

ДИАГНОСТИКА ИОННОГО СОСТАВА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СИТУАЦИЯХ

О.В. Семёнова, Л.А. Делов, В.О. Скрипачев, И.В. Суrowцева

МИРЭА – Российский технологический университет (РТУ МИРЭА). пр. Вернадского, д. 78, Москва, Российская Федерация, 119454

E-mail: semyonova@mirea.ru, lad_kursk@mail.ru, skripatchevv@inbox.ru, surowceva@mirea.ru

Окружающая среда характеризуется большим набором различных параметров, мониторинг которых, в том числе и диагностика, являются особенно важными для выявления техногенных и естественных опасных экстремальных ситуаций. В настоящее время существует множество методов изучения окружающей среды, включая дистанционный мониторинг. Его актуальность обосновывается необходимостью решения геологических, геофизических, метеорологических, гидрофизических и других задач. В данной работе окружающая среда рассматривается как ионизированная оболочка - ионосфера, где проходят высоты орбит космических аппаратов. Космические аппараты – это эффективные средства получения информации о состоянии ионосферы и, в отличие от наземных средств, обладают рядом преимуществ, например, глобальностью наблюдений. Исследование параметров ионосферы необходимо для решения различных прикладных задач. Одним из таких направлений является наблюдение за состоянием локальных областей ионосферы над тектоническими разломами в литосфере, что позволяет своевременно диагностировать повышенную сейсмическую опасность. В работе авторами получена оценка концентрации ионного состава ионосферы по данным четырех космических аппаратов, входящих в космическую систему DMSP, для периода подготовки землетрясений. Разработан алгоритм обработки данных, который реализован в вычислительной программе. В основе исследования лежат данные землетрясения в Японии на расстоянии 1000 км от эпицентра. Полученные результаты показали, что за сутки до катастроф сейсмической природы и в день землетрясения обнаруживается увеличение температуры электронов, плотности ионов кислорода и электронов. Поэтому, ионосферные эффекты, связанные с сейсмической активностью, определяют возможность реализации технологий дистанционного мониторинга при экстремальных ситуациях.

Ключевые слова: ионосфера, ионный состав, космический аппарат, экстремальная ситуация, землетрясение, электронная плотность, температура электронов, обработка данных

DIAGNOSTICS OF THE IONIC COMPOSITION OF THE ENVIRONMENT IN EXTREME SITUATIONS

O.V. Semyonova, L.A. Delov, V.O. Skripachev, I.V. Surovceva

MIREA - Russian Technological University (RTU – MIREA), Vernadsky Av., 78, Moscow, Russian Federation, 119454

E-mail: semyonova@mirea.ru, lad_kursk@mail.ru, skripatchevv@inbox.ru, surowceva@mirea.ru

The environment is characterized by a large set of different parameters, monitoring of which, including diagnostics, are especially important for identifying man-made and natural dangerous extreme situations. Currently, there are many methods of studying the environment, including remote monitoring. Its relevance is justified by the need to solve geological, geophysical, meteorological, hydrophysical and other problems. In this paper, the environment is considered as an

ionized shell-the ionosphere, where the heights of the orbits of spacecraft (spacecraft) pass. Spacecraft are effective means of obtaining information about the state of the ionosphere and, unlike ground-based means, have a number of advantages, for example, the global nature of observations. The study of the ionosphere parameters is necessary for solving various applied problems. One of such directions is the observation of the state of local areas of the ionosphere over tectonic faults in the lithosphere, which makes it possible to diagnose an increased seismic hazard in a timely manner. In this paper, the authors obtained an estimate of the concentration of the ion composition of the ionosphere according to the data of four spacecraft included in the DMSP space system for the period of earthquake preparation. An algorithm for data processing has been developed, which is implemented in a computational program. The study is based on the data of an earthquake in Japan at a distance of 1000 km from the epicenter. The results obtained showed that an increase in the temperature of electrons, the density of oxygen ions and electrons is detected a day before catastrophes of a seismic nature and on the day of an earthquake. Thus, ionospheric effects associated with seismic activity determine the possibility of implementing remote monitoring technologies in extreme situations.

Key words: ionosphere, ion composition, spacecraft, extreme situation, earthquake, electron density, electron temperature, data processing

Для цитирования:

Семёнова О.В., Делов Л.А., Скрипачев В.О., Суровцева И.В. Диагностика ионного состава окружающей среды при экстремальных ситуациях. *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2021. Т. LXV. № 4. С. 36–41

For citation:

Semyonova O.V., Delov L.A., Skripachev V.O., Surovceva I.V. Diagnostics of the ionic composition of the environment in extreme situations. *Ros. Khim. Zh.* 2021. V. 65. N 4. P. 36–41

ВВЕДЕНИЕ

Изучение параметров ионосферы необходимо для решения различных прикладных задач. Диагностика ионосферных параметров выполняется как с Земли, так и с космических аппаратов (КА). Наиболее информативными источниками данных о состоянии среды являются наблюдения с борта КА [1–5].

В проведенном исследовании использовались данные четырех космических аппаратов, входящих в космическую систему DMSP с целью диагностики ионного состава окружающей среды при экстремальных ситуациях. В настоящее время в орбитальной группировке DMSP функционируют следующие КА: F15, F16, F17 и F18.

Программа DMSP осуществляет мониторинг метеорологической, океанографической и солнечно-земной физики для министерства обороны США. Данная космическая система управляется космическим командованием ВВС, а операции на орбите обеспечивает национальное управление океанических и атмосферных исследований. Первоначально засекреченная миссия КА была раскрыта в марте 1973 года. Метеоспутники обеспечивают получение изображения облачного покрова с круговых полярных орбит с наклоном $98,8^\circ$ и периодом 102 мин, высотой около 830 км. На борту

современных КА DMSP установлена аппаратура для измерения ионного состава.

При мониторинге верхней ионосферной плазмы (аббревиатура SSIES) получают измерения тепловой плазмы в месте нахождения КА системы DMSP. Датчики SSIES адаптированы к условиям космической погоды на высоте 840 км и на всех широтах, для любого местного времени, для всех сезонов и всех фаз цикла солнечных вспышек.

Ионосферная плазма имеет широкий спектр ионного состава, включающий ионы водорода (H^+), гелия (He^+) и кислорода (O^+). В средних широтах ночные температуры ионов составляют около 1000 °К (0,086 эВ), а дневные температуры ионов - порядка 3000 °К (0,26 эВ). Температура электронов в ночное время составляет около 1200 °К (0,10 эВ), а дневная их температура ~ 3500 °К (0,30 эВ). Эти температуры увеличиваются и уменьшаются с ростом солнечной активности.

В областях сильного переноса энергии из магнитосферы в ионосферу, температуры ионов и электронов увеличиваются и имеют пространственную структуру. Тепловое движение электронов намного быстрее, чем тепловое движение ионов, потому что тепловое движение масштабируется как величина, обратная квадратному корню из массы частицы.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для диагностики ионного состава окружающей среды использовались данные, полученные в период подготовки сильных землетрясений, рассматриваемых как экстремальные ситуации. Отбирались данные для периода [-10; +5] суток относительно даты землетрясения. В таблице 1 приведены характеристики пяти землетрясений по данным Геологической службы USGS (время указано московское).

Спутниковые данные предоставлены национальным управлением океанических и атмосферных исследований NOAA с сайта <https://www.ngdc.noaa.gov/ngdc.html>.

Таблица 1

Характеристики выбранных землетрясений

Дата, время (LT)	Широта, долгота, град	Глубина, км	Магнитуда, балл
11.03.2011 Япония в 08:46	38,322° с.ш. 142,369° в.д.	32	9,1
16.09.2015 Чили в 21:50	31,95° ю.ш. 72,07° з.д.	10	8,3
23.01.2018 Залив Аляска	56° с.ш. 149° з.д.	25	7,9
24.05.2013 Охотское море в 09:05	52,2° с.ш. 151,5° в.д.	600	8,2
26.05.2019 Перу в 07:41	5 ю.ш. 75 з.д.	109,9	8

Методика

Для уменьшения объема анализируемых данных на первоначальном этапе исследований выполнялась предварительная обработка спутниковых измерений с учетом размера зоны подготовки землетрясения R , определяемой по формуле Добровольского [6]:

$$R=10^{0.43M}, \quad (1)$$

где M – магнитуда.

Однако для рассматриваемых в табл. 1 сейсмических событий значения R получались от 2494 км до 8184 км, что являлось весьма удаленным от эпицентра и вероятно недостоверным для последующих этапов исследования. Поэтому, зона подготовки каждого землетрясения авторами была определена ~ 1000 км.

Дальнейшая обработка заключалась в осреднении полученных значений измеренных параметров: электронной и ионной плотностей, температуры электронов в зависимости от местного времени (LT), а также в определении межквартильных интервалов для каждого из анализируемых параметров. Для этого определялась верхняя и нижняя границы осредненных значений согласно выражению [7]:

$$L = M \pm k \cdot (Q_3 - Q_1), \quad (2)$$

где M – медиана выборки, k – коэффициент, пропорциональный величине происшествия ($k = 1,2$), Q_1 и Q_3 – первый и третий квартили выборки соответственно.

При этом, осредненные значения за пределами нижней или верхней границы расценивались как важный предвестниковый сигнал сейсмической опасности.

Для реализации предложенной методики разработан соответствующий алгоритм, который содержит возможность выполнения корреляционного анализа.

Описание работы алгоритма

На начальном этапе работы алгоритма требуется ввести необходимые исходные данные, такие как дата землетрясения, его географическое местоположение. Также могут учитываться следующие параметры:

- магнитуда;
- временное окно, в котором будут анализироваться данные.

Далее выполняется сбор данных, помещаемых в локальный каталог, после чего осуществляются процедуры предварительной обработки. Данные представлены в текстовых файлах, в которых сохранены значения параметров. Файлы разделены так, чтобы записи велись ровно одни сутки. Измерения проводятся покадрово (каждую минуту). Из текстового файла поочередно извлекается каждый кадр, проверяется его целостность и, в случае полной целостности, записывается в общую структуру.

После сбора данных происходит их объединение для определенного сейсмического события с учетом рассчитанного радиуса зоны подготовки землетрясения. После этого выполняется расчет среднесуточных значений и коэффициентов корреляции.

Блок-схема разработанного алгоритма обработки данных представлена на рис. 1.

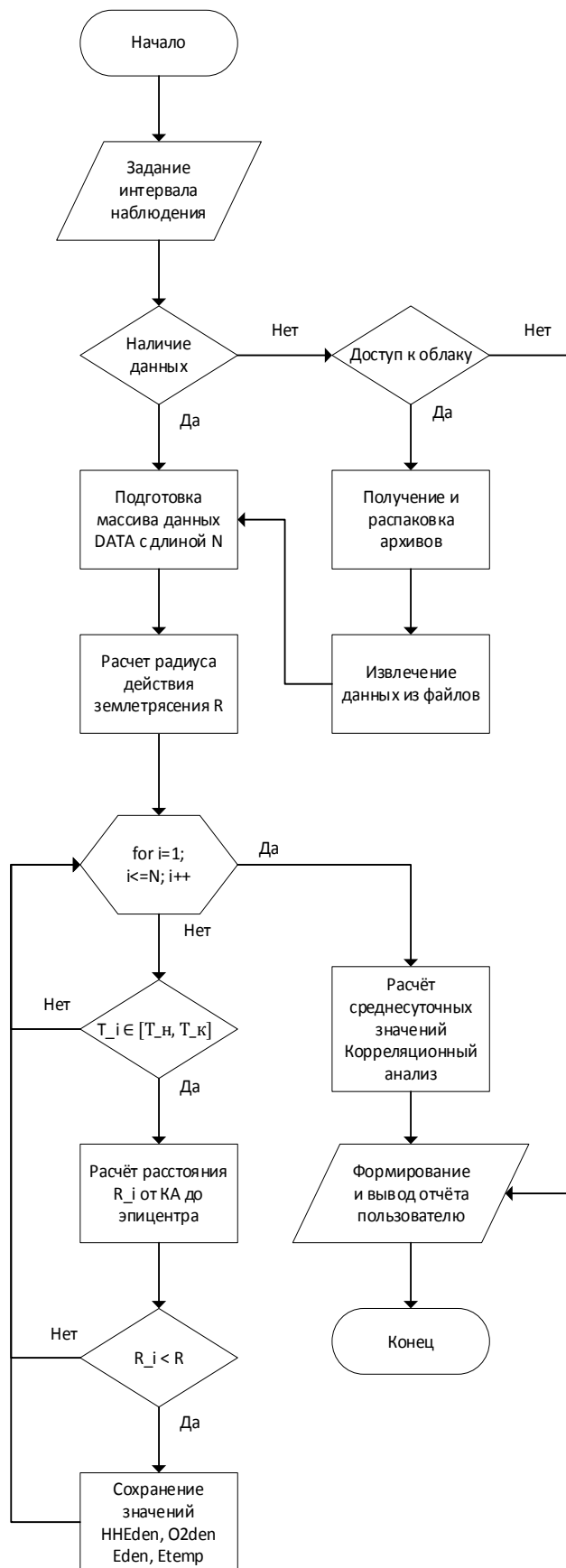
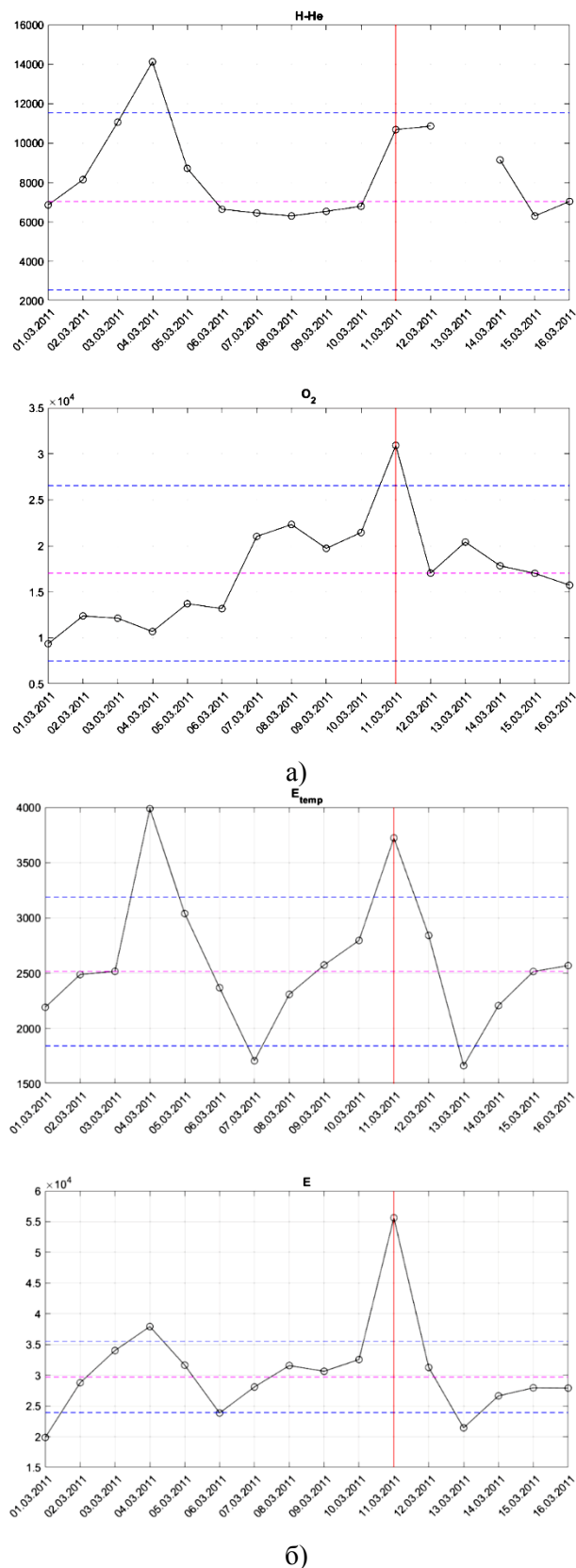


Рис. 1. Блок-схема алгоритма обработки данных



б)

Рис. 2. Результаты обработки данных КА (F15) DMSP для землетрясения в Японии на расстоянии 1000 км от эпицентра а) изменения плотности гелия и кислорода; б) изменения температуры и плотности электронов

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенного исследования обработаны измерения плотности гелия и кислорода, температуры и плотности электронов по данным четырех КА космической системы DMSP для периода сейсмической активности в Японии, Чили, Перу, Охотском море и в заливе Аляска. Получено порядка 80 зависимостей указанных параметров во временном интервале относительно даты землетрясения.

В качестве примера на рис. 2 представлены результаты обработки данных КА DMSP для землетрясения в Японии 11.03.2011.

Получено, что за 7 сут. до сейсмической опасности увеличивается концентрация гелия, температура и плотность электронов. А в день землетрясения наблюдается существенный скачок ионов кислорода, электронов и их температуры при уменьшении плотности этих параметров на 3 сут. после события.

Результаты диагностики вариативности параметров среды для ±3 сут. относительно дня землетрясения в Японии (отмечено серым) по данным четырех КА DMSP представлены в табл. 2.

Показано, что за сутки до и в день сейсмического события происходит увеличение плотности ионов кислорода, концентрации и температуры электронов.

ВЫВОДЫ

Исходя из результатов проведенного исследования в части диагностики ионного состава ионосферы при сейсмической активности для выбранных регионов можно сделать вывод о том, что за сутки до и в день природного катаклизма повышается температура электронов, плотность ионов гелия, кислорода и электронов (территории Японии и Перу).

Увеличение концентрации кислорода и гелия выявлено за 7-9 сут. до землетрясений в заливе Аляска, Японии и Чили, при этом над последней территорией было обнаружено уменьшение плотности гелия и электронов за 4-5 дня до сейсмического события.

Измерения, полученные с КА в период подготовки землетрясений в Охотском море и заливе Аляска, показали повышение температуры электронов и изученного авторами ионного состава за

5-6 сут., а также спустя 1-2 дня после произошедшего события, при уменьшении ионов кислорода и электронов на пятые сутки в Охотском море.

Таким образом, ионосферные эффекты, связанные с сейсмической активностью, и оценка концентрации ионного состава среды определяют возможность реализации технологий дистанционного мониторинга при экстремальных ситуациях.

Таблица 2

Результаты исследования для землетрясения в Японии

КА	Параметр	Дни						
		-3	-2	-1	0	1	2	3
F15	H – He							
	O ₂				+			
	E				+			+
	E _{temp}				+			+
F16	H – He							
	O ₂			+	+			
	E				+			
	E _{temp}							
F17	H – He					+		
	O ₂			+	+			
	E			+	+			
	E _{temp}			+		+		
F18	H – He							
	O ₂				+			
	E							
	E _{temp}							

ЛИТЕРАТУРА
REFERENCES

1. Kaloshin I., Kuznetsov V., Skripachev V., Surovceva I. Capabilities evaluation of spaceborne scientific equipment for geophysical applications. In MATEC Web of Conferences V International Forum for Young Scientists Space Engineering, volume 102 of MATEC Web of Conferences. MATEC Web of Conferences MATEC Web of Conferences. 2017. DOI: 10.1051/mateconf/201710201024.
2. Kaloshin I., Skripachev V., Surovceva I., Kuznetsov V., Kharlamov A. Application of satellites system based on different heights for ionospheric disturbances monitoring. In MATEC Web of Conferences. 2018. V. 158. P. 01015–01015. DOI: 10.1051/mateconf/201815801015.

3. Физика землетрясений и предвестники / Г.А. Соболев, А.В. Пономарев; Отв. ред. В.Н. Страхов. – М.: Наука. 2003. 270 с. Fizika zemletryasenij i predvestniki / G.A. Sobolev, A.V. Ponomarev; Otv. red. V.N. Straxov. M.: Nauka, 2003. 270 p.
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. *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.
6. *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.
7. *Akhoondzadeh M., Parrot M., Saradjian M.R.* 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.

Поступила в редакцию (Received) 01.08.2021

Принята к опубликованию (Accepted) 03.09.2021