ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-49-4-157-170

Научная статья

Полный текст на русском языке

УДК 519.65

Анализ динамики ионосферных параметров в возмущенные периоды по результатам работы системы «Аврора»

Н. В. Фетисова**, *О. В. Мандрикова*

Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, 684034, Камчатский край, с. Паратунка, ул. Мирная 7

Аннотация. В работе описана ионосферная компонента интерактивной системы «Аврора». В системе «Аврора» реализованы новые методы анализа данных, основанные на синтезе современных средств цифровой обработки сигналов с классическими методами анализа данных. В статье представлены результаты работы ионосферной компоненты, основанные на разработанной авторами обобщенной многокомпонентной модели параметров ионосферы. Модель и основанные на ней численные алгоритмы позволяют детально изучить динамику параметров ионосферы в периоды возмущений (выделить аномальные периоды и оценить их параметры). Ионосферная компонента системы «Аврора» выполняет обработку и анализ параметров критической частоты ионосферы foF2, регистрируемых на ионосферной станции Паратунка (Камчатский край), и формирует заключение о состоянии ионосферы над Камчаткой. Данная разработка выполнена коллективом лаборатории системного анализа ИКИР ДВО РАН. В статье представлены реализованные в системе численные алгоритмы и показаны результаты работы системы в периоды повышенной геомагнитной активности (на примере слабой магнитной бури от 15 июня 2024 г.) и сейсмических процессов на Камчатке (на примере землетрясения от 2 ноября 2018 г.). В периоды рассмотренных событий в ионосфере выделены аномальные изменения, которые сопровождались как повышением, так и понижением электронной концентрации.

Ключевые слова: ионосферные возмущения, вейвлет-преобразование, авторегрессионные модели

Получение: 08.11.2024; Исправление: 16.11.2024; Принятие: 26.11.2024; Публикация онлайн: 28.11.2024

Для цитирования. Фетисова Н. В., Мандрикова О. В. Анализ динамики ионосферных параметров в возмущенные периоды по результатам работы системы «Аврора» // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*. 2024. Т. 49. № 4. C. 157-170. EDN: RTKSCP. https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-49-4-157-170.

Финансирование. Работа выполнена за счет Государственного задания ИКИР ДВО РАН (рег. № НИОКТР 124012300245-2).

Конкурирующие интересы. Конфликтов интересов в отношении авторства и публикации нет.

Авторский вклад и ответственность. Авторы участвовали в написании статьи и полностью несут ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать.

***Корреспонденция:** E-mail: nv.glushkova@yandex.ru, oksanam1@mail.ru,

Vestnik KRAUNC. Fiz.-Mat. nauki. 2024. vol. 49. no. 4. P. 157-170. ISSN 2079-6641

INFORMATION AND COMPUTING TECHNOLOGIES

https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-49-4-157-170

Research Article

Full text in Russian

MSC 41A99

Analysis of the Ionospheric Parameter Dynamics During Disturbed Periods Based on Aurora System Results

N. V. Fetisova*, ***O. V. Mandrikova****

Institute of Cosmophysical Research and Radiowave Propagation FEB RAS,
684034, Kamchatka region, Paratunka, Mirnaya Str.7

Abstract. The paper describes an ionospheric component of "Aurora" interactive system. The "Aurora" system implements new methods of data analysis based on the combination of modern means of digital signal processing with classical methods of data analysis. The paper presents the results of the ionospheric component based on a generalized multicomponent model of ionospheric parameters developed by the authors. The model and numerical algorithms based on it make it possible to study the ionospheric parameter dynamics during disturbed periods (to detect anomalous periods and estimate their parameters) in detail. The ionospheric component of "Aurora" system performs processing and analysis of the foF2 ionospheric critical frequency parameters recorded at Paratunka station (Kamchatka Territory) and forms a conclusion on the state of the ionosphere above Kamchatka. This development was carried out by a team of the system analysis laboratory of IKIR FEB RAS. The paper presents numerical algorithms implemented in the system and system results during increased geomagnetic activity (as an example of a weak magnetic storm from June 15, 2024) and seismic processes in Kamchatka (as an example of the November 2, 2018 earthquake). During the periods of the considered events, anomalous changes were detected in the ionosphere, which were accompanied with both the increase and decrease of the electron concentration.

Key words: ionospheric disturbances, wavelet transform, autoregressive models

Received: 08.11.2024; Revised: 16.11.2024; Accepted: 26.11.2024; First online: 28.11.2024

For citation. Fetisova N. V., Mandrikova O. V. Analysis of the ionospheric parameter dynamics during disturbed periods based on Aurora system results. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2024, **49**: 4, 157-170. EDN: RTKSCP. https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-49-4-157-170.

Funding. The work was supported by IKIR FEB RAS State Task (Reg. No. NIOKTR 124012300245-2).

Competing interests. The authors declare that there are no conflicts of interest regarding authorship and publication.

Contribution and Responsibility. All authors contributed to this article. Authors are solely responsible for providing the final version of the article in print. The final version of the manuscript was approved by all authors.

***Correspondence:** E-mail: nv.glushkova@yandex.ru, oksanam1@mail.ru,

Введение

Работа направлена на решение задач мониторинга и прогноза состояния ионосферы. Состояние ионосферы является одним из важных факторов космической погоды. Актуальность и прикладная значимость исследования обусловлена зависимостью бесперебойной работы современных технических систем от состояния ионосферы [1]– [3]. Известно, что вследствие естественного воздействия (солнечные события, геомагнитные бури, сейсмические события и др.) в ионосфере формируются возмущения [2]– [7], которые оказывают негативное влияние на работу ГНСС, а также на качество и надежность радиосвязи [2, 3, 8]. Ионосферные возмущения возникают в периоды значительного изменения (повышение/понижение) электронной концентрации относительно фонового (спокойного) уровня [2]– [5], [9]– [11]. В регистрируемых параметрах ионосферы (например, foF2, ПЭС) они могут проявляться в виде аномального повышения либо понижения уровня вариаций и иметь как кратковременный, так и длительный характер. Наблюдаемые аномальные изменения имеют в регистрируемых данных разную амплитуду и форму и часто наблюдаются в периоды повышенной солнечной активности и магнитных бурь [12, 13]. Разработанные научными группами средства анализа динамики параметров ионосферы основаны на разных подходах – эмпирическая международная модель ИРИ [14], программный комплекс глобального детектирования Globdet [1], ассимиляционная модель АМИ [15], глобальная физическая модель SAMI3 [16], нейросетевая модель - operational forecasting model [2]. Однако, как правило, данные методы используют большое количество входных геофизических параметров, что влияет на эффективность и точность результатов обработки, а также на возможность реализации их работы в оперативном режиме.

В данной работе представлена разработанная в лаборатории системного анализа ИКИР ДВО РАН *ионосферная компонента* интерактивной системы комплексного анализа геофизических параметров «Аврора» (система входит в Common Use Center «North-Eastern Heliogeophysical Center» CKP-558279 ИКИР ДВО РАН). С 2018 г. система «Аврора» выполняет оценку состояния ионосферы над Камчаткой. В анализе используются данные критической частоты ионосферы foF2 (ст. Паратунка, Камчатский край). Результаты обработки данных представляются в графическом виде в открытом доступе на сайте ИКИР ДВО РАН http://lsaoperanalysis.ikir.ru/lsaoperanalysis.html. На основе полученных результатов в системе генерируется заключение о состоянии ионосферы за последние 24 ч. В основе *ионосферной компоненты* системы «Аврора» лежит разработанная авторами обобщенная многокомпонентная модель параметров ионосферы (ОМКМ) и основанные на ней численные алгоритмы [12, 13, 17, 18]. При построении ОМКМ применялось сочетание методов вейвлет-анализа с авторегрессионными моделями и пороговыми функциями [17, 18]. В системе, по мере поступления данных, выполняется моделирование и анализ часовых и 15-минутных результатов измерений вариаций foF2 ст. Паратунка (52.97^0 N; 158.24^0 E, Камчатка, ИКИР ДВО РАН). Анализ выполняется с учетом суточносезонных изменений и уровня солнечной активности [17, 18]. Система позволяет в оперативном режиме обнаруживать ионосферные аномалии и оценивать их параметры (интенсивность, длительность и момент возникновения). В данном исследовании представлены результаты работы *ионосферной компоненты* на примере анализа вариаций foF2 в периоды магнитной бури от 15 июня 2024 г. и сейсмического события от 2 ноября 2018 г. На примере рассмотренных событий показана эффективность системы «Аврора» и перспективность её применения для решения задач космической погоды.

Описание метода

Методика обработки и анализа ионосферных параметров в системе «Аврора»

Разработанная авторами ОМКМ описывает временной ход параметров ионосферы и имеет следующий аналитический вид [17, 18]:

$$f(t) = \sum_{k} s^{1}_{-3,k}\varphi_{-3,k}(t) + \sum_{k} s^{2}_{-3,k}\Psi_{-3,k}(t) + \sum_{i,\eta} \beta^{dist}_{i,\eta}(t) + e(t), \tag{1}$$

где $s^{\mu}_{-3,k}(\mu = 1,2)$ – оценочное значение μ-й компоненты, описывающей регулярные периодические вариации параметров ионосферы:

$$s^{\mu}_{-3,k} = \sum_{l=1}^{p^{\mu}_{-3}} \gamma^{\mu}_{-3,l}\omega^{\mu}_{-3,k-l} + a^{\mu}_{-3,k}, \tag{2}$$

где $\gamma^{\mu}_{-3,l}, p^{\mu}_{-3}$–параметры и порядок АР-модели [19], $\omega^{1}_{-3,k} = \nabla c_{-3,k}$, $\omega^{2}_{-3,k} = \nabla d_{-3,k}$ – 1-я разность вейвлет-коэффициентов $c_{-3,k}$ и $d_{-3,k}$ [20], $a^{\mu}_{-3,k}$ – остаточные ошибки, $\varphi_{-3,k}$ – масштабирующая функция, $\Psi_{-3,k}$ – вейвлет, $m = -3$ – уровень вейвлет-разложения (оценивался на основе алгоритма [18]), k – параметр времени.

Компоненты $\sum_{i,\eta} \beta^{dist}_{i,\eta}(t)$ модели (1) описывают временной ход параметров ионосферы в периоды аномальных изменений данных (аномальные повышения или понижения электронной концентрации). Ввиду разной формы и длительности ионосферных аномалий, они определяются через пороговые функции $\sum_{i,\eta} \beta^{dist}_{i,\eta}(t) = \sum_{\eta,n} P^{i}_{\eta,n}(d_{\eta,n})\Psi_{\eta,n}(t)(i = 1,2,3)$:

$$P^{i}_{\eta,n}(d_{\eta,n}) = \left[\begin{array}{l} \left\{\begin{array}{l} d^{1+}_{\eta,n}, \text{ если } P^{1}_{\eta,n} < \left(d_{\eta,n} - d^{med}_{\eta,n}\right) \le P^{2}_{\eta,n} \\ 0, \text{ если } \left|d_{\eta,n} - d^{med}_{\eta,n}\right| < P^{1}_{\eta,n} \text{ or } \left|d_{\eta,n} - d^{med}_{\eta,n}\right| > P^{2}_{\eta,n} \\ d^{1-}_{\eta,n}, \text{ если } -P^{2}_{\eta,n} < \left(d_{\eta,n} - d^{med}_{\eta,n}\right) \le -P^{1}_{\eta,n} \end{array}\right. , \\ \left\{\begin{array}{l} d^{2+}_{\eta,n}, \text{ если } P^{2}_{\eta,n} < \left(d_{\eta,n} - d^{med}_{\eta,n}\right) \le P^{3}_{\eta,n} \\ 0, \text{ если } \left|d_{\eta,n} - d^{med}_{\eta,n}\right| < P^{2}_{\eta,n} \text{ or } \left|d_{\eta,n} - d^{med}_{\eta,n}\right| > P^{3}_{\eta,n} \\ d^{2-}_{\eta,n}, \text{ если } -P^{3}_{\eta,n} \le \left(d_{\eta,n} - d^{med}_{\eta,n}\right) < -P^{2}_{\eta,n} \end{array}\right. , \\ \left\{\begin{array}{l} d^{3+}_{\eta,n}, \text{ если } \left(d_{\eta,n} - d^{med}_{\eta,n}\right) > P^{3}_{\eta,n} \\ 0, \text{ если } \left|d_{\eta,n} - d^{med}_{\eta,n}\right| < P^{3}_{\eta,n} \\ d^{3-}_{\eta,n}, \text{ если } \left(d_{\eta,n} - d^{med}_{\eta,n}\right) < -P^{3}_{\eta,n} \end{array}\right. , \end{array}\right. \tag{3}$$

где $d_{\eta,n} = \langle f, \Psi_{\eta,n} \rangle$ – вейвлет-коэффициенты, Ψ – вейвлет,η – параметр масштаба, n – параметр времени, $\langle\cdot\rangle$ – скалярное произведение, пороги $P^i_{\eta,n} = V^i\sqrt{\frac{1}{\Phi-1}\sum_{n=1}^{\Phi}\left(d_{\eta,n}-\overline{d_{\eta,n}}\right)^2}$, где $d^{med}_{\eta,n}$ и $\overline{d_{\eta,n}}$ – медиана и среднее значение, соответственно, верхний индекс $i = 1\pm;2\pm;3\pm$ определяет положительные и отрицательные аномалии трех классов: 1 класс – малой интенсивности, 2 класс – умеренной интенсивности, 3 класс - большой интенсивности.

Составляющая $e(t)$ модели описывает природные и техногенные шумы (аппаратные сбои, промышленные взрывы и др.).

Обнаружение и оценка параметров ионосферных аномалий выполняется с использованием численных алгоритмов, основанных на модели (1) [12,13]. В основе алгоритма обнаружения интенсивных ионосферных аномалий лежит анализ остаточных ошибок регулярных компонент модели (1) (см. соотн. (2)). Алгоритм включает операции, представленные на рис. 1.

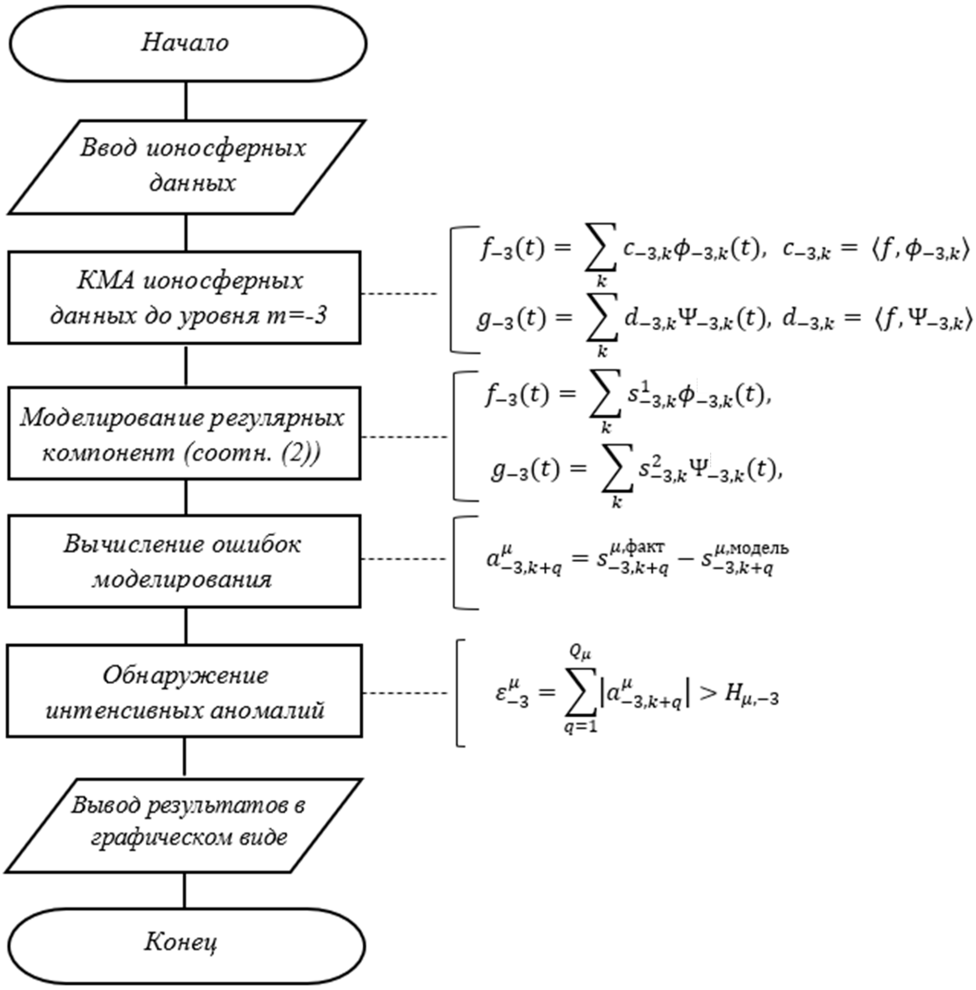

Рис. 1. Блок-схема алгоритма обнаружения интенсивных ионосферных аномалий [Figure 1. Flowchart of the algorithm for detection of intensive ionospheric anomalies]

Используются параметры моделей регулярных компонент и пороговые значения $H_{\mu,-3}$, оцененные априори по данным foF2 ст. Паратунка [18].

Операции обнаружения и оценки параметров *внезапных ионосферных аномалий* основаны на аномальной компоненте $\sum_{i,\eta}\beta_{i,\eta}^{dist}(t)$ модели (1) (см. соотн. (3)). Блок-схема алгоритма представлена на рис. 2.

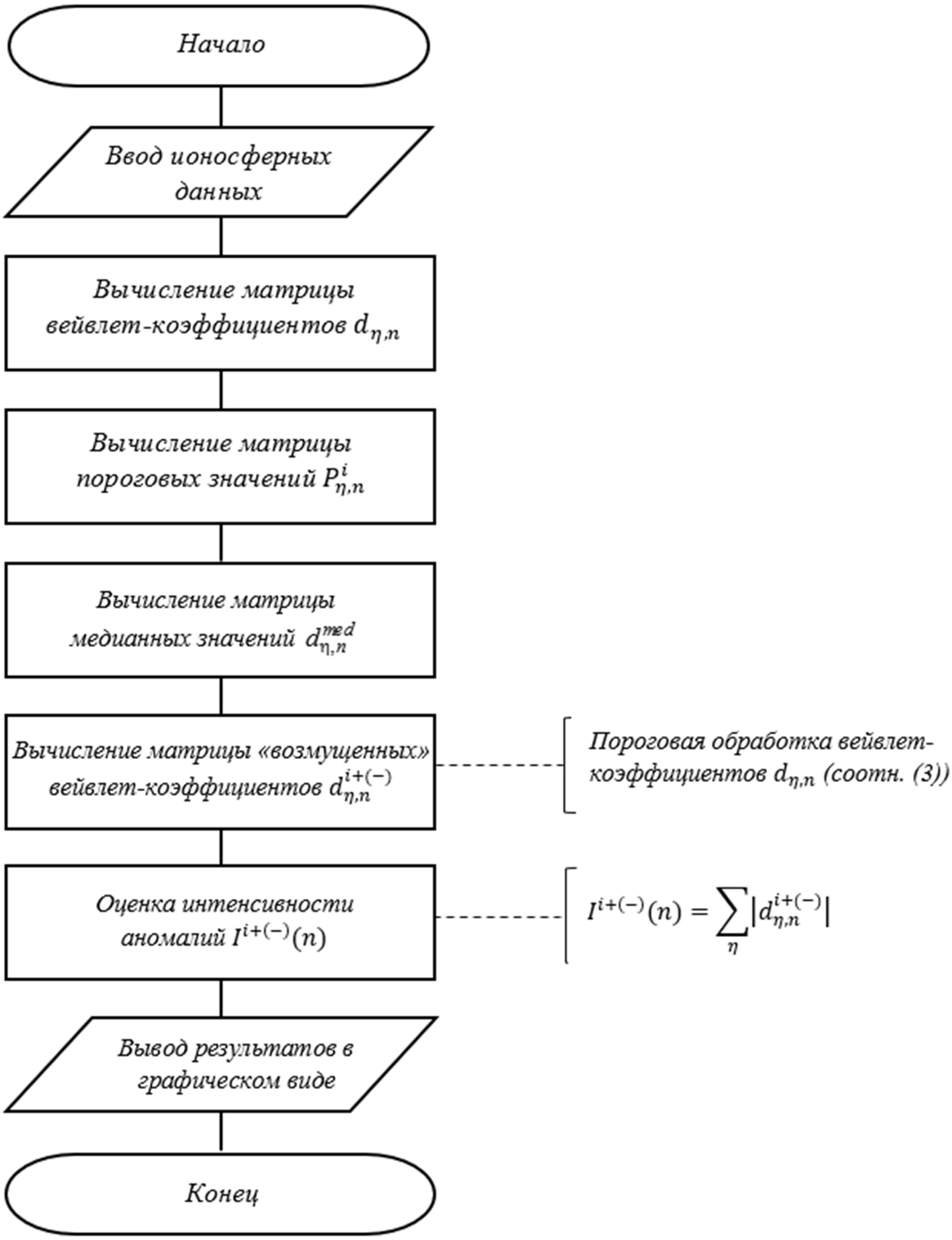

Рис. 2. Блок-схема алгоритма обнаружения внезапных ионосферных аномалий [Figure 2. Flowchart of the algorithm for detection of sudden ionospheric anomalies]

Пороги $P^{i}_{\eta,n}$ оценивались по данным foF2 ст. Паратунка путем минимизации апостериорного риска [21].

Результаты работы ионосферной компоненты системы «Аврора»

В разделе представлены результаты работы *ионосферной компоненты* системы «Аврора» в периоды магнитной бури от 15 июня 2024 г. (рис. 3 а-е) и сейсмического события от 2 ноября 2018 г. (рис. 4 а-д). Параметры реализующих алгоритмов в системе «Аврора» настраивались по данным foF2 ст. «Паратунка» (52.97^0 N; 158.24^0 E) и выполнялась их адаптация под уровень солнечной активности (максимум/минимум) и сезон (зима/лето) [18]. Результаты работы алгоритма обнаружения внезапных ионосферных аномалий представлены на рис. 3 в, г, 4 б, в (красным/синим цветом отмечены положительные/отрицательные аномалии, характеризующие повышение/понижение электронной концентрации). Результаты работы алгоритма обнаружения интенсивных аномалий представлены на рис. 3 д, е, 4 г, д.

Заключение о состоянии ионосферы в системе может иметь одно из следующих возможных значений: спокойное, слабые возмущения, возмущенное состояние и сильные возмущения (например, рис. 3 а). Для интерпретации результатов работы системы используются параметры магнитосферы (рис. 3 ж,з, рис. 4 е, ж) и солнечного ветра (рис. 3 и,к, рис. 4 з, и) (ресурс: https://omniweb.gsfc.nasa.gov.form/dx1.html, https://ipg.geospace.ru). Сейсмическая активность анализировалась по данным каталога землетрясений Камчатского филиала Единой Геофизической службы РАН (КФ ФИЦ ЕГС РАН, https://sdis.emsd.ru/main.php).

На рис. 3 представлен результат работы системы в период слабой магнитной бури, начавшейся 15 июня 2024 г. (min Dst = -28 нТл, момент начала бури отмечен вертикальным пунктиром). Предбуревый период характеризуется относительно спокойным состоянием геомагнитного поля (K-индекс не превышал значения 3, рис. 3 ж), скорость солнечного ветра составляла 320-370 км/сек (рис. 3 к), южная компонента ММП флуктуировала от Bz= -5 нТл до Bz= +7 нТл (https://ipg.geospace.ru).

В этот период по результатам работы системы «Аврора» в ионосфере возникла положительная аномалия длительностью около 22 ч. (рис. 3 в, г). Выделенная аномалия имела высокую интенсивность с максимумом в период возрастания K-индекса с 2 на 3 (рис. 3 г, ж). Отметим, что 13 июня в 5.30 UTC на расстоянии 587.6 км от станции регистрации *foF2* (координаты землетрясения: 55.49^0 N; 162.96^0 E) произошло землетрясение, которое имело магнитуду M = 5.75 и глубину 62.3 км.

Интенсивная реакция ионосферы на слабые геомагнитные возмущения возможно обусловлена данным сейсмическим событием, которое привело к более значительному росту электронной концентрации. Превышение ошибок сглаженной компоненты $f_{-3}(t)$ 70% и 90% доверительных интервалов, которое составило 2.5

СО и 1.4 СО, соответственно, также указывает на наличие аномальных процессов в ионосфере (рис. 3 д).

Во время наиболее сильных геомагнитных возмущений результаты системы «Аврора» показывают понижение электронной концентрации в ионосфере, что далее привело к формированию отрицательной аномалии высокой интенсивности (рис. 3 в, г). В этот период, по данным ОМКМ, максимальное превышение ошибок компоненты $f_{-3}(t)$ 70% и 90% доверительных интервалов составило 2.5 СО и 1.4 СО, соответственно (рис. 3 д).

Понижение электронной концентрации протекало на фоне прихода 15 июня в 11. UTC неоднородного ускоренного потока от CME от 12 июня, усиления флуктуации Bz-компоненты до -14 нТл, возрастания скорости солнечного ветра до 490 км/сек (https://ipg.geospace.ru). В этот период K-индекс возрос до 5 (рис. 3 ж).

Восстановительная фаза магнитной бури сопровождалась колебательными процессами в ионосфере (от фонового уровня до слабой интенсивности), которые формировались на фоне прихода 16 июня в 16. UTC неоднородного ускоренный поток от CIR и 17 июня в 13. UTC от CIR и CME (от 13 июня). Реакция ионосферы на анализируемую магнитную бурю имеет схожий характер с результатами, представленными в более ранних работах авторов [18, 22].

На рис. 4 представлены результаты работы системы «Аврора» по обработке данных foF2 в период сейсмического события от 2 ноября 2018 г. По данным сейсмического каталога https://sdis.emsd.ru/main.php землетрясение произошло на расстоянии 115.48 км от станции регистрации *foF2* (координаты землетрясения: 51.98^0 N; 158.72^0 E) в 9:39 UTC, имело магнитуду $M = 5.8$ и глубину 72.4 км. В анализируемый период с 29 октября до 4 ноября геомагнитное поле было спокойным (значения K-индекса не превышают 2, рис. 4 е), скорость солнечного ветра не превышала 350 км/с (рис. 4 и), южная компонента ММП флуктуировала от $Bz{=}\pm2$ нТл до $Bz{=}\pm4$ нТл (https://ipg.geospace.ru).

По результатам работы системы «Аврора» за 2.5 суток до землетрясения электронная концентрация в ионосфере начала понижаться, что привело к формированию отрицательной аномалии умеренной интенсивности (рис. 4 б, в). Выделенная аномалия достигла максимальной интенсивности 31 октября около 13:00 UTC и имела длительность около суток. Далее 1 ноября отрицательная аномалия сменилась на положительную аномалию умеренной интенсивности, которая имела длительность около 26 ч. (рис. 4 б, в).

Повышение электронной концентрации привело к изменению временного хода foF2, что подтверждается превышением ошибок компоненты $f_{-3}(t)$ 70% и 90% доверительных интервалов (отклонения составили 2.2 СО и 1.45 СО соответственно, рис. 4 г), а также отклонением значений foF2 от медианы (рис. 4 а). Период после землетрясения сопровождался в ионосфере колебательными процессами фонового уровня. Сопоставление динамики ионосферных параметров с параметрами околоземного космического пространства и магнитосферы указывает на возможную связь выделенных аномалий с сейсмическими процессами.

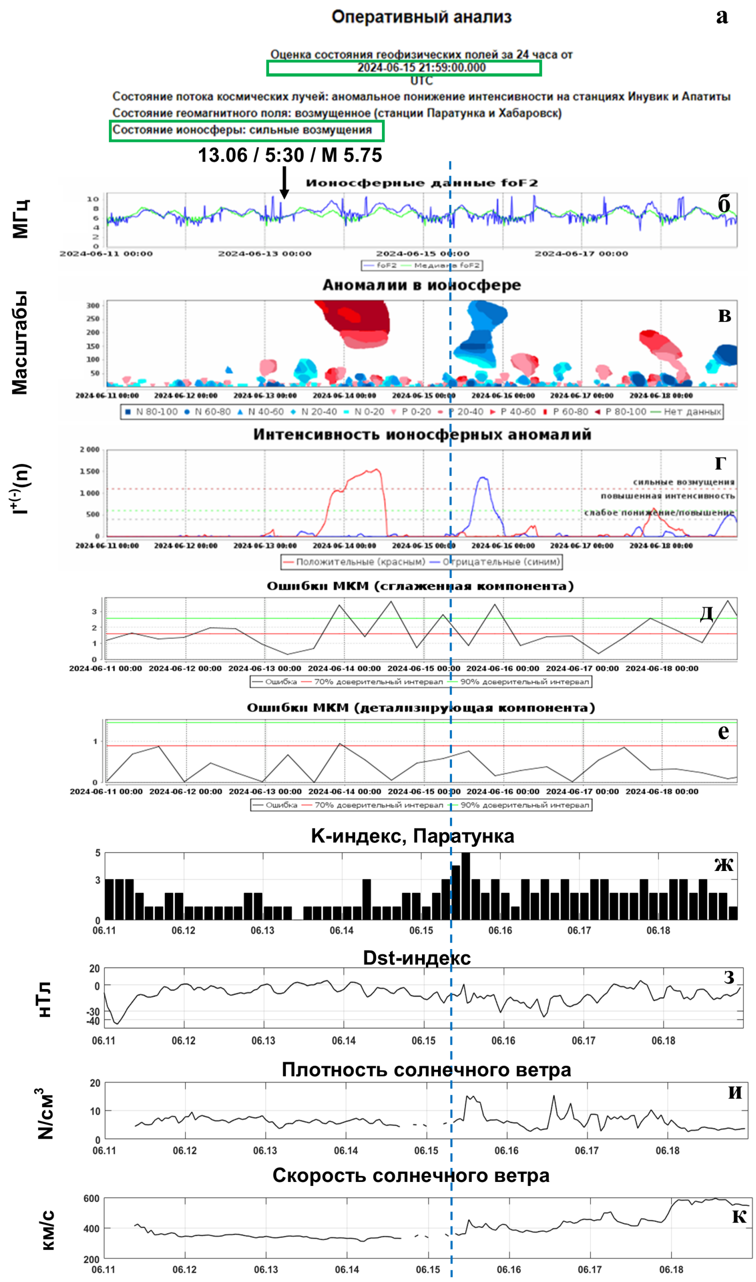

Рис. 3. Результаты работы системы «Аврора» в период слабой магнитной бури 15 июня 2024 г (а-е): а) – заключение о состоянии ионосферы на 15.06.2024, б) – данные foF2 (синим), медиана foF2 (зеленым), в), г) – выделенные ионосферные аномалии и их интенсивность (красным и синим цветом отмечены положительные и отрицательные аномалии, соответственно), д), е) – ошибки регулярных компонент и их доверительные интервалы. Вертикальный пунктир – начало магнитной бури

[Figure 3. Aurora system results during the weak magnetic storm on June 15, 2024 (a-f): a) conclusion on the ionosphere state at 15.06.2024, b) foF2 data (blue), 27-day median (green), c), d) detected positive (red) and negative (blue) ionospheric anomalies, e), f) reqular component errors and their confidence intervals. The vertical dotted line is the beginning of the magnetic storm]

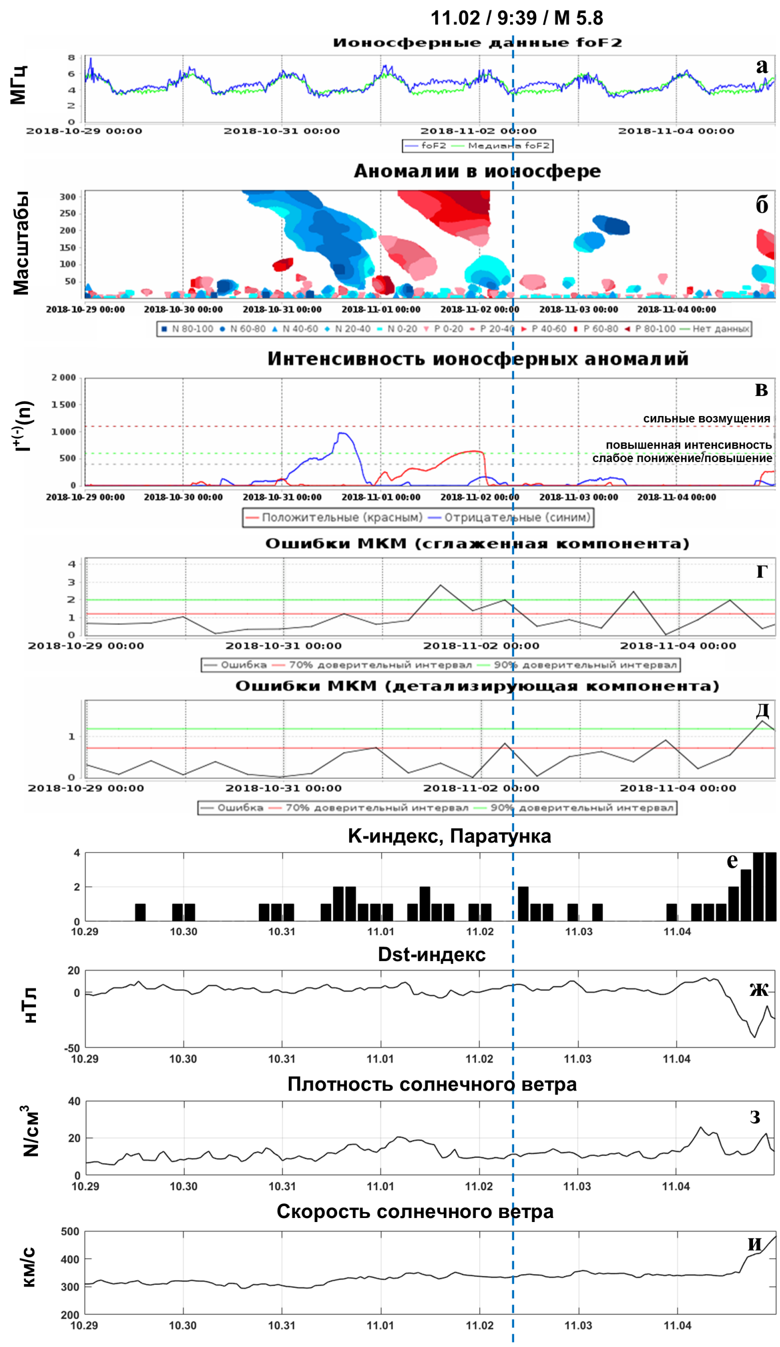

Рис. 4. Результаты работы системы «Аврора» в период землетрясения 2 ноября 2018 г (а-д): а) – данные foF2 (синим), медиана foF2 (зеленым), б), в) – выделенные ионосферные аномалии и их интенсивность, красным и синим цветом отмечены положительные и отрицательные аномалии, соответственно, г), д) – ошибки регулярных компонент и их доверительные интервалы. Вертикальный пунктир – начало землетрясения

[Figure 4. Aurora system results during the eathquake on November 2, 2018: (a-e): a) foF2 data (blue), 27-day median (green), b), c) detected positive (red) and negative (blue) ionospheric anomalies, d), e) reqular component errors and their confidence intervals. The vertical dotted line is the beginning of the earthquake]

Заключение

На примере слабой магнитной бури, произошедшей 15 июня 2024 г., подтверждена сложная динамика ионосферных параметров в периоды повышенной солнечной и геомагнитной активностей. Накануне рассмотренного события выделена продолжительная положительная ионосферная аномалия, во время наиболее сильных геомагнитных возмущений электронная концентрация в ионосфере понизилась и сформировалась отрицательная аномалия высокой интенсивности. Реакция ионосферы на анализируемую магнитную бурю имеет схожий характер с результатами, представленными в более ранних работах авторов [18, 22], и согласуется с результатами других исследователей [2, 4, 5, 9]. Анализ динамики ионосферных параметров в период рассмотренного сейсмического события 2 ноября 2018 г. показал возможность возникновения ионосферных возмущений во время сейсмических процессов на Камчатке. Выделенные аномальные изменения характеризовались как повышением, так и понижением электронной концентрации. Результаты работы подтвердили эффективность интерактивной системы «Аврора» для задач космической погоды и показали возможность её применения для изучения динамики параметров ионосферы в возмущенные периоды.

Благодарность. Авторы выражают благодарность институтам, выполняющим регистрацию данных, которые использовались в работе.

Список литературы

1. Афраймович Э. Л., Перевалова Н. П. *GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли*. Иркутск: ГУ НУ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 480 с.
2. Nakamura M., Maruyama T., Shidama Y. Using a neural network to make operational forecasts of ionospheric variations and storms at Kokubunji, Japan // *J. Natl. Inst. Inf. Commun. Technol.*, 2009. vol. 56, pp. 391–406.
3. Tsagouri I. Space weather effects on the Earth's Upper Atmosphere: short report on ionospheric storm effects at middle latitudes // *Atmosphere*, 2022. vol. 13, no. 2, pp. 346 DOI: 10.3390/atmos13020346.
4. Danilov A. D. Detailed analysis of the behavior of the F2-layer critical frequency prior to geomagnetic storms // *Adv. Space Res.*, 2022. vol. 70, no. 4, pp. 1078–1088 DOI: 10.1016/j.asr.2022.05.025.
5. Danilov A. D. Ionospheric F-region response to geomagnetic disturbances // *Adv. Space Res.*, 2013. vol. 52, no. 3, pp. 343–366.
6. Pulinets S. A., Legen'ka A. D., Hegai V. V., Kim V. P., Korsunova L. P Ionosphere disturbances preceding earthquakes according to the data of ground based station of vertical ionospheric sounding Wakkanai // *Geomagnetism and Aeronomy*, 2018. vol. 58, no. 5, pp. 686–692.
7. Rodkin M. V., Liperovskaya E. V. On the difference in physical mechanisms of earthquakes at different depths and their ionospheric response // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2023. vol. 59, pp. 377–390 DOI: 10.1134/s1069351323030114.
8. Priyadarshi S. A review of ionospheric scintillation models // *Surveys in Geophysics*, 2015. vol. 36, no. 2, pp. 295–324 DOI: 10.1007/s10712-015-9319-1.
9. Joshua B. W., Adeniyi J. O., Amory-Mazaudier C., Adebiyi S. J On the Pre-Magnetic Storm Signatures in NmF2 in Some Equatorial, Low and Mid-Latitude Stations // *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 2021. vol. 126, pp. e2021JA029459 DOI: 10.1029/2021JA029459.
10. Kumar V. V., Parkinson M. L. A global scale picture of ionospheric peak electron density changes during geomagnetic storms // *Space Weather*, 2017. vol. 15, pp. 637–652 DOI: 10.1002/2016SW001573.
11. Mansilla G. A., Zossi M. M. Longitudinal variation of the ionospheric response to the 26 August 2018 geomagnetic storm at equatorial/low latitudes // *Pure Appl. Geophys*, 2020. vol. 177, pp. 5833–5844 DOI: 10.1007/s00024-020-02601-1.

12. Фетисова Н. В Алгоритм выделения интенсивных аномальных изменений во временном ходе параметров ионосферы // *Компьютерная оптика*, 2019. Т. 43, №6, С. 1064–1071 DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-6-1064-1071.

13. Mandrikova O., Fetisova N., Polozov Yu. Method of ionospheric parameter analysis in the problems of real-time data processing // *J. Phys. Conference Series by IOP Publishing*, 2018. vol. 1096, pp. 012091 DOI: 10.1088/1742-6596/1096/1/012091.

14. Bilitza D., Pezzopane M., Truhlik V., Altadill D., Reinisch B. W., Pignalberi A. The International Reference Ionosphere model: A review and description of an ionospheric benchmark // *Reviews of Geophysics*, 2022. vol. 60, no. 4, pp. e2022RG000792 DOI: 10.1029/2022RG000792.

15. Solomentsev D. V., Titov A. A., Khattatov B. V. Three-dimensional assimilation model of the ionosphere for the European region // *Geomagn. Aeron.*, 2013. vol. 53, no. 1, pp. 73–84 DOI: 10.1134/S0016793212060114.

16. Huba J. D., Liu H. L. Global modeling of equatorial spread F with SAMI3/WACCM-X // *Geophysical Research Letters*, 2020. vol. 47, no. 14, pp. e2020GL088258 DOI: 10.1029/2020GL088258.

17. Mandrikova O, Fetisova N, Polozov Y. Hybrid Model for Time Series of Complex Structure with ARIMA Components // *Mathematics*, 2021. vol. 9, no. 10, pp. 1122 DOI: 10.3390/math9101122.

18. Mandrikova O., Fetisova N. Modeling and analysis of ionospheric parameters based on multicomponent model // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2020. vol. 208, pp. 105399 DOI: 10.1016/j.jastp.2020.105399.

19. Box G., Jenkins G. *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. San Francisco: Holden Day, 1970. 537 pp.

20. Mallat S. *A Wavelet Tour of Signal Processing: 3rd ed.*. London: Academic Press, 1999. 637 pp.

21. Левин Б. Р. *Теоретические основы статистической радиотехники*. Москва: Советское радио, 1969. 752 с.

22. Mandrikova O., Fetisova N. Analysis of ionospheric parameters during solar events and magnetic storms // *Solar-Terrestrial Relations and Physics of Earthquake Precursors. STRPEP 2023. Springer Proceedings in Earth and Environmental Science*, 2023, pp. 3–13 DOI: 10.1007/978-3-031-50248-4_1.

Информация об авторах

Фетисова Надежда Владимировна ✉ – кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории системного анализа Института космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Камчатский край, Россия, ORCID 0000-0001-5769-4726.

Мандрикова Оксана Викторовна ✉ – доктор технических наук, профессор, заведующая лабораторией системного анализа Института космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Камчатский край, Россия, ORCID 0000-0002-6172-1827.

References

[1] Afraymovich E., Perevalova N. GPS-monitoring Verhnej Atmosfery Zemli [GPS Monitoring of the Earth's Upper Atmosphere]. Irkutsk, GU NU RVKh VSNTs SO RAMN, 2006, 480 pp. (In Russian).

[2] Nakamura M., Maruyama T., Shidama Y. Using a neural network to make operational forecasts of ionospheric variations and storms at Kokubunji, Japan, J. Natl. Inst. Inf. Commun. Technol., 2009, vol. 56, pp. 391–406.

[3] Tsagouri I. Space weather effects on the Earth's Upper Atmosphere: short report on ionospheric storm effects at middle latitudes, Atmosphere, 2022, vol. 13, no. 2, pp. 346. DOI: 10.3390/atmos13020346.

[4] Danilov A. D. Detailed analysis of the behavior of the F2-layer critical frequency prior to geomagnetic storms, Adv. Space Res., 2022, vol. 70, no. 4, pp. 1078–1088. DOI: 10.1016/j.asr.2022.05.025.

[5] Danilov A. D. Ionospheric F-region response to geomagnetic disturbances, Adv. Space Res., 2013, vol. 52, no. 3, pp. 343–366.

[6] Pulinets S. A., Legen'ka A. D., Hegai V. V., Kim V. P., Korsunova L. P. Ionosphere disturbances preceding earthquakes according to the data of ground based station of vertical ionospheric sounding Wakkanai, Geomagnetism and Aeronomy, 2018, vol. 58, no. 5, pp. 686–692.

[7] Rodkin M. V., Liperovskaya E. V. On the difference in physical mechanisms of earthquakes at different depths and their ionospheric response, Izvestiya, Physics of the Solid Earth, 2023, vol. 59, pp. 377–390. DOI: 10.1134/s1069351323030114.

[8] Priyadarshi S. A review of ionospheric scintillation models, Surveys in Geophysics, 2015, vol. 36, no. 2, pp. 295–324. DOI: 10.1007/s10712-015-9319-1

[9] Joshua B. W., Adeniyi J. O., Amory-Mazaudier C., Adebiyi S. J. On the Pre-Magnetic Storm Signatures in NmF2 in Some Equatorial, Low and Mid-Latitude Stations, J. Geophys. Res. Space Phys., 2021, vo.l 126, pp. e2021JA029459. DOI: 10.1029/2021JA029459

[10] Kumar V. V., Parkinson M. L. A global scale picture of ionospheric peak electron density changes during geomagnetic storms, Space Weather, 2017, vol. 15, pp. 637–652. DOI: 10.1002/2016SW001573.

[11] Mansilla G. A., Zossi M. M. Longitudinal variation of the ionospheric response to the 26 August 2018 geomagnetic storm at equatorial/low latitudes, Pure Appl. Geophys., 2020, vol. 177, pp. 5833–5844. DOI: 10.1007/s00024-020-02601-1.

[12] Fetisova N. V., An algorithm for detecting intense anomalous changes in the time dependence of ionospheric parameters, Computer Optics, 2019, vol. 43, no. 6, pp. 1064–1071. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-6-1064-1071. (In Russian).

[13] Mandrikova O., Fetisova N., Polozov Yu. Method of ionospheric parameter analysis in the problems of real-time data processing, J. Phys. Conference Series by IOP Publishing, 2018, vol. 1096, pp. 012091. DOI: 10.1088/1742-6596/1096/1/012091.

[14] Bilitza D., Pezzopane M., Truhlik V., Altadill D., Reinisch B. W., Pignalberi A., The International Reference Ionosphere model: A review and description of an ionospheric benchmark, Reviews of Geophysics, 2022, vol. 60, no. 4, pp. e2022RG000792. DOI: 10.1029/2022RG000792.

[15] Solomentsev D. V., Titov A. A., Khattatov B. V. Three-dimensional assimilation model of the ionosphere for the European region, Geomagn. Aeron., 2013, vol. 53, no. 1, pp. 73–84. DOI: 10.1134/S0016793212060114.

[16] Huba J. D., Liu H. L. Global modeling of equatorial spread F with SAMI3/WACCM-X, Geophysical Research Letters, 2020, vol. 47, no. 14, pp.e2020GL088258. DOI: 10.1029/2020GL088258.
[17] Mandrikova O, Fetisova N, Polozov Y. Hybrid Model for Time Series of Complex Structure with ARIMA Components, Mathematics, 2021, vol. 9, no. 10, pp. 1122. DOI: 10.3390/math9101122.
[18] Mandrikova O., Fetisova N., Modeling and analysis of ionospheric parameters based on multicomponent model, J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 2020, vol. 208, pp. 105399. DOI: 10.1016/j.jastp.2020.105399.
[19] Box G., Jenkins G. Time Series Analysis: Forecasting and Control. San Francisco, Holden Day, 1970, 537 p.
[20] Mallat S. A Wavelet Tour of Signal Processing: 3rd ed. London, Academic Press, 1999, 637 p.
[21] Levin B. R.Teoreticheskiye osnovy statisticheskoy radiotekhniki [Theoretical basis of statistical radio techniques]. Moscow, Sovetskoye radio, 1969, 752 p. (In Russian).
[22] Mandrikova O., Fetisova N. Analysis of ionospheric parameters during solar events and magnetic storms, Solar-Terrestrial Relations and Physics of Earthquake Precursors. STRPEP 2023. Springer Proceedings in Earth and Environmental Science, 2023, pp. 3–13. DOI: 10.1007/978-3-031-50248-4_1

Information about the authors

Fetisova Nadezhda Vladimirovna – Ph. D. (Tech.), Researcher of System Analysis Laboratory at the Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, Kamchatka region, Russia, ORCID 0000-0001-5769-4726.

Mandrikova Oksana Viktorovna – D. Sci. (Tech.), Professor, Head of System Analysis Laboratory at the Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, Kamchatka region, Russia, ORCID 0000-0002-6172-1827.