

Э.Л. Афраимович, В.В. Кирюшкин, Н.П. Первалова, М.В. Маськин

Реконструкция пространственной структуры ионосферного возмущения по измерениям на густой GPS-сети GEONET

Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск

Поступила в редакцию 18.08.2006 г.

Представлена методика реконструкции пространственной структуры ионосферного возмущения, основанная на формировании мгновенной картины распределения приращений полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере, полученного по измерениям на сети GPS Earth Observation Network (GEONET), которая включает в себя более 1000 двухчастотных приемников GPS, установленных на территории Японии.

Реконструкция пространственной структуры возмущения осуществляется путем построения совокупности значений приращений ПЭС в ионосферных точках для заданного момента времени и аппроксимацией этой совокупности с помощью сплайнов на равномерную и стационарную сетку. Тестирование предложенной методики осуществлялось при восстановлении пространственной структуры возмущения, специально смоделированного для условий мощного землетрясения вблизи о. Хоккайдо 25 сентября 2003 г. Результаты тестирования показали, что предложенная методика позволяет восстановить пространственную структуру ионосферного возмущения и с высоким временным разрешением отследить динамику ее изменения.

Введение

В последние годы активно ведется разработка различных технологий использования глобальной навигационной системы GPS для дистанционной диагностики ионосферы. Развитие широко разветвленных сетей приемников GPS привело к тому, что в настоящее время ионосфера Земли просвечивается одновременно тысячами и десятками тысяч лучей «приемник – спутник». Возможность использования большого числа зондирующих лучей позволяет решать задачи восстановления пространственной структуры и временной динамики ионосферных возмущений различных классов.

На основе данных измерений GPS-приемников мировой геодинимической сети IGS создана технология GIM построения глобальных карт полного электронного содержания (ПЭС) [1]. Пространственное (5° по долготе, $2,5^\circ$ по широте) и временное (15–120 мин) разрешение карт GIM позволяет изучать крупномасштабные ионосферные процессы в спокойных и возмущенных условиях.

Для реконструкции пространственной структуры средне- и мелкомасштабных ионосферных возмущений требуется более густая сеть приемников, чтобы обеспечить необходимую точность интерполяции измерений ПЭС. В настоящее время таким информационным потенциалом обладают региональные сети GPS-приемников в Северной Америке, Европе и Японии. В Японии региональная сеть GEONET (<http://mekira.gsi.go.jp>; <http://terras.gsi.go.jp>) объединяет около 1000 наземных двухчастотных приемников GPS (количество лучей «приемник – спутник» достигает 4000–6000).

Авторы [2] с использованием данных сети GEONET построили двумерные карты возмущений ПЭС над Японией. Пространственное разрешение карт составило $0,15^\circ$ по широте и долготе; временное разрешение – 30 с. Карты формировались путем усреднения измерений приращений ПЭС, полученных для лучей «приемник – спутник» в пределах выбранной пространственной ячейки.

Наиболее перспективным для восстановления пространственной структуры ионосферных возмущений, на наш взгляд, является интерполяция индивидуальных отсчетов ПЭС с помощью сплайн-функций [3, 4]. Сплайн-интерполяция не ограничивает пространственное разрешение восстанавливаемой картины изначально выбранным размером ячейки. Мы представляем методику реконструкции пространственной структуры ионосферного возмущения путем интерполяции отсчетов ПЭС, полученных на густой сети GPS-приемников, с помощью сплайн-поверхности.

Исходные данные

С целью отработки методики исходные данные были синтезированы с учетом действительного расположения GPS-станций сети GEONET и реальных траекторий движения спутников GPS в интервале времени 19:00–21:18 UT, включающем в себя момент главного подземного толчка землетрясения вблизи о. Хоккайдо 23.09.2003; 19:50 UT. Координаты 429 приемных станций, принадлежащих сети GEONET, предоставлены нам профессором К. Heki (Hokkaido University). Положение этих станций обозначено треугольниками на рис. 1.

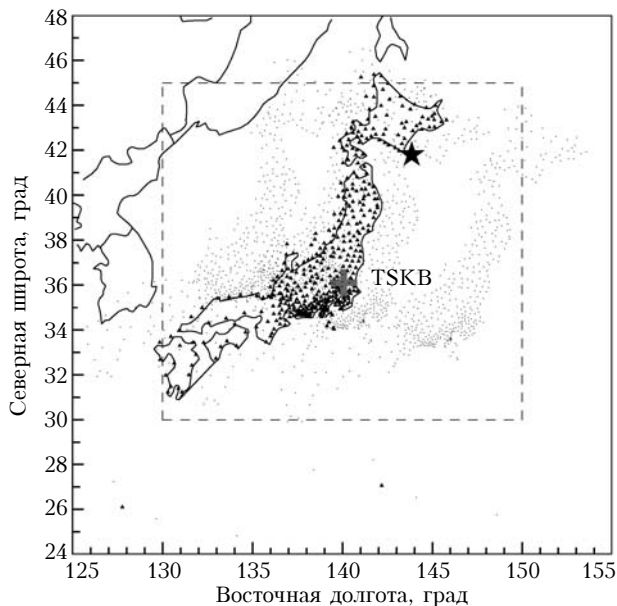


Рис. 1. Расположение приемных GPS-станций сети GEONET

Местоположение спутников GPS мы определяли по реальным данным измерений приемной станции TSKB (обозначена на рис. 1 крестиком). Станция TSKB входит в международную геодезическую сеть IGS, и ее измерения, наряду с измерениями других станций, принадлежащих сети IGS, в стандартном формате RINEX представлены для свободного пользования на сайте <http://sopac.ucsd.edu/cgi-bin/dbDataByDate.cgi>.

Данные RINEX-файлов станции TSKB были преобразованы во временные ряды значений азимута и угла места лучей, образованных приемником TSKB и спутниками с номерами PRN04, PRN10, PRN24, PRN27, которые находились в зоне его радиовидимости в интервале времени 19:00–21:18 UT. Поскольку все приемные станции сети GEONET расположены в узком широтно-долготном интервале, можно считать, что угловые характеристики лучей зрения «приемник – спутник» в пределах этого региона изменяются незначительно. Поэтому лучи, образованные станцией TSKB и спутниками PRN04, PRN10, PRN24, PRN27, были параллельно перенесены в точки расположения каждой из 429 приемных станций GPS сети GEONET. В результате указанных преобразований в выбранном регионе мы получили густую GPS-решетку, состоящую из $P = 1716$ лучей «приемник – спутник».

Моделирование измерений ПЭС

Измерения ПЭС вдоль каждого из P синтезированных лучей GPS-решетки были промоделированы с помощью разработанной в ИСЗФ СО РАН модели измерений ПЭС [5].

Модельное значение ПЭС $I_{j,k}$ вдоль j -го луча «приемник – спутник» для k -го отсчета времени определяется следующим выражением:

$$I_{j,k} = \int_0^D N(t_k, r, \alpha_{j,k}, \theta_{j,k}) dr, \quad (1)$$

где D – наклонная дальность по лучу «приемник – спутник»; $N(t_k, r, \alpha_{j,k}, \theta_{j,k})$ – локальная концентрация электронов; r – радиус-вектор точки на луче «приемник – спутник»; $\alpha_{j,k}$ и $\theta_{j,k}$ – соответственно азимут и угол места j -го луча «приемник – спутник» в k -й момент времени.

Модель электронной концентрации $N(t_k, r, \alpha_{j,k}, \theta_{j,k})$ учитывает высотное распределение ионизации, суточные и широтно-долготные изменения, которые определяются зенитным углом Солнца, а также нерегулярные возмущения меньшей амплитуды и пространственных масштабов.

Нерегулярную составляющую ионизации мы задавали в геоцентрической системе координат в виде сферической волны ионосферного возмущения, источник которой находится в точке с координатами Φ_e (широта), Λ_e (долгота), h_e (высота над поверхностью Земли):

$$N_d(t, R) = W_d(t, R) A_w \times \cos[\Omega_w(t - t_e) - K_w(R - R_e) + \varphi_0], \quad (2)$$

где R – радиус-вектор текущей точки на луче; $R_e = R_E + h_e$ – радиус-вектор источника возмущения, R_E – радиус Земли; A_w – амплитуда; $\Omega_w = 2\pi/T_w$ – частота; $K_w = 2\pi/(T_w V_w)$ – волновое число; T_w – период; V_w – фазовая скорость сферической волны возмущения; φ_0 – начальная фаза возмущения; $W_d(t, R)$ – модулирующая огибающая, позволяющая получить возмущение типа «волновой пакет».

Моделирование измерений ПЭС было проведено для ионосферных условий во время сильного землетрясения вблизи о. Хоккайдо 23.09.2003 г. Эпицентр землетрясения обозначен звездочкой на рис. 1 (<http://www.neic.cr.usgs.gov>). Уровень геомагнитной возмущенности во время землетрясения оказался вполне умеренным ($D_{st} = 0-21$ нТл, $K_p = 1-4$, <http://www.wdc.rl.ac.uk/cgi-bin/wdcl/secure/wdcldata>). В связи с этим при моделировании мы задали параметры регулярной составляющей ионизации, характерные для спокойной среднеширотной ионосферы.

Источник модельной сферической волны возмущения мы поместили в эпицентр землетрясения $\Phi_e = 41,8^\circ$ с.ш., $\Lambda_e = 143,85^\circ$ в.д. на высоте максимума ионизации ионосферы $h_e = 350$ км. Это соответствует представлению о генерации во время землетрясения ионосферных возмущений от вторичного источника, расположенного над эпицентром на высотах 200–300 км [5, 6] и согласуется с результатами ранее проведенных исследований по локализации источника ионосферного возмущения, обусловленного землетрясением вблизи о. Хоккайдо [7].

Время включения источника сферического возмущения соответствует моменту главного подземного толчка $t_e = 19:50$ UT, а параметры самого возмущения характерны для волновых ионосферных неоднородностей, вызванных прохождением ударной акустической волны, генерированной при поршнеобразном движении земной коры [5, 7]: $A_w = 15\%$, $V_w = 1000$ м/с, $T_w = 10$ мин, $\varphi_0 = 0$.

На рис. 2, *a–z* приведены примеры временных изменений модельных значений «наклонного» (т.е. измеренного вдоль наклонного луча) ПЭС $I_j(t_k)$ для четырех лучей «приемник – спутник». Общепринятой единицей измерения ПЭС является TECU (Total Electron Content Unit), равная $10^{16} \cdot \text{м}^{-2}$. Можно видеть, что на фоне медленных изменений ПЭС (тренда) наблюдаются высокочастотные вариации, обусловленные прохождением волны ионосферного возмущения.

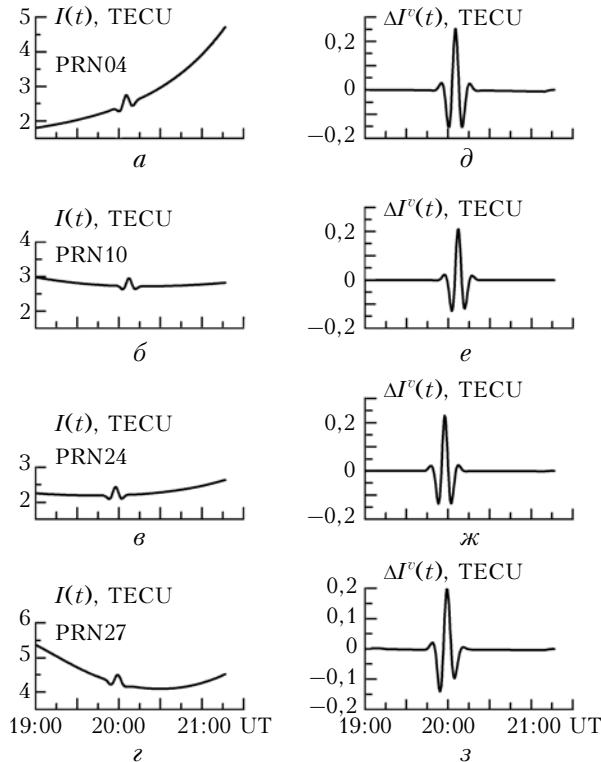


Рис. 2. Временные вариации модельных значений «наклонного» ПЭС (*a–z*) и приращений «вертикального» ПЭС (*д–з*)

Методика реконструкции пространственной структуры ионосферного возмущения

Считается, что значение ПЭС, полученного на луче «приемник – спутник», соответствует ионосферной точке – точке пересечения луча с плоскостью на высоте максимума ионизации. Геоцентрические координаты $(\Phi_{j,k}, \Lambda_{j,k})$ ионосферной точки рассчитываются на основе известных координат приемных станций GPS, значений азимута и угла места луча [5].

Величины «наклонного» $I_j(t_k)$ ПЭС мы преобразовывали в эквивалентные «вертикальные» $I_j^v(t_k)$ [5]. Для выделения приращений ПЭС, обусловленных распространением волны возмущения, мы отфильтровали полученные временные ряды значений «вертикального» ПЭС с помощью процедуры удаления тренда с временным окном 10 мин, соответствующим периоду модельной сферической волны. В результате фильтрации мы получили временные ряды $\Delta I_j^v(t_k)$ приращений «вертикального» ПЭС в соответствующих

ионосферных точках $(\Phi_{j,k}, \Lambda_{j,k})$. Графики приращений «вертикального» ПЭС $\Delta I_j^v(t_k)$ для четырех лучей «приемник – спутник» приведены на рис. 2, *д–з*.

Формирование мгновенной картины возмущения ПЭС в момент времени $t_k = t_x$ мы осуществляли путем выборки из всех полученных рядов значений $\Delta I_{j,x}^v$ и $(\Phi_{j,k}, \Lambda_{j,k})$ ($j = 1, \dots, P$). Пространственное распределение ионосферных точек для момента времени $t_x = 20:00$ UT представлено на рис. 1 точками. Регион, полностью охваченный пространственными отсчетами приращений ПЭС, лежит в пределах $30–45^\circ$ по широте и $130–150^\circ$ по долготе (обозначен на рис. 1 пунктирными линиями). Именно в этом регионе мы восстанавливали пространственную структуру ионосферного возмущения.

Однако ионосферные точки распределены в рассматриваемом регионе неравномерно, так как сами приемные станции GPS размещены неупорядоченно. Кроме того, угловые характеристики лучей «приемник – спутник» меняются с течением времени вследствие движения спутников GPS по орбите, что также вызывает изменение координат ионосферных точек. Таким образом, отсчеты приращений ПЭС получены на неравномерной и нестационарной сетке измерений. Для интерполяции полученных отсчетов мы использовали сплайн-поверхность, которая представляет собой пространственный аналог одномерного сплайна [3, 4].

Применительно к задаче восстановления пространственной функции распределения приращений ПЭС $\Delta I(\Phi, \Lambda)$ в широтно-долготном интервале по значениям, заданным в P узловых ионосферных точках, функцию сплайн-поверхности [4] можно записать в виде

$$\Delta I(\Phi, \Lambda) = \sum_{i=1}^P c_i r_i^2 \ln r_i^2 + c_{P+1} + c_{P+2} \Phi + c_{P+3} \Lambda, \quad (3)$$

где $r_i^2 = (\Phi - \Phi_i)^2 + (\Lambda - \Lambda_i)^2$ – расстояние от произвольной точки до i -го узла; c_i – коэффициенты сплайна. Коэффициенты c_i , $j = 1, \dots, (P+3)$, значения которых и определяют сплайн-поверхность $\Delta I(\Phi, \Lambda)$, находятся из решения системы линейных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \Delta I(\Phi_j, \Lambda_j) &= \sum_{i=1}^P c_i r_{ij}^2 \ln r_{ij}^2 + c_{P+1} + \\ &+ c_{P+2} \Phi_j + c_{P+3} \Lambda_j = \Delta I_j^v, \quad j = 1, \dots, P; \\ \sum_{i=1}^P c_i &= 0; \quad \sum_{i=1}^P \Phi_i c_i = 0; \quad \sum_{i=1}^P \Lambda_i c_i = 0; \\ r_{ij}^2 &= (\Phi_j - \Phi_i)^2 + (\Lambda_j - \Lambda_i)^2. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Решение этой системы существует, если $P > 3$, и является единственным, если среди точек (Φ_j, Λ_j) , $j = 1, \dots, P$, имеются хотя бы три точки, не лежащие на одной прямой [4].

Результаты и обсуждение

Для оценки качества восстановления пространственной структуры ионосферного возмущения с использованием разработанного метода мы сравнивали

картины распределения приращений ПЭС, полученные после интерполяции значений в ионосферных точках, с эталонными картинками для соответствующих моментов времени.

Эталонные картины мы формировали путем моделирования значений ПЭС вдоль вертикальных лучей, расположенных в узлах (точки на рис. 3, *а*) равномерной сетки (шаг сетки $0,5^\circ$).

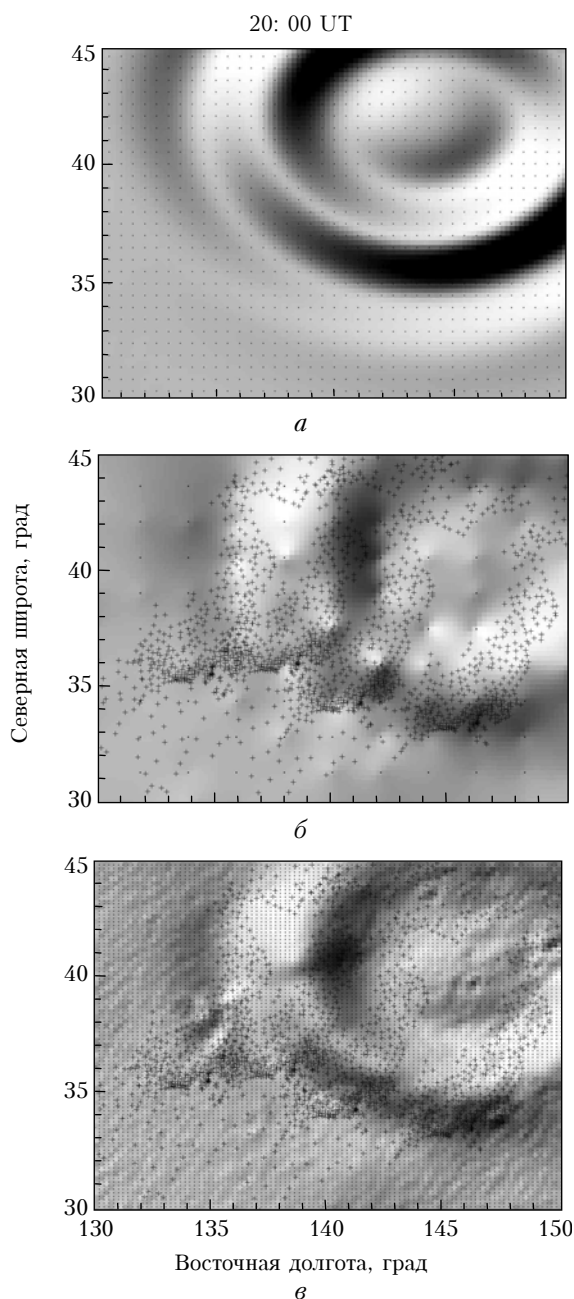


Рис. 3. Эталонная (*а*) и восстановленные с помощью сплайн-интерполяции (*б–в*) структуры возмущения ПЭС

Значения параметров модели были выбраны теми же, что и при моделировании измерений ПЭС. Эталонная картина пространственной структуры ионосферного возмущения для момента времени $t = 20:00$ UT представлена на рис. 3, *а*. Видно, что

возмущение носит характер кольцевых волн, расходящихся от ярко выраженного центра, положение которого совпадает с эпицентром землетрясения. Амплитуда возмущения составляет $0,2$ TECU, радиус — около 550 км.

Пространственная функция поля, полученная путем сплайн-интерполяции исходных значений приращений ПЭС в ионосферных точках, показана на рис. 3, *б, в* (положения ионосферных точек обозначены крестиками). Сплайн-поверхность $\Delta I(\Phi, \Lambda)$ дает возможность вычислить значения приращений ПЭС в любой точке заданного региона. Для получения изображения мы рассчитывали вариации ПЭС в узлах (точки на рис. 3, *б, в*) равномерной сетки, единой для всех моментов времени в интервале $19:00–21:18$ UT. На рис. 3, *б* показана функция, восстановленная на сетке, содержащей 10 точек по широте и 10 точек по долготе (10×10), а на рис. 3, *в* — соответственно на сетке 100×100 .

Сравнение вариаций ПЭС, приведенных на рис. 3, *б, в*, с эталонной картинкой для того же момента времени показывает, что в обоих случаях восстановление пространственной структуры возмущения осуществляется адекватно. Реконструированное возмущение также носит характер расходящихся концентрических кольцевых волн. Амплитуда и радиус восстановленного возмущения совпадают с соответствующими величинами на эталонной картине.

На качество восстановления пространственной структуры ионосферного возмущения влияет конфигурация сетки. При более густой сетке возрастает методическая погрешность в виде мелкомасштабной шумовой структуры. Тем не менее восстановление самого возмущения при этом осуществляется более корректно, о чем свидетельствуют ярко выраженный гребень основного максимума возмущения и хорошо различимый максимум в его центре.

Рис. 4, *д–з* иллюстрирует временную динамику ионосферного возмущения для моментов времени $19:51$, $19:54$, $20:00$ и $20:06$ UT (сетка 100×100). Видно, что с течением времени постепенно формируются первый, второй и третий максимумы волны возмущения, увеличиваются амплитуда волны, а также радиус ее распространения относительно центра. Полученная динамика соответствует эталонной картине (рис. 4, *а–з*).

Анализ рис. 4 показывает, что разработанная методика может быть использована как дополнительный метод определения параметров распространения ионосферного возмущения, для чего достаточно проанализировать кросскорреляционную функцию между двумя картинками пространственного распределения приращений ПЭС для различных моментов времени.

Заключение

В статье представлена методика реконструкции пространственной структуры ионосферного возмущения, основанная на пространственной сплайн-интерполяции индивидуальных отсчетов приращений

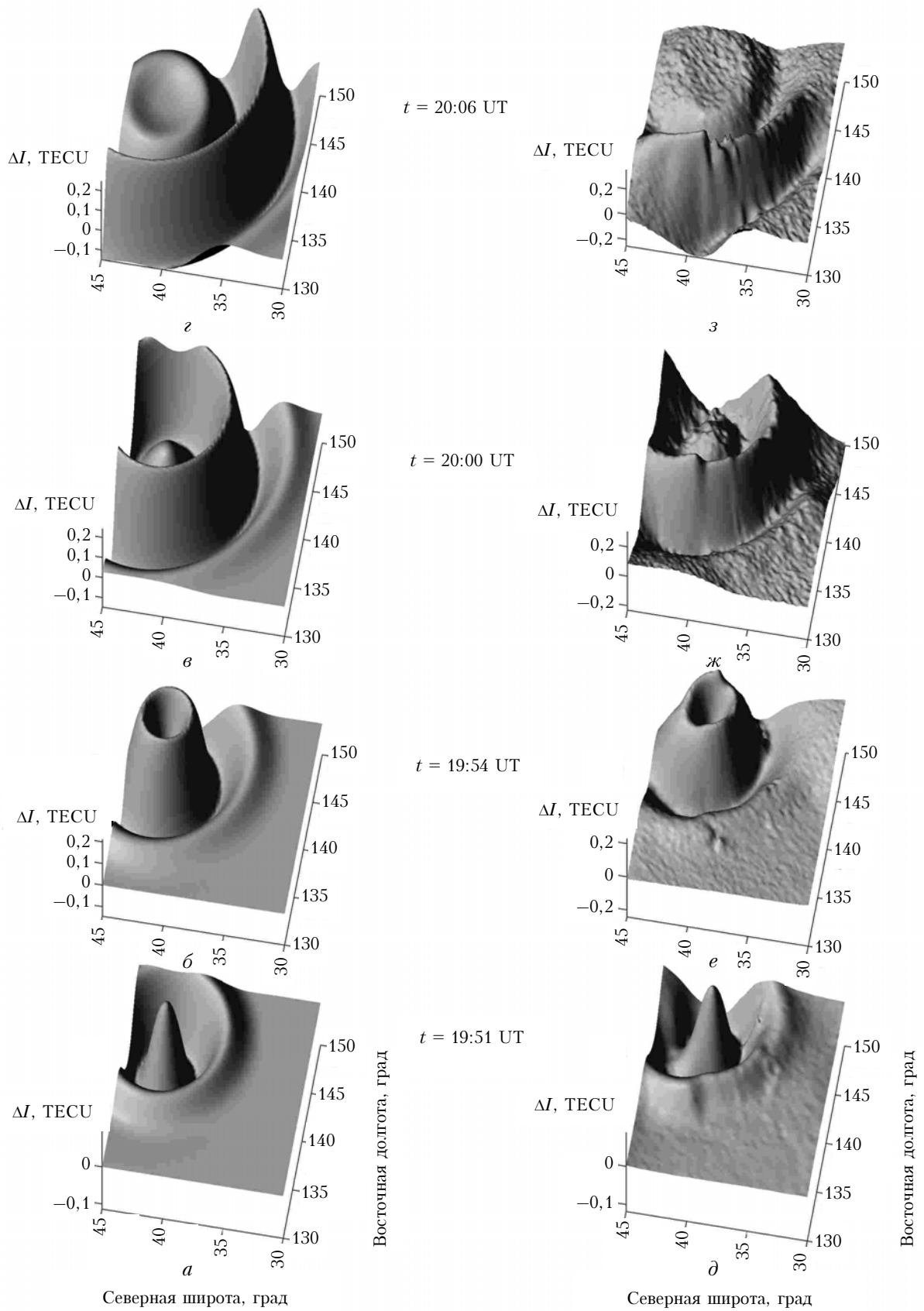


Рис. 4. Временная динамика ионосферного возмущения: эталонная картина (а–г); структура, восстановленная с помощью сплайн-интерполяции (д–з)

ПЭС, полученных по измерениям на густой сети приемников GPS. При реконструкции вариации ПЭС пересчитываются в «вертикальное» значение и подвергаются фильтрации. Совокупность отсчетов, выбранных из всех рядов в некоторый момент времени, аппроксимируется сплайн-поверхностью.

Тестирование предложенной методики осуществлялось при восстановлении пространственной структуры возмущения, смоделированного для условий мощного землетрясения вблизи о. Хоккайдо 25.09.2003 г. При этом восстановленная с помощью сплайн-интерполяции структура ионосферного возмущения сравнивались с эталонной картиной вариаций ПЭС. Результаты тестирования показали, что предложенная методика позволяет восстановить пространственную структуру ионосферного возмущения и с высоким временным разрешением отследить динамику ее изменения.

Авторы выражают благодарность профессору К. Нэки (Hokkaido University) за предоставление координат приемных станций сети GEONET.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты

№ 05-05-64634 и 06-05-64577), а также интеграционного проекта СО РАН № 3.24.

1. *Mannucci A.J., Ho C.M., Lindqwister U.J.* A global mapping technique for GPS-driven ionospheric TEC measurements // *Radio Sci.* 1998. V. 33. N 8. P. 565–582.
2. *Saito A., Fukao S., Miyazaki S.* High resolution mapping of TEC perturbations with the GSI GPS network over Japan // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. N 16. P. 3079–3082.
3. *Смоляк С.А.* Сплайны и их применение // *Экономика и математические методы.* 1971. Т. 7. Вып. 3. С. 419–431.
4. *Harder R.L., Desmarais R.N.* Interpolation using surface splines // *J. of Aircraft.* 1972. V. 9. N 2. P. 189–191.
5. *Afraimovich E.L., Perevalova N.P., Plotnikov A.V., Uralov A.M.* The shock-acoustic waves generated by the earthquakes // *Ann. Geophys.* 2001. V. 19. N 4. P. 395–409.
6. *Rudenko G.V., Uralov A.M.* Calculation of ionospheric effects due to acoustic radiation from an underground nuclear explosion // *J. Atmos. and Terr. Phys.* 1995. V. 57. N 3. P. 225–236.
7. *Afraimovich E.L., Astaf'eva E.I., Kiryushkin V.V.* Ionospheric Disturbance in the Near-Region of an Earthquake Epicenter on 25 September 2003 // *Radiophys. and Quantum. Electron.* 2005. V. 48. N 4. P. 299–313.

E.L. Afraimovich, V.V. Kiryushkin, N.P. Perevalova, M.V. Mas'kin. **Reconstruction of ionospheric perturbation spatial structure using measurements from dense GPS network GEONET.**

We present a procedure of ionospheric spatial structure reconstruction. The procedure bases on the imaging of ionospheric Total Electron Content (TEC) increments distribution. The TEC value is measured using data from Japanese GPS Earth Observation Network (GEONET) which includes more than 1000 two-frequency ground-based GPS receivers.

To reconstruct perturbation spatial structure we selected the TEC increment values and corresponding geographic coordinates of the ionospheric point for the specified time moment. The obtained data is spline-approximated on the equal stationary reference grid. To test the presented procedure, we reconstructed spatial structure of ionospheric perturbation, specially simulated for conditions of September 25, 2003. The results of testing have shown, that the presented procedure provides reconstruction of perturbation spatial structure and its dynamic tracking with high time resolution.