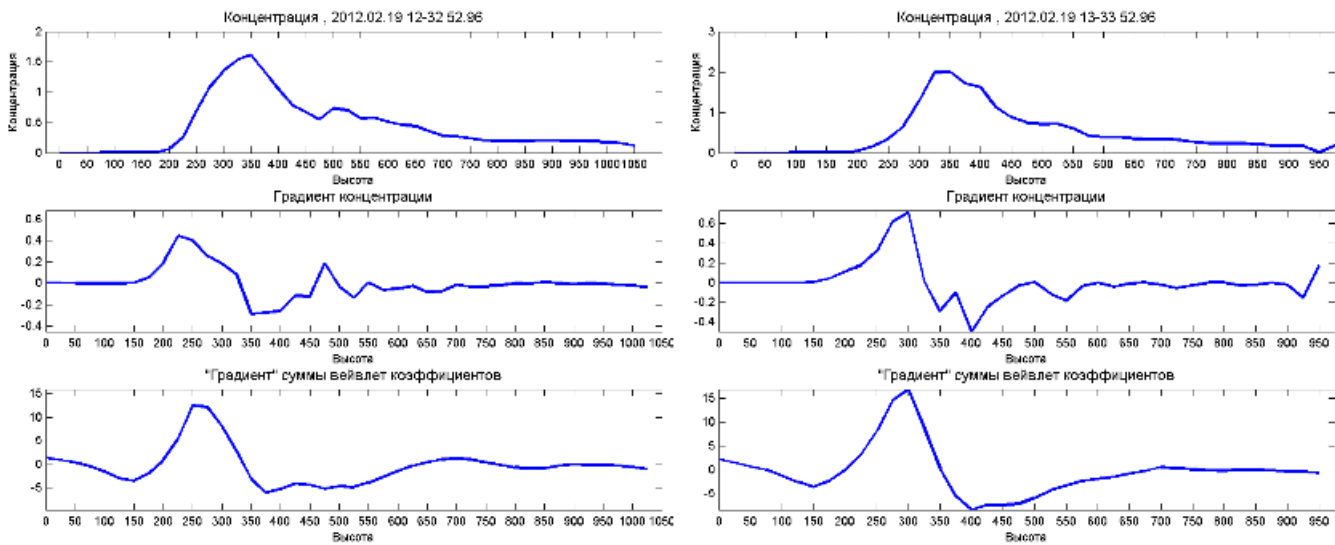


Рис. 3. Распределение концентрации электронов, градиентов концентрации и "градиентов" суммы коэффициентов вейвлет-разложения.

Заключение

Анализ томограмм позволяет сделать вывод, что ионосферная плазма подвержена быстрым изменениям в пространственном распределении с образованием плазменных сгустков повышенной плотности и их распада. Совмещение томографических методов с методом GPS-радиоинтерферометрии показывает, что изменения в пространственном распределении плазмы можно объяснить ее перемещением. Таким образом, с помощью методов томографии можно оценить структурные и количественные изменения в электронной концентрации над рассматриваемым регионом, отметить наличие дрейфа максимума концентрации, в то время как технология GPS позволяет нам получить параметры скорости и

направления перемещения этого дрейфа или возмущения. Полученные результаты говорят о перспективности дальнейших исследований.

Авторы выражают благодарность сотрудникам КФ ГС РАН за предоставленные данные камчатской региональной сети станций GPS. Работа выполнена в рамках программы президиума РАН № 12-1-П22-01, и при поддержке гранта РФФИ №11-05-00915.

Литература

1. *Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П.* GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН. 2006. 480 с.
2. *Романов А.А., Романов А.А., Трусов С.В., Урличич Ю.М.* Современные подходы к созданию автоматизированной системы регистрации ионосферных предвестников землетрясений по спутниковым данным // *Космонавтика и ракетостроение.* –2006. № 1. С. 167-172.
3. *Андреева Е.С., Куницын В.Е., Терещенко Е.Д.* Фазоразностная радиотомография ионосферы // *Геомagnetизм и аэрономия.* 1992. Т. 32. № 1. С. 104-110.
4. *Kunitsyn V., Tereshchenko E.* Ionospheric Tomography. Springer-Verlag. 2003. 272 p.

Complex study of wave processes in the ionosphere over Kamchatka

Bogdanov V.V.¹, Zhivetiev I.V.¹, Kaisin A.V.¹, Polukhova A.L.¹, Romanov A.A.²

¹ *Institute of Cosmophysical Researches and Radio Wave Propagation FEB RAS, Russia*

² *Russian Cosmic Systems, Russia*

The work presents preliminary results of simultaneous observations of ionosphere state by radio tomography, GPS radio interferometry and vertical radio sounding methods. The observations were carried out in moderate and disturbed geomagnetic conditions in winter (February), in spring (May), and in summer (June). Geomagnetic disturbance index was determined by magnetic measurements of Paratunka station (Kamchatka peninsula). On the basis of the data obtained by a network of tomographic stations, installed in meridional direction of Kamchatka peninsula, as well as of the data of Kamchatka regional GPS station network for the considered periods, moving ionospheric disturbances with amplitude up to 1.5 TECU, and periods of the order of 60 min were determined; they moved mainly in equatorial direction with up to 1000 m/s velocities. Application of vertical radio sounding methods allowed determination of charged particle corpuscular precipitation moments and approximately for this time electron distribution meridian section, corresponding to corpuscular layers, was determined by tomography methods. The obtained results allow us to consider future investigations to be perspective. This work is supported by RFBR, project 11-05-00915 and by RAS, project 12-1-P22-01.