

МЕТОД ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ИОНОСФЕРЫ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В ПЕРИОДЫ МАГНИТНЫХ БУРЬ И СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА КАМЧАТКЕ

Мандрикова О.В., Полозов Ю.А., Павлов А.В.

ИКИР ДВО РАН, с. Паратунка, Камчатский край, Россия

Аннотация. Исследован новый автоматизированный метод оценки состояния ионосферы по данным наземного вертикального радио-зондирования и региональной сети приёмников ГНСС. Построенные на основе метода численные решения используются в интерактивной системе Аврора (<https://isaoranalysis.ikir.ru>, система разработана в ИКИР ДВО РАН). Результатами работы метода являются данные о состоянии ионосферы (спокойное/возмущенное) и параметры ионосферных неоднородностей, в случае возмущенного состояния. В работе представлены результаты метода в период сильной магнитной бури за 2023 г., сильного эксплозивного извержения вулкана Шивелуч 10–12 апреля 2023 г. и в период очень сильного землетрясения 29 июля 2025 года с магнитудой M=8.8.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Данная работа продолжает исследования [1-3] и направлена на создание автоматизированных методов анализа ионосферных данных и обнаружения ионосферных неоднородностей. В работе использовались данные критической частоты ионосферы foF2 ст. Паратунка (53.0° с.ш. и 158.7° в.д., Россия, Камчатский край) и ст. Вакканай (45.16° с.ш. и 141.75° в.д., Япония). Выполнялась обработка 15-минутных данных ст. Паратунка (ИКИР ДВО РАН), а также 15-минутных и часовых данных ст. Вакканай (WDC for Ionosphere and Space Weather, Tokyo). При формировании выборки данных критической частоты ионосферы foF2 учитывалось их качество, использовались данные, не имеющие длительных пропусков (12 ч и более) и не содержащие выбросов, характерных для аппаратных погрешностей. В случае наличия пропусков в данных менее 12 ч, они заполнялись медианными значениями. Для вычисления ПЭС использовались данные GPS-приёмников (рис. 1), входящих в региональную сеть ГНСС KAMNET (КФ ФИЦ ЕГС РАН). Расчёт ПЭС производился с временным шагом 15 минут на основе алгоритма TayAbsTES, который позволяет получить значения абсолютных вертикальных ПЭС с учётом ошибок, связанных с дифференциальными кодовыми задержками.

Описание метода. Временной ряд данных $y(t_n)$ (исходные данные критической частоты ионосферы foF2 или ПЭС) рассматривается как линейная комбинация полезной составляющей и помехи

$$y(t_n) = A(t_n) + \varepsilon(t_n) \quad (1)$$

где $A(t_n)$ – полезная составляющая ряда (аномалия), $\varepsilon(t_n)$ – помеха.

Обнаружение аномалий в данных выполняется на основе отображения данных в вейвлет-пространство и применения адаптивных порогов. Выполняются следующие алгоритмические операции:

Шаг 1. Временной ряд данных $y(t_n)$ представляется в виде его разложения по вейвлет-базису:

$$y(t_n) = \sum_{j,k} V(j, t_k) \Psi_{jk}(t_n) \quad (2)$$

где $\Psi_{jk}(t_n) = 2^j \Psi(2^j t_n - t_k)$ – базисные вейвлеты; j – параметр масштаба, k – параметр времени, $j, k \in \mathbb{N}$.

$V(j, t_k)$ – вейвлет-коэффициенты; $\langle \cdot \rangle$ – знак скалярного произведения.

Шаг 2. Для оценки составляющей ряда $A(t_n)$, к полученному на основе отображения (2) массиву вейвлет-коэффициентов $V(j, t_k)$ на каждом масштабе j применяется адаптивная пороговая функция:

$$\hat{A}(t_n) = \Pi_{T_{j,\alpha}}^u [V(j, t_k)] = \begin{cases} V(j, t_k), & \text{если } |V(j, t_k)| \geq T_{j,\alpha}^u \\ 0, & \text{если } |V(j, t_k)| < T_{j,\alpha}^u \end{cases} \quad (3)$$

где пороги $T_{j,\alpha}^u = K_\alpha \hat{\sigma}_j^u$, коэффициенты K_α – α -квантили распределения Стюдента.

$\hat{\sigma}_j^u = \sqrt{\frac{1}{u-1} \sum_{k=1}^u (V(j, t_k) - \bar{V}(j, t_k))^2}$ – оценка среднеквадратического отклонения вейвлет-коэффициентов, которое оценивается в скользящем окне длины u .

$\bar{V}(j, t_k)$ – среднее значение.

Шаг 3. В каждый момент времени $t=t_k$ выполняется оценка интенсивности аномалии:

$$I_\alpha(t_n) = \sum_{j=0}^J \Pi_{T_{j,\alpha}}^u [V(j, t_k)] \quad (4)$$

где J – наибольший масштаб разложения данных. Для обработки данных в работе использовались следующие параметры описанного алгоритма: длина временного окна u соответствовала 5 суткам; пороговый коэффициент K_α для $\alpha=0.87$ –0.999 принимал соответствующие значения $K_\alpha=1.5$ –3.2. В системе Аврора пороговый коэффициент $K_\alpha=2.3$, соответствует $\alpha=0.98$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

На рис. 2 показаны результаты применения метода в период очень сильной геомагнитной бури 23 марта 2023 г. За трое суток до начала события (момент регистрации бури отмечен на рис. 2 вертикальным красным пунктиром, по данным <http://kakioka-jma.go.jp>) флуктуации Bz компоненты межпланетного магнитного поля (ММП) в южном направлении не превышали –5 нТл, Dst-индекс варьировал около нуля (рис. 2а,б). По данным космической погоды (<http://ipg.geospace.ru>) около 4:00 UTC 21 марта пришел неоднородный ускоренный поток от корональной дыры и выброса корональной массы (СМЕ от 17 марта). Результаты метода в системе Аврора (рис. 2д,е) показывают в период прихода ускоренного потока возникновение положительной аномалии (во второй половине 21 марта), характеризующей аномальное повышение электронной концентрации (рис. 2д). Максимальных значений аномалия достигла к 14:00 UTC 22 марта (рис. 2е). Отметим, что визуальный анализ исходных данных foF2 (рис. 2г) не позволяет выделить положительную аномалию 21-22 марта. Обнаружение данной аномалии с использованием метода выполняется благодаря высокой детектирующей способности вейвлетов, обеспечивающих на каждом рассматриваемом масштабе j (см. формулу (2)) существенное увеличение амплитуд локальных особенностей (аномалий) в данных. Последующее суммирование данных амплитуд по масштабам (формула (4)) позволило выделить данную аномалию в foF2.

На следующие сутки 22 марта геомагнитная активность незначительно возросла (рис. 2в), по данным ст. Паратунка суточное значение К-индекса=20. В этот период положительная аномалия сменилась на отрицательную аномалию (рис. 2д,е). Далее, около 4:00 UTC 23 марта пришел неоднородный ускоренный поток от выброса корональной массы (СМЕ от 21 марта), флуктуации южной компоненты ММП усилились до Bz =–16 нТл (рис. 2а). В 08:00 UTC зарегистрировано начало геомагнитной бури, в период основной фазы бури наблюдается локальное аномальное повышение электронной концентрации (рис. 2д,е), по-видимому, связанное с быстрым проникновением электрических полей в плазменный слой (эффект PPEF). На восстановительной фазе геомагнитной бури, по данным обработки (рис. 2д,е) и по оценкам медианных значений (рис. 2г, отмечены зеленым цветом), развилась отрицательная ионосферная буря. В течение суток 24 марта, по данным космической погоды (<http://ipg.geospace.ru>), пришло еще несколько неоднородных ускоренных потоков от выброса корональной массы и от корональной дыры. Продолжающееся поступление энергии в магнитосферу Земли, по-видимому, привело к развитию положительной аномалии в ионосфере к концу суток 24 марта (рис. 2д,е).

Численные расчеты, выполненные по данным ст. Паратунка с использованием разных порогов (рис. 2ж–о), подтверждают достоверность результатов в системе Аврора. Понижение порогового коэффициента до $K_\alpha=1.5$ ($\alpha=0.87$) позволяет на 2-3 часа ранее обнаружить предбуревую положительную аномалию 21 марта (рис. 1ж,и), по сравнению с системой Аврора (в системе $\alpha=0.98$, рис. 2д,е). Но достоверность информации, очевидно, понижается. Сравнение результатов обработки данных ст. Паратунка (рис. 2ж–и) с результатами данных ст. Вакканай (рис. 2к–о) показывает их идентичность, что свидетельствует о больших пространственно-временных масштабах анализируемых ионосферных процессов, а также подтверждает достоверность результатов метода.

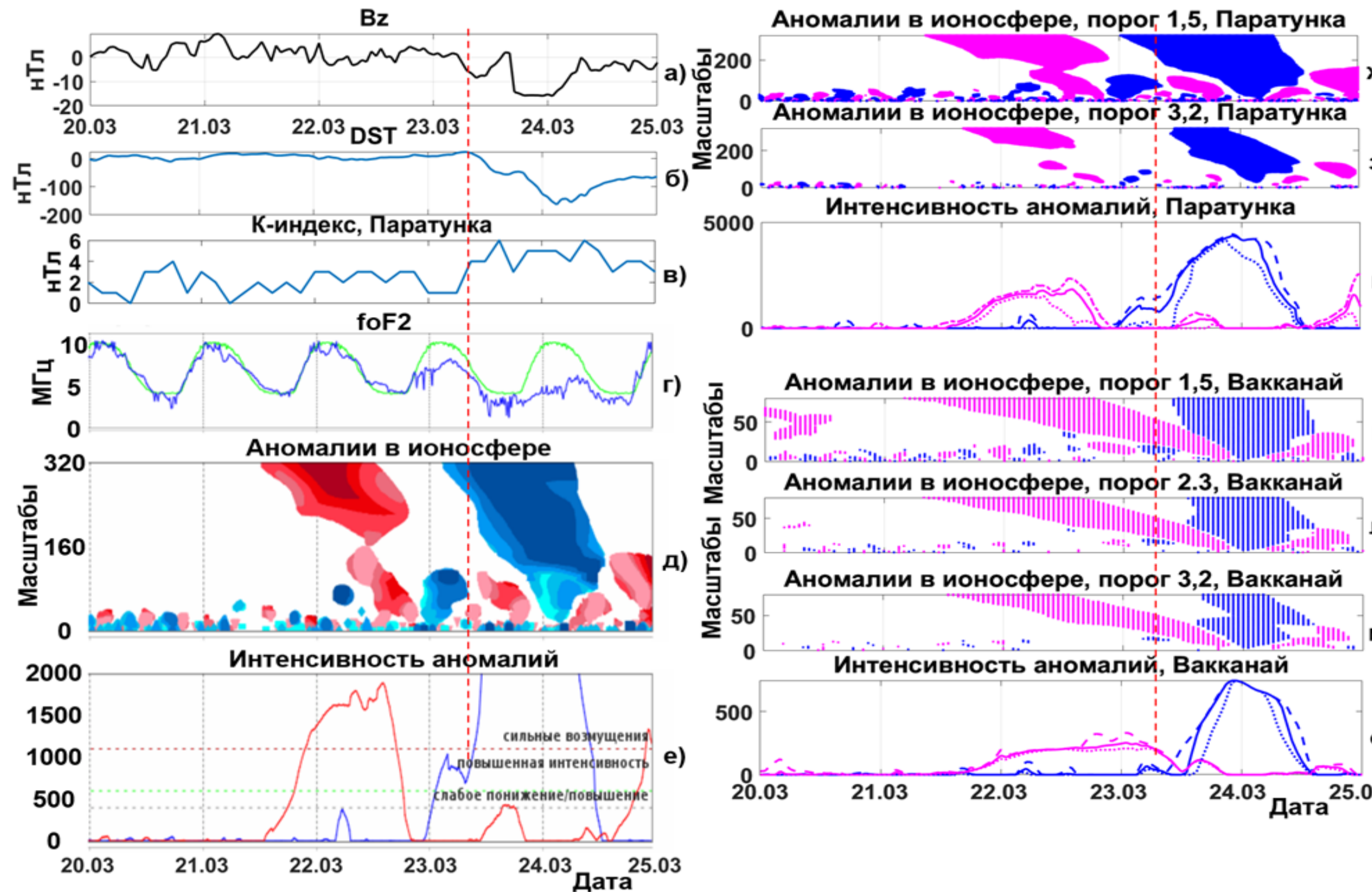


Рис. 2. Результаты обработки данных за период 20-24 марта 2023 года. Слева показаны результаты метода в системе Аврора: а) – ММП Bz; б) – Dst-индекс; в) – К-индекс, ст. Паратунка; г) – данные foF2 (синим – данные регистрации, зеленым – медианные значения); д) и е) – выделенные ионосферные аномалии и их интенсивность (красным – положительные аномалии, синим – отрицательные аномалии), порог $K_\alpha=2.3$; Справа показаны результаты численных расчетов с ионосферными данными ст. Паратунка и ст. Вакканай: ж), з), к), л), м) – выделенные аномалии, с использованием разных порогов; и) и о) – интенсивность выделенных аномалий (пунктир – порог 1.5; сплошная – порог 2.3; точки – порог 3.2). Красный вертикальный пунктир – начало магнитной бури.

На рис. 3 представлены результаты применения метода в период сильного эксплозивного извержения вулкана Шивелуч 10-12 апреля 2023 г. При проведении анализа значения порога в (3) варьировалось в диапазоне от $K_\alpha=1.5$ ($\alpha=0.87$) до $K_\alpha=3.0$ ($\alpha=0.997$). Положительные аномальные изменения (относительно характерного уровня) в параметрах ионосферы показаны на рис. 3в-р красным цветом, отрицательные – синим цветом. Сравнение динамики параметров ионосферы по данным анализируемых ионозондов (рис. 3в-е) и по данным ГНСС (рис. 3ж-р) показывает наличие ярко выраженной положительной ионосферной аномалии, наблюдаемой над Камчаткой в преддверии извержения вулкана, и ее полное отсутствие в районе Японии, что свидетельствует о локальном характере выделенного эффекта.

Как видно из рис. 3ж-р, с 00:00 LT до 06:00 LT 10 апреля (12:00–18:00 09 апреля UTC) (за сутки до извержения вулкана) на станциях _kbg, _klu1, _kzoz и _mil1, расположенных вблизи вулкана (рис.1), наблюдалась интенсивная (согласно пороговому уровню $K_\alpha=2.0$ ($\alpha=0.95$)) положительная аномалия с максимумами в ночные часы. Интенсивность аномального повышения электронной концентрации в эти часы существенно превышает интенсивность аномального повышения электронной концентрации в дневные часы местного времени. Аналогичная аномальная динамика параметров ионосферы в этот временной интервал наблюдается в данных ст. Паратунка, которая находится на расстоянии ~453 км от вулкана (рис.1).

По данным ст. Паратунка (рис. 3д,е) аномальное повышение электронной концентрации имело более продолжительный характер, плавное возрастание интенсивности возмущения наблюдается с 00:00 LT 9 апреля (примерно за двое суток до начала извержения вулкана).

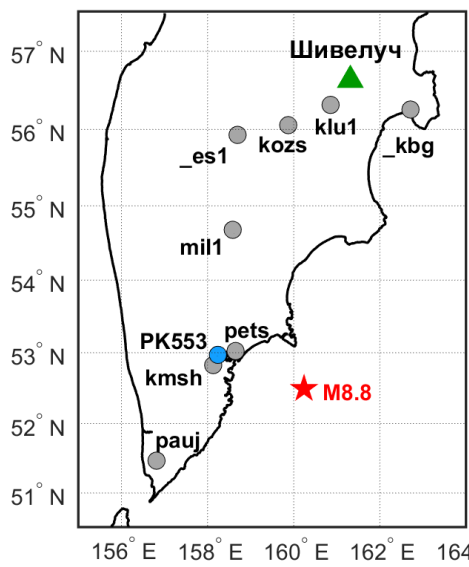


Рис. 1. Карта с расположением GPS-приемников (серые круги) и ионосферной станции Паратунка (PK553) (синий круг) в Камчатском регионе. Местоположение вулкана Шивелуча отмечено зеленым треугольником. Эпицентр землетрясения магнитудой M=8.8, отмечен красной звездочкой.

В ночные часы следующих суток интенсивность положительной аномалии незначительно возрастает и к 06:00 LT 10 апреля возвращается к фоновому уровню. В отличие от приёмников, расположенных вблизи вулкана, на станции _es1 (рис. 3п-р) значения ПЭС в этот временной интервал варьировали в рамках фона. Данная станция удалена от вулкана на ~180 км в юго-западном направлении (рис. 1). По данным ст. Вакканай (рис. 3в,г) вариации критической частоты ионосферы foF2 в этот период имели фоновые значения. Также важно заметить, что геомагнитная активность в период наблюдаемой положительной аномалии была очень низкой – К-индекс принимал значения $K \leq 1$ (по данным обсерватории «Паратунка») (рис. 3а), Dst-индекс в ночные часы не опускался ниже –10 нТл (рис. 3б), межпланетное магнитное поле варьировало в диапазоне –3 нТл $\leq Bz \leq 3$ нТл (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>).

Таким образом, анализ динамики параметров ионосферы по данным рассматриваемых ионозондов и GPS-приёмников показал продолжительное аномальное возрастание электронной плотности ионосферы в локальной области вблизи вулкана Шивелуч, которое возникло более чем за сутки до начала извержения вулкана и наблюдалось на фоне очень низкой геомагнитной активности. Факт возникновения данной ионосферной аномалии в локальной области вблизи вулкана, ее формирование в ночные часы местного времени и на фоне очень спокойного геомагнитного поля указывают на связь выделенной положительной аномалии с последующим извержением вулкана Шивелуч 10 апреля 2023 г.

На рис. 4 представлены результаты применения рассматриваемого метода к данным foF2 и ПЭС в период очень сильного землетрясения с M=8.8, произошедшего 29 июля 2025 г. в 23:24:53 UTC. При проведении анализа значения порога K_α в формуле (3) для ст. Паратунка было установлено равное $K_\alpha=1.5$ ($\alpha=0.87$), а для GPS-приёмников – $K_\alpha=2.5$ ($\alpha=0.988$).

Анализ результатов обработки foF2 (рис. 4г,д) показывает, что на фоне незначительного повышения геомагнитной активности 22-24 июля 2025 года (22 июля суммарное за сутки значение К-индекса составляет $\sum K=22$, а 23 и 24 июля $\sum K=24$, АЕ-индекс в эти даты превышал значение 600 нТл) в ионосфере происходили колебательные процессы, общий фон foF2 был существенно повышен – наблюдалась продолжительная положительная аномалия (показана красным цветом). Наличие колебательных процессов в ионосфере 22-24 июля также подтверждают результаты, полученные по данным ПЭС. Продолжительная положительная аномалия в ПЭС четко видна по данным всех GPS-приёмников (рис. 4е-п), что указывает на общий характер ионосферного процесса в этот период.

Накануне землетрясения в ионосфере сформировалась продолжительная отрицательная аномалия (показана синим цветом). По данным foF2 (рис. 4г,д) аномалия возникла за 3.5 суток до землетрясения и имела малую интенсивность. Данная аномалия также наблюдается в данных приёмников _kbg, _kzoz, _kmsh и _rau1 (рис. 4е-н), но наиболее выражена в данных _rau1 (рис. 4м,н). Согласно данным _rau1, превышение порогов, наблюдаемые 27 и 28 июля, соответствует очень интенсивным отрицательным ионосферным возмущениям. По данным приёмников _kbg, _kzoz видно, что наибольшая интенсивность аномалии достигается ночью по местному времени. Следует отметить, что в период формирования отрицательной аномалии и во время наибольших значений её интенсивности геомагнитное поле было спокойное (трёхчасовые значения К-индекса обсерватории «Паратунка» не превышали К=2 (рис. 4а), АЕ-индекс имел значения менее 100 нТл (рис. 4в)). Наблюдаемый по данным разных измерений общий характер ионосферного процесса в предсейсмический период указывает на достоверность этих результатов. Дополнительно можно отметить, что в данных приёмника _rets отрицательная аномалия не была выделена, что указывает на необходимость развития сети ГНСС. В момент возникновения землетрясения и в период развития афтершокового процесса, по результатам foF2 и ПЭС, в ионосфере сформировалась продолжительная положительная аномалия. В данных разных GPS-приёмников периоды превышения аномальных порогов имеют некоторые смещения по времени, но динамика процесса общая.

Наблюдаемая аномальная динамика в параметрах ионосферы, предшествовавшая наступлению рассмотренных крупных сейсмических событий, полностью согласуется с моделью литосферно-атмосферно-ионосферно-магнитосферных связей (LAIC) [4]. Согласно этой модели, формирование подобных аномалий связано с поведением планетарного пограничного слоя атмосферы в локальное (ночное) время. В ночное время в пограничном слое может накапливаться радон, выделяющийся из земной коры в области подготовки землетрясения, вследствие чего повышается уровень ионизации, и, соответственно, увеличивается плотность кластерных ионов, также изменяются электрические свойства Глобальной электрической цепи, что далее может приводить к формированию крупномасштабных положительных и отрицательных аномалий в ионосфере.

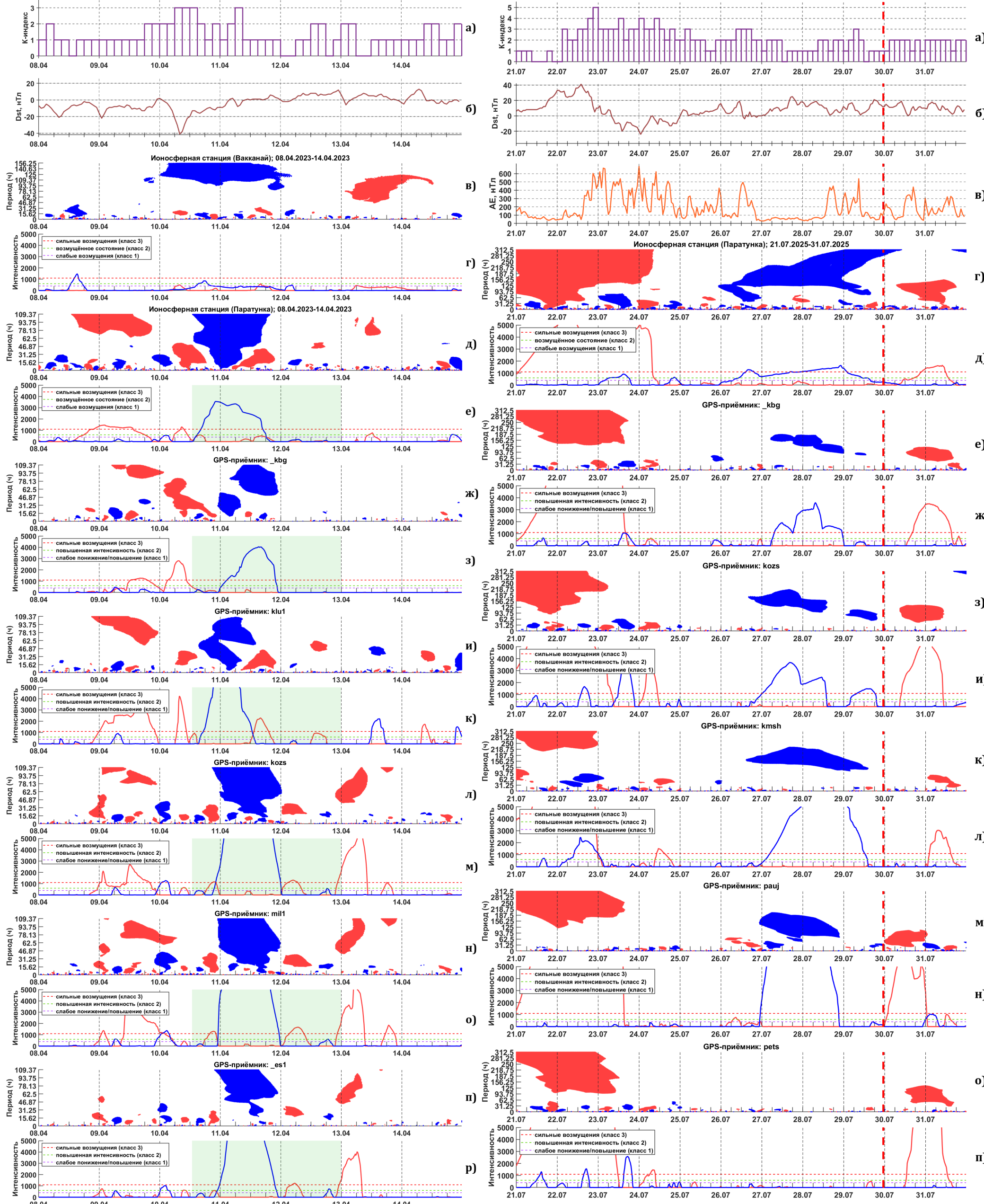


Рис. 3. Результаты обработки foF2 и ПЭС за период 08-14 апреля 2023 года. Индексы геомагнитной активности: К-индекс (а), Dst-индекс (б). Обработка данных ст. Вакканай (в, г) и ст. Паратунка (д, е), GPS-приёмников (ж-р). Период эксплозивного извержения вулкана Шивелуч с 10 по 12 апреля 2023 г. отмечен цветовой заливкой на графиках (д-р).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование подтвердило эффективность разработанного метода для изучения поведения ионосферы в периоды повышенной солнечной активности и геомагнитных бурь, а также в периоды крупных сейсмических событий. Применение метода в интерактивной системе Аврора позволяет в онлайн режиме получать информацию об аномальных изменениях в ионосферных параметрах над Камчаткой. Анализ результатов метода при варьировании его параметров подтвердил важность оптимизации численных расчетов, для получения более достоверной и детальной информации о процессах в ионосфере. Результаты работы подтвердили факт возможного предоповещения в ионосфере накануне магнитных бурь. Результаты анализа динамики ионосферных параметров с помощью представленного метода в периоды высокой сейсмической активности на Камчатке подтвердили достоверность модели литосферно-атмосферно-ионосферно-магнитосферных связей (LAIC).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят организации WDC for Geomagnetism, Kyoto; NASA's Space Physics Data Facility; Kakioka Magnetic Observatory; WDC for Ionosphere and Space Weather, Tokyo, National Institute of Information and Communications Technology; Центр Коллективного Пользования «Северо-восточный гелиогеофизический центр» (ЦКП СВГЦ) СКР_558279 и КФ ФИЦ ЕГС РАН, чьи данные использовались в работе.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена за счет Гос. задания ИКИР ДВО РАН (рег. № темы 124012300245-2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Mandrikova O., Fetisova N., Polozov Y. Hybrid Model for Time Series of Complex Structure with ARIMA Components // Mathematics. 2021. V. 9. P. 1122. DOI: 10.3390/math9101122.
- Полозов Ю.А., Мандрикова О.В. Анализ вариаций геомагнитного поля по результатам интерактивной системы «Аврора» // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2024. Т. 49. № 4. С. 112-124. DOI: 10.26117/2079-6641-2024-49-4-112-124.
- Mandrikova O., Fetisova N. Modeling and analysis of ionospheric parameters based on multicomponent model // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2020. V. 208. P. 105399. DOI: 10.1016/j.jastp.2020.105399.
- Пунинг С.А., Узуню Д.Л., Карелин А.В., Давиденко Д.В. Физические основы генерации краткосрочных предвестников землетрясений. Комплексная модель геофизических процессов в системе литосфера-атмосфера-ионосфера-магнитосфера, инициируемых ионизацией // Геомагнетизм и аэронавтика. 2015. Т. 55. № 4. С. 540-158. DOI: 10.7868/S0016794015040136.