

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ БОРТОВОЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ

В. О. Скрипачев, И. В. Суровцева
(МИРЭА)

А. И. Барсуков
(Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики»)

А. О. Жуков
(Государственный астрономический институт
им. П. К. Штернберга МГУ)

Аннотация. Приведены результаты обработки данных бортовой геофизической аппаратуры космических аппаратов (КА) CHAMP и DEMETER для выявления сейсмической активности. Рассмотрены характеристики КА и особенности режимов работы научной аппаратуры. Выполнен анализ измерений параметров ионосферы перед сильными коровыми землетрясениями. Предложена методика обработки бортовых данных и разработан комплекс вычислительных программ. На высотах полета КА выявлены аномальные вариации ионосферных параметров за несколько дней до события. Получено распределение частот появления аномальных ионосферных возмущений.

Ключевые слова: ионосфера, космический аппарат, землетрясение, электронная плотность, ионная плотность, температура электронов, обработка данных, ионосферное возмущение.

Среди опасных природных явлений особенно актуальным является изучение сейсмических катаклизмов и их предвестников. Сейсмическая активность представляет значительную угрозу для населения и инфраструктуры. Только для РФ свыше 25 % ее территории может подвергаться землетрясениям магнитудой 7 баллов и выше.

К настоящему времени накоплен большой эмпирический материал и проведены обширные теоретические исследования физических процессов, сопровождающих подготовку землетрясений на разных стадиях. Природные явления, связанные с сейсмической активностью, проявляются не только в литосфере и атмосфере, но и в ионосфере, где они наблюдаются за несколько часов или дней как до, так и после землетрясения [1].

Применение бортовой научной геофизической аппаратуры позволяет существенно дополнить проводимые измерения в целях обнаружения предвестников сейсмических событий [2, 3]. В настоящей статье рассматриваются возможности мониторинга сейсмической активности с помощью КА на разных высотах, использующих идентичную бортовую аппаратуру. При проведении исследования авторами использовались измерения ионосферных параметров, полученные бортовой аппаратурой КА DEMETER и КА CHAMP.

КА CHAMP находился на орбите высотой ~380 км и наклоном 87,3°, что позволило в течение 10 лет с 15.07.2000 до 19.09.2010 проводить исследования ионосферы почти на всех широтах. В состав бортовой научной аппаратуры КА входил зонд Ленгмюра, с периодичностью 15 с и точностью 10% [4] измерявший электронную плотность в ионосферной плазме. Данные измерений КА CHAMP отбирались авторами с сайта <http://gfz-postdam.de>.

Для изучения явлений, предшествующих землетрясениям и возбуждающих электромагнитные волны в верхней атмосфере, а также для обнаружения электромагнитной эмиссии над сейсмоактивными регионами по заказу Французского космического агентства в период 29.06.2004 по 9.12.2010 на круговой орбите высотой ~ 700 км функционировал КА DEMETER. В составе бортовой научной аппаратуры которого находился зонд Ленгмюра – ISL. Данные КА DEMETER авторами были получены с сайта <https://cdpp-archive.cnes.fr>.

Для проведения исследований авторами с сайта <https://earthquake.usgs.gov> также были отобраны 12 землетрясений, с глубиной эпицентра не более 50 км, имеющих магнитуду не менее 7 баллов и произошедших в период, соответствующий активному функционированию КА (табл. 1).

Таблица 1

Сейсмические события для исследования ($M > 6$, $h < 50$ км)

№ п/п	Название	Дата	Магнитуда	Широта	Долгота	Глубина, км
1	Боруджерд, Иран	31.03.2006	6,1	33,50N	48,78E	7
2	Сычуань, Китай	12.05.2008	7,9	31,00N	103,32E	19
3	Острова Самоа	29.09.2009	8,1	15,49S	172,10W	18
4	Аквила, Италия	06.04.2009	6,3	42,33N	13,33E	8
5	Синьцзян, Китай	20.03.2008	7,2	35,49N	81,47E	10
6	П-в Камчатка, Россия	20.04.2006	7,6	60,95N	167,09E	22
7	Курильские о-ва, Россия	15.11.2006	8,3	46,59N	153,27E	10
8	Тайвань	26.12.2006	7,1	21,80N	120,55E	10
9	П-в Минахаса, Индонезия	16.11.2008	7,4	1,27N	122,09E	30
10	О. Хонсю, Япония	19.07.2008	7,0	37,55N	142,21E	22
11	Антофагаста, Чили	14.11.2007	7,7	22,25S	69,89W	40
12	Центральное Перу	15.08.2007	8,0	13,39S	76,60W	39

Для учета геомагнитной обстановки выполнялся анализ К_p индексов, предоставляемых сайтом <https://omniweb.gsfc.nasa.gov>. При этом, значения индексов, использовались в виде К_p*10.

Анализ бортовых данных относительно сейсмического события проводился на интервале наблюдений от – 60 до 10 суток. Таким образом, для каждого события анализировались 71 сутки. За этот период отбирались спутниковые наблюдения и данные о геомагнитной обстановке.

На следующем этапе исследований выполнена предварительная обработка спутниковых данных с учетом размера зоны подготовки землетрясения R, определяемой по формуле Добровольского [5]:

$$R = 10^{0.43M},$$

где M – магнитуда.

С учетом рассчитанного радиуса R из анализа исключались данные, находящиеся за его пределами. Дальнейшая обработка заключалась в осреднении полученных

значений измеренных параметров: электронной и ионной плотностей, и температуры электронов в зависимости от местного времени (LT). Все данные относящиеся к интервалу от 6 – 18 LT классифицировались как дневные, остальные – ночные.

К систематизированным данным применялась методика, изложенная в [6, 7]: определялась медиана M , как наиболее устойчивая характеристика, отражающая среднюю тенденцию и подходящая для асимметричных распределений; рассчитывалась мера разброса IQR :

$$IQR = Q3 - Q1,$$

где $Q3$ – значение третьего квартиля; $Q1$ – значение первого квартиля.

Расчет верхних и нижних границ для анализируемых параметров выполнялся по формуле [7]:

$$M \pm k \cdot IQR,$$

где $k = 1,5$ – коэффициент, пропорциональный силе землетрясения.

Далее определялись значимые значения исследуемого параметра, т. е. те, которые выходили за верхнюю или нижнюю границу. Для диагностики краткосрочных предвестников целесообразно оценивать данные, полученные за 15 дней до сейсмического события. Для реализации данной методики и визуализации результатов были разработаны вычислительные программы.

На рис. 1 и 2 представлены результаты анализа данных КА DEMETER и КА CHAMP в период подготовки землетрясения, произошедшего в провинции Сычуань (Китай) 12.05.2008 г. с магнитудой $M = 7.9$. Рис. 1 соответствует данным дневного периода (06 – 18 часов LT), а рис. 2 – ночному периоду (18 – 06 часов LT).

На рис. 1, а, 1, б показано, что по данным КА DEMETER за 9 суток до землетрясения увеличивается электронная и ионная плотность (N_e и N_i), при этом температура электронов (T_e) касается, но не превышает рассчитанные границы (рис. 1, в). Результаты, полученные по данным КА CHAMP (на низкой орбите) показали, что за 15 суток до землетрясения увеличивается электронная плотность (N_e), превышая рассчитанные границы на –8 и –3 сутки. При этом уменьшение N_e по данным КА CHAMP, вероятно, обусловлено как баллистическими особенностями КА, так и режимом работы бортовой аппаратуры. Геомагнитная обстановка в этот период была спокойной (рис. 1, д).

На рис. 2, а видно, что по данным, полученным КА DEMETER в период 18 – 06 часов LT за 9 суток до землетрясения значение N_e превысило расчетные границы. В это же время значение N_i возросло, но не превысило границ. После этого роста начался резкий спад значений N_e и N_i , при котором были достигнуты нижние границы. Уменьшение значений T_e наблюдалось на –12 и –10 сутки (рис. 2, в). Вариации значений N_i по данным КА DEMETER (рис. 2, б) и N_e по данным КА CHAMP не показали каких-либо ярких проявлений (рис. 2, в) и находились в рамках рассчитанных границ.

На рис. 3 и 4 представлены результаты обработки бортовых данных для землетрясения, произошедшего в Перу 15.08.2007 г., имевшего магнитуду $M = 8,0$.

Отметим, что наблюдается рост значений N_e , N_i и T_e на –7, –6 сутки в дневное время по данным КА DEMETER (3, а, 3, б, 3, в). Для данных КА CHAMP не выявлено возмущений N_e , однако появляется существенное увеличение на –8, –7 сутки (рис. 3, д). Геомагнитная обстановка в этот период была спокойной (рис. 3, д).

При обработке ночных данных КА DEMETER получен рост значений N_e и N_i на –10 и –9 сутки, а также рост T_e на –10 и –5 сутки. По данным КА CHAMP выявлен постепенный рост N_e , начавшийся на –15 суток с формированием двух максимумов на –8, –3 и –4 сутки.

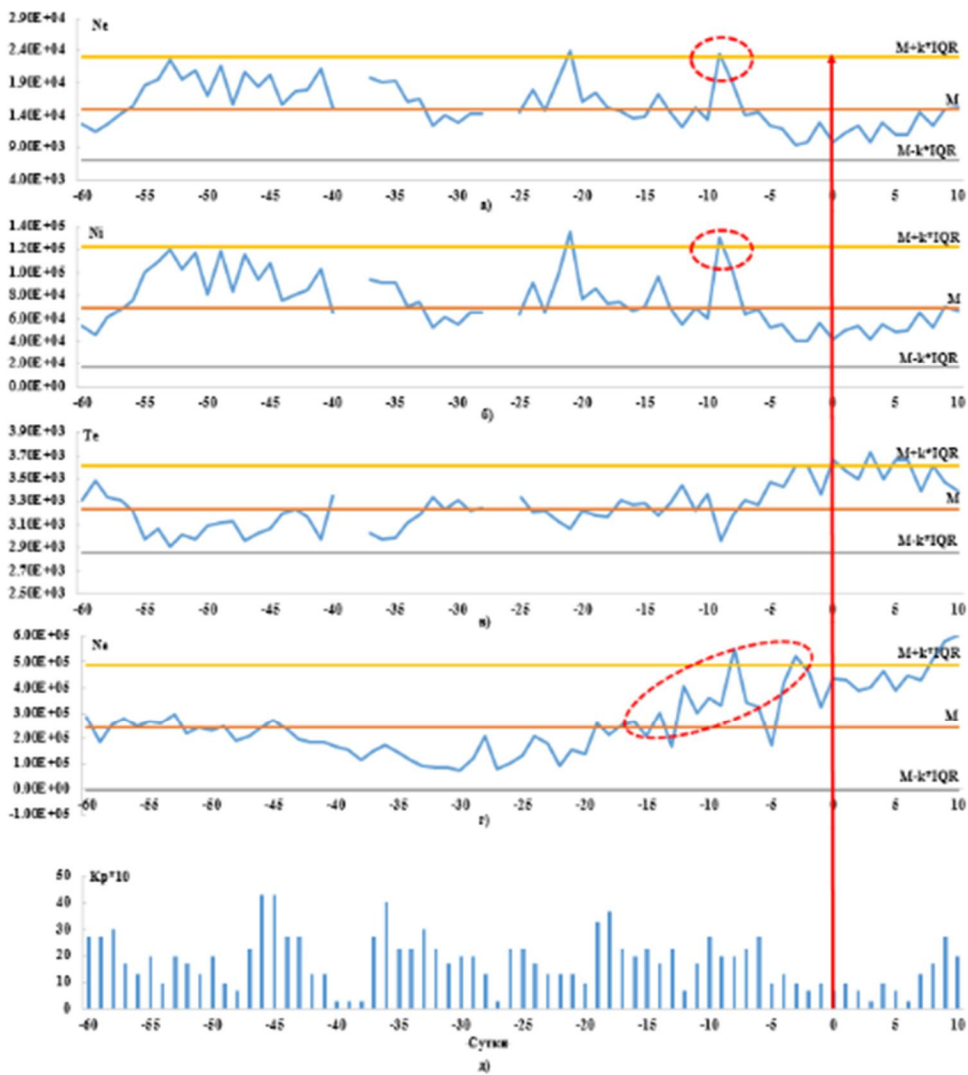


Рис. 1. Результаты обработки дневных (06 – 18 LT) данных КА DEMETER и КА CHAMP для землетрясения в провинции Сычуань (Китай) 12.05.2008 г.: *a* – изменение электронной плотности по данным КА DEMETER; *б* – изменение ионной плотности по данным КА DEMETER; *в* – изменение температуры электронов по данным КА DEMETER; *г* – изменение электронной плотности по данным КА CHAMP; *д* – значение геомагнитного индекса $K_p \cdot 10$. Красной стрелкой отмечены сутки землетрясения

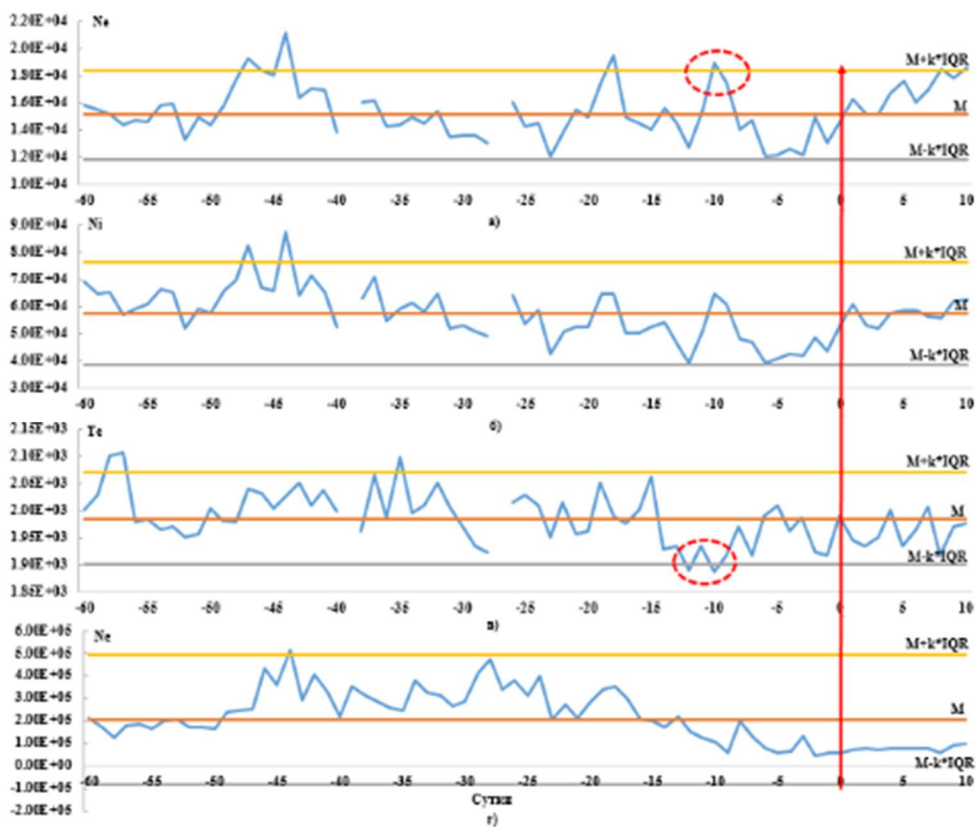


Рис. 2. Результаты обработки ночных (18 – 06 LT) данных КА DEMETER и КА CHAMP для землетрясения в провинции Сычуань (Китай) 12.05.2008 г.: *a* – изменение электронной плотности по данным КА DEMETER; *б* – изменение ионной плотности по данным КА DEMETER; *в* – изменение температуры электронов по данным КА DEMETER; *г* – изменение электронной плотности по данным КА CHAMP. Красной стрелкой отмечены сутки землетрясения

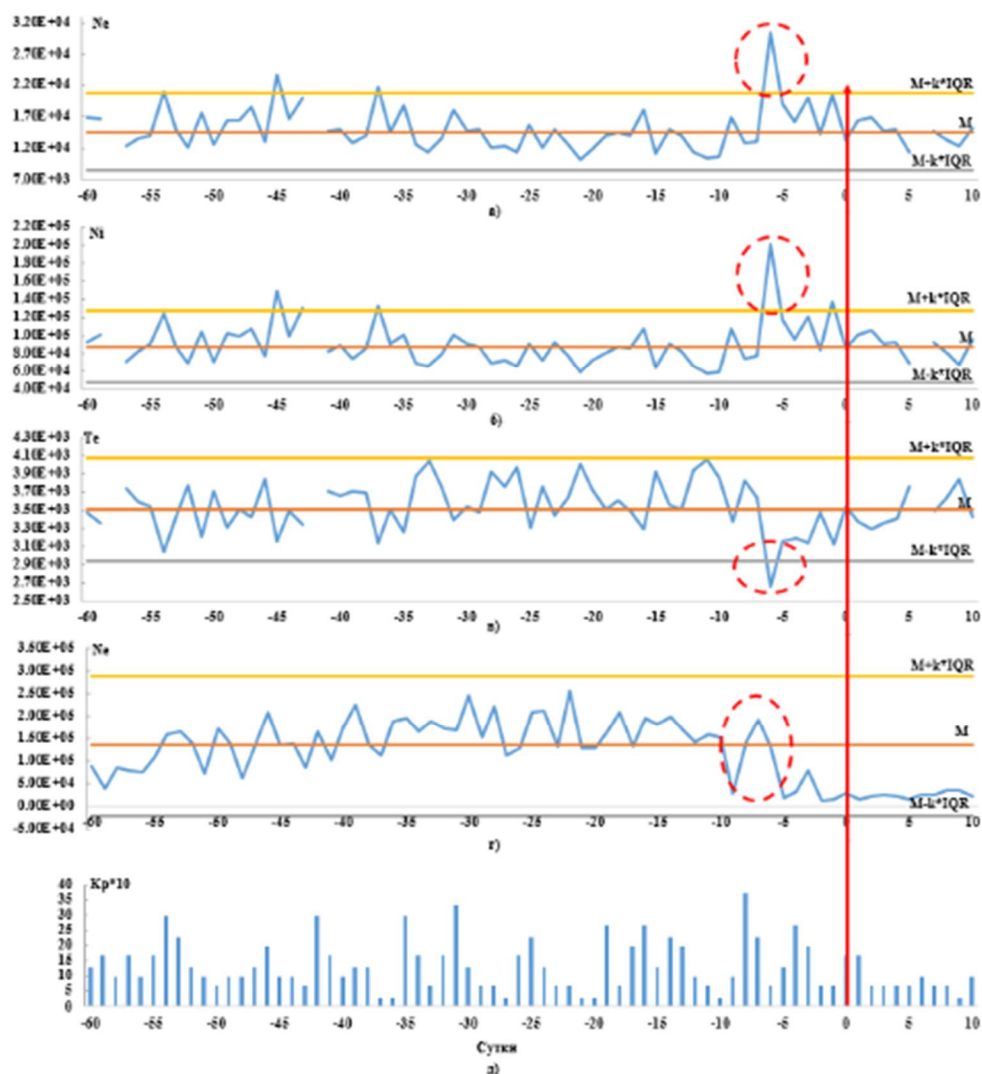


Рис. 3. Результаты обработки дневных (06 – 18 LT) данных КА DEMETER и КА CHAMP для землетрясения в Перу 15.08.2007 г.: *а* – изменение электронной плотности по данным КА DEMETER; *б* – изменение ионной плотности по данным КА DEMETER; *в* – изменение температуры электронов по данным КА DEMETER; *з* – изменение электронной плотности по данным КА CHAMP; *д* – значение геомагнитного индекса $K_p \cdot 10$. Красной стрелкой отмечены сутки землетрясения

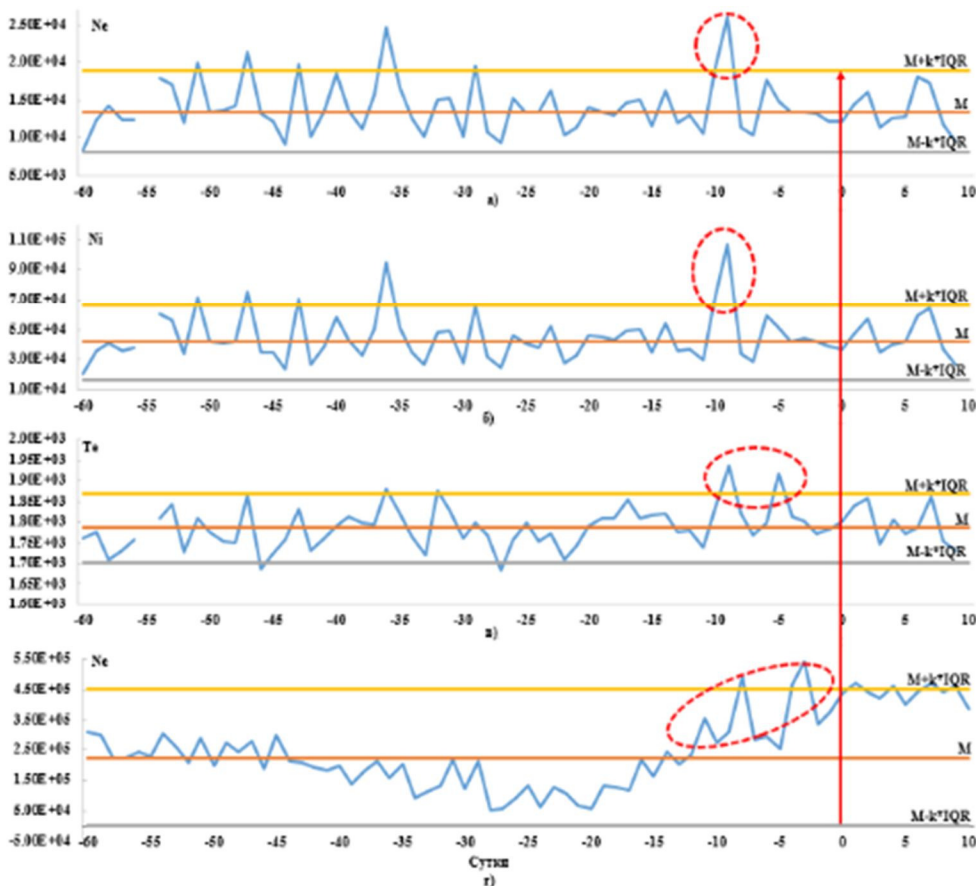


Рис. 4. Результаты обработки ночных (18 – 06 LT) данных КА DEMETER и КА CHAMP для землетрясения в Перу 15.08.2007 г.: *а* – изменение электронной плотности по данным КА DEMETER; *б* – изменение ионной плотности по данным КА DEMETER; *в* – изменение температуры электронов по данным КА DEMETER; *г* – изменение электронной плотности по данным КА CHAMP. Красной стрелкой отмечены сутки землетрясения

В табл. 2 приведены номера суток с зафиксированными возмущениями проанализированных параметров. При этом геомагнитные возмущения изучались на более широком интервале (чем от – 15 до 0 суток), чтобы учесть их влияние на состояние ионосферы.

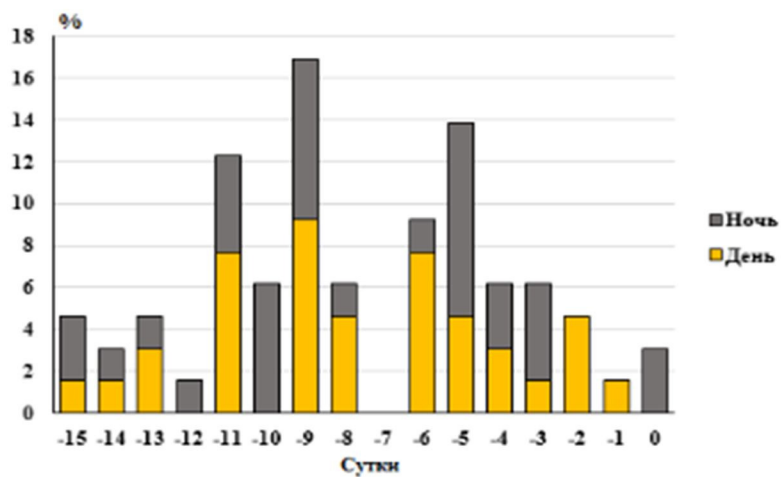
Исходя из этих данных, было построено распределение частот появления аномальных ионосферных возмущений в ионосфере (рис. 5). Как видно на рис. 5 наибольшее появление значимых вариаций наблюдается на – 9, – 5 и – 11 сутки.

Заметно, что наибольшее количество ионосферных возмущений для исследуемых землетрясений наблюдалось в период от – 11 до – 5 суток. При этом сначала доминируют ионосферные возмущения, зафиксированные в дневных измерениях, а затем начинается преобладание в ночных. Также обращает на себя внимание отсутствие возмущений на – 7 сутки.

Таблица 2

**Сутки аномальных ионосферных возмущений по данным
КА DEMETER и КА CHAMP**

№ п/п	День / Ночь	Ne DEMETER	Ni DEMETER	Te DEMETER	Ne CHAMP
1	Д				-13
	Н				-15
2	Д	-9	-9		-8, -3
	Н	-10		-12, -10	
3	Д	-9, -8, -4	-9, -8, -4		-2, -1
	Н	-5, -4	-5, -4	-10	-14, -13
4	Д				-13, -11
	Н	-3	-3		
5	Д	-11	-11	-11	-14, -11
	Н		-11		
6	Д	-9	-9		-6
	Н			-6	-6
7	Д	-6, -5	-6, -5		
	Н	-5	-5		-5
8	Д	-2	-2		
	Н	-11	-11	-10	
9	Д		-15		
	Н	-9	-9		
10	Д			-5	
	Н	0		0	
11	Д				
	Н	-15			
12	Д	-6	-6	-6	
	Н	-9	-9	-9, -5	-8, -3



**Рис. 5. Распределение частот появления аномальных ионосферных
возмущений в ионосфере**

Таким образом выполнен совместный анализ данных зондов Ленгмюра бортовой аппаратуры КА DEMETER и КА CHAMP перед сильными коровыми землетрясениями.

Отмечено увеличение электронной концентрации на разных высотах за несколько дней до землетрясений, что, вероятно, обусловлено появлением аномального электрического поля, влияние которого приводит к изменению параметров ионосферы [8]. Указанные возмущения выявлены как для дневных, так и для ночных данных, даже с учетом особенностей режима работы зонда Ленгмюра на борту КА CHAMP, при этом отметим, что мониторинг состояния ионосферы не являлся целевой задачей КА.

Максимальные значения распределения частот появления аномальных ионосферных возмущений в значениях ионосферных параметров на высоте полета КА для исследуемой выборки сейсмических событий приходится на период от – 11 до – 5 суток до момента землетрясения.

Полученные результаты хорошо согласуются с другими работами, например [7, 9, 10].

Авторы благодарят Centre des Données de la Physique des Plasmas (CDPP) за предоставление данных КА DEMETER, а также GFZ German Research Centre for Geosciences за предоставление данных КА CHAMP.

Литература

1. Физика землетрясений и предвестники / Г. А. Соболев, А. В. Пономарев; Отв. ред. В. Н. Страхов. – М.: Наука, 2003. – 270 с.
2. Parrot M. Use of satellites to detect seismo-electromagnetic effects // *Adv. Space Res.* – 1995. – V. 15. – N 11. – P. 27 – 35.
3. Pulinets S. A. Space technologies for short-term earthquake warning // *Adv. Space Res.* – 2006. – V. 37. – N 4. – P. 643 – 52.
4. Liu H., Stolle C., Watanabe S. Evaluation of the IRI model using CHAMP observations in polar and equatorial regions // *Adv. Space Res.* – 2007. – V. 39. – N 5. – P. 904 – 909.
5. Dobrovolsky I. P., Zubkov S. I. and Miachkin V. I. Estimation of the size of earthquake preparation zone // *Pure Appl. Geophys.* – 1979. – N 117. – P. 1025 – 1044.
6. Fusion of multi precursors earthquake parameters to estimate the date, magnitude and affected area of the forthcoming powerful earthquakes / Akhoondzadeh M., Saradjian M. K. // *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* – 2012. – XXXIX-B8. – P. 1 – 6.
7. Akhoondzadeh M., Parrot M., Saradjian M. R. 2010 Electron and ion density variations before strong earthquakes ($M > 6.0$) using DEMETER and GPS data // *Nat. Hazards and Earth System Sci.* – 2010. – N 10. – P. 7 – 18.
8. Pulinets S., Ouzounov D. Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling (LAIC) model – an unified concept for earthquake precursors validation // *Journal of Asian Earth Sciences.* – 2011. – N 41. – P. 371 – 382.
9. Pulinets S. A., Ouzounov, D. P., Karelin A. V., Davidenko D. V. Physical Bases of the Generation of Short-Term Earthquake Precursors: A Complex Model of Ionization-Induced Geophysical Processes in the Lithosphere – Atmosphere – Ionosphere – Magnetosphere System // *Geomagnetism and Aeronomy.* – 2015. – V. 55. – N 4. – P. 540 – 558.
10. Zeng Z. C., Zhang B., Fang G. Y., Wang D. F. and Yin H. J. An analysis of ionospheric variations before the Wenchuan earthquake with DEMETER data // *Chinese J. Geophys.* – 2009. – V. 52. – N 1. – P. 13 – 22.