

## **2 Методы изучения динамических процессов в магнитосферно-ионосферной системе по данным геофизического мониторинга. Комплексный анализ параметров магнитного поля, плазмы и космических лучей в периоды повышенной солнечной активности и магнитных бурь. Задача прогноза аномальных эффектов космической погоды по результатам комплексного анализа геофизических параметров.**

Объектами исследования являются сложные динамические процессы в магнитосферно-ионосферной системе, обусловленные явлениями и процессами солнечного происхождения. В результате исследования созданы новые методы анализа вариаций геомагнитного поля, параметров ионосферы и динамики космических лучей галактического и солнечного происхождения, обладающие высокой степенью адекватности изучаемым процессам, автономность и высокую степень автоматизации.

### **2.1 Процессы генерации и распространения геомагнитных возмущений**

#### **2.1.1 Постановка задачи, анализ предлагаемых подходов**

Влияние солнечной активности на магнитосферу Земли носит весьма сложный характер, и многие аспекты которого до сих пор недостаточно изучены [1, 2]. Поскольку состояние магнитосферно-ионосферной системы является важным фактором космической погоды, которая влияет на многие аспекты нашей жизни, работы в этой области имеют большой научно-практический интерес [1, 2, 3]. Особенно важны наблюдения в высокоширотных областях (в число которых входят анализируемые станции ИКИР ДВО РАН: Магадан и Мыс Шмидта), где прогноз космической погоды весьма важен для надежной работы технической инфраструктуры региона. В регистрируемых вариациях магнитного поля Земли находят отображение различные геофизические процессы в околоземном пространстве, в периоды магнитных бурь они содержат негладкие локальные особенности, возникающие в случайные моменты времени и несущие важную информацию о процессах в магнитосфере [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14]. Традиционные методы анализа данных, использующие базовые модели временных рядов, различные операции сглаживания и методы Фурье-анализа, не являются достаточно эффективными для изучения быстропротекающих нестационарных процессов и, как отмечено в работах [15, 16, 17, 18] не позволяют идентифицировать тонкие локальные особенности, характеризующие короткопериодные колебания в периоды повышенной геомагнитной активности, и оценить их динамические характеристики накануне и в периоды бурь. В настоящее время интенсивное развитие в данной области получают современные математические методы и технологии [pau, hafez, xu, pas, hu, jach, mach, sol3]. На основе приложений DataMining для оптимизации процесса регистрации геофизических данных и формирования мировых баз данных разработаны методы по автоматизации работы экспертов данной предметной области [19], созданы алгоритмы выделения помех на этапе первичной обработки магнитных данных [20, 21, 3] и иденти-

фикации аномалий в периоды магнитных бурь [3]. Авторы работ [20, 21, 3] для решения этих задачи используют новый подход - «Дискретный математический анализ» (ДМА), включающий фундаментальные понятия математического анализа и современные подходы, основанные на логике Л. Заде. Группа ученых из Индии [22] разработала способ моделирования вариаций геомагнитного поля для низкоширотных станций, основанный на нейронных сетях. Группой ученых из Египта (SpaceWeatherMonitoringCenter, HelwanUniversity, Egypt) предложено использовать нейронные сети для предсказания времени пути межпланетной ударной волны [23]. На основе нейронных сетей авторами [24] предложен алгоритм обработки данных межпланетного магнитного поля и вычисления Dst-индексов. В настоящее время математический аппарат вейвлет-преобразования широко применяется в задачах анализа вариаций магнитного поля Земли [4, 10, 6, 7, 17, 14, 5, 25]. В работе [4] вейвлет-преобразование применяется для исследования связи короткопериодных колебаний геомагнитного поля, параметров солнечного ветра и межпланетного поля в периоды геомагнитных бурь. На основе вейвлет-преобразования решаются такие задачи, как удаление шума и исключение периодической компоненты вариаций геомагнитного поля, вызванной вращением Земли [6, 7]. Используя дискретное вейвлет-преобразование, авторами [5] предложен алгоритм автоматического определения периодов начальной фазы магнитной бури. На основе анализа вейвлет-спектра вариаций геомагнитного поля предложен метод прогноза сильных геоэффективных солнечных вспышек [25]. В рамках выполнения данной НИР использовались различные конструкции вейвлет-преобразования, а также применялось их совмещение с аппаратом нейронных сетей. В работе предложен новый подход, основанный на совмещении нейронных сетей с вейвлет-преобразованием, и показана его эффективность в задачах анализа геомагнитных данных [26, 27, 28, 29]. Улучшена ранее разработанная модель вариации геомагнитного поля [30, 17, 14] и на ее основе созданы автоматические алгоритмы анализа вариаций геомагнитного поля и выделения и оценки интенсивности возмущений [31, 32, 33]. На заключительном этапе выполнения работы (2017г.) особое внимание уделялось разработке вычислительных решений по выделению и оценке кратковременных аномальных возрастных интенсивности геомагнитных возмущений, которые могут возникать накануне магнитных бурь и имеют важное прикладное значение. На основе разработанных ранее методик в работе по данным сети наземных станций на северо-востоке России (использовались данные станций «о.Котельный» KTN, «Тикси» TIX, «Чокурдах» CHD, «Зырянка» ZYK, «Мыс Шмидта» CPS, «Якутск» YAK, «Магадан» MGD, «Паратунка» PET, «Хабаровск» KHB) и приэкваториальных Индийских станций (использовались данные станций «Hyderabad» HYB и «Choutuppal» CPL) выполнен анализ вариаций геомагнитного поля в периоды сильных магнитных бурь и получена детальная картина распределения и динамики возмущений в анализируемых районах. Важным в данном подходе является возможность использования регистрируемых на земной поверхности данных геомагнитного поля, методы анализа которых могут значительно дополнить существующие прогностические методы. Учитывая неполные априорные знания о динамике магнитосферных токовых систем, а также ограниченный объем получаемой информации о процессах в околоземном пространстве, наличие шумов, возможные аппаратные сбои др., успешное

решение задачи прогноза космической погоды, безусловно, требует применения комплекса методов и технологий. Подтверждением этому служит приведенный выше широкий спектр работ и научных групп, усилия которых направлены на создание методов распознавания и анализа данных с приложением в задачах космической погоды.

### 2.1.2 Модели вариаций геомагнитного поля

В работе использовались следующие разработанные авторами модели вариаций геомагнитного поля:

#### Модель 1 вариации геомагнитного поля (использовалась для данных минутного разрешения)

$$f_0(t) = \sum_n c_{-6,n} \phi_{-6,n}(t) + \sum_{j \in I} \sum_n d_{j,n} \Psi_{j,n}(t) + \sum_{j \notin I} \sum_n d_{j,n} \Psi_{j,n}(t) = f_{trend}(t) + f_{возмущ}(t) + e(t) \quad (2.1)$$

где  $\Psi_j = \{\Psi_{j,n}\}_{n \in Z}$  - вейвлет-базис,  $\phi_j = \{\phi_{j,n}\}_{n \in Z}$  - базис, порожденный скэйлинг-функцией, коэффициенты  $c_{j,n}$  и  $d_{j,n}$  определяются соответственно из соотношений  $c_{j,n} = \langle f, \phi_{j,n} \rangle$ ,  $d_{j,n} = \langle f, \Psi_{j,n} \rangle$ ,  $I$  - набор индексов возмущенных компонент,  $j$ - масштаб.

Компонента  $f_{trend}(t) = \sum_n c_{-6,n}(t)$  в периоды спокойного геомагнитного поля описывает невозмущенный уровень горизонтальной составляющей магнитного поля Земли, а компонента  $f_{возмущ}(t) = \sum_{j \in I} g_j(t)$ , где  $g_j = \sum_n d_{j,n}$  описывает возмущения, возникающие в периоды возрастания геомагнитной активности. Компонента  $e(t) = \sum_{j \notin I} \sum_n d_{j,n} \Psi_{j,n}(t)$  является шумовой.

Определение набора индексов  $I$  возмущенной компоненты  $f_{возмущ}(t)$  может быть выполнено на основе следующего критерия [30, 14]:

$$j \in I, \text{ если } m(A_j^v) > m(A_j^k) + \epsilon \quad (2.2)$$

где  $m$ - выборочное среднее,  $v$  - индекс возмущенной вариации поля,  $k$  - индекс спокойной вариации поля,  $\epsilon$  - некоторое положительное число. Мерой магнитной возмущенности составляющей на масштабе является величина ([30, 14]):

$$A_j = \max_n |d_{j,n}| \quad (2.3)$$

Построенное на основе модели (2.1) вейвлет-дерево, определяющее структуру вариации геомагнитного поля в вейвлет-пространстве, показано на рисунке 2.1. Идентификация компонент вейвлет-дерева и результаты применения представления представлены в работах [31, 32, 33]

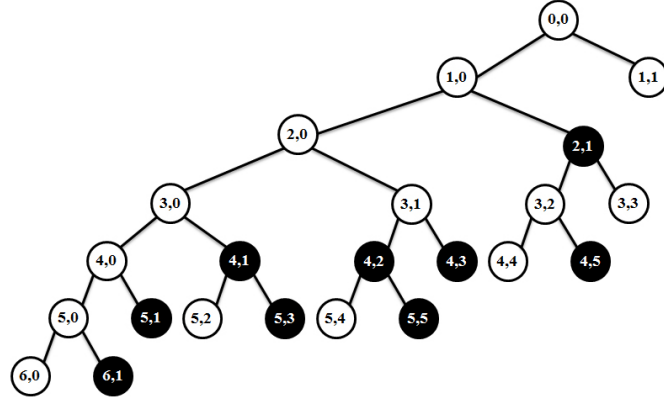


Рисунок 2.1 — Компоненты вейвлет-дерева, определяющие структуру вариаций геомагнитного поля в вейвлет-пространстве. Серым цветом показана спокойная компонента  $f_{trend}$ ; черным цветом показаны возмущенные компоненты  $g_j$

## Модель 2 вариации геомагнитного поля (использовалась для данных секунд-ного разрешения)

. Следуя результатам работы [14] вариация геомагнитного поля может быть представлена в виде:

$$f_{(0,0)}(t) = \sum_n c_{j,k,n} \phi_{j,k,n}(t) + \sum_{(j,k) \in D_i} \sum_n d_{j,k,n} \Psi_{j,k,n}(t) + \sum_{(j,k) \notin D_i} \sum_n d_{j,k,n} \Psi_{j,k,n}(t) = f_{trend}(t) + f_{dist}(t) + e(t) \quad (2.4)$$

где  $\phi_{j,k} = \{\phi_{j,k,n}\}_{n \in \mathbb{Z}}$  - базис в узле  $(j,k)$  дерева вейвлет-пакета, порожденный скэйлинг-функцией;  $\Psi_{j,k} = \{\Psi_{j,k,n}\}_{n \in \mathbb{Z}}$  - вейвлет-базис в узле  $(j,k)$  дерева вейвлет-пакета; коэффициенты  $c_{j,k,n} = \langle f, \phi_{j,k,n} \rangle$ ;  $d_{j,k,n} = \langle f, \Psi_{j,k,n} \rangle$ ;  $D_i$  - множество пар индексов,  $(j,k)$  - узел дерева вейвлет-пакета, где  $j$  - масштаб,  $k$  - номер компоненты, нижний индекс  $(0,0)$  обозначает принадлежность исходных дискретных данных узлу дерева с индексами  $(0,0)$  (предполагается, не нарушая общности).

Компонента  $f_{trend}(t) = \sum_n c_{j,k,n} \phi_{j,k,n}(t)$  в спокойные периоды описывает тренд вариации геомагнитного поля, компонента  $f_{dist}(t) = \sum_{(j,k) \in D_i} g_{j,k}(t)$ , где  $g_{j,k} = \sum_n d_{j,k,n} \Psi_{j,k,n}(t)$  в возмущенные периоды описывает пульсации из диапазона, определяемого набором индексов  $D_i$ . Компонента  $e(t) = \sum_{(j,k) \notin D_i} \sum_n d_{j,k,n} \Psi_{j,k,n}(t)$  принята за шум.

Построенное на основе модели 2 вейвлет-дерево (определено в рамках задачи выделения пульсаций в диапазонах Pi1, Pi2 и Pi3, [31, 32]) представлено на рис. 2.2. В соответствии со схемой на рис 3. множества пар индексов  $D_1 = \{(1,1); (2,1); (2,2); (3,1); (4,1); (5,1)\}$ ,  $D_2 = \{(6,1); (7,1)\}$ ,  $D_3 = \{(8,1); (9,1)\}$ . На рис. 2.3 представлен пример выделения пульсаций Pi1 и Pi2 на основе построенного образа в период магнитной бури 7 января 2015г.



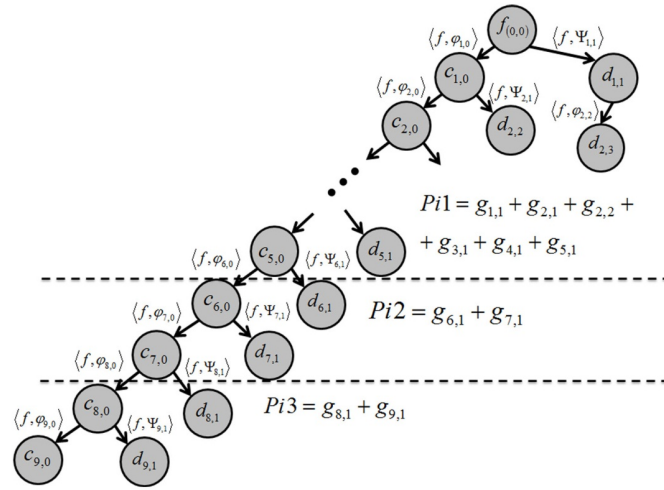


Рисунок 2.2 — Компоненты вейвлет-пакета, содержащие возмущения в диапазонах пульсаций Pi1 - Pi3

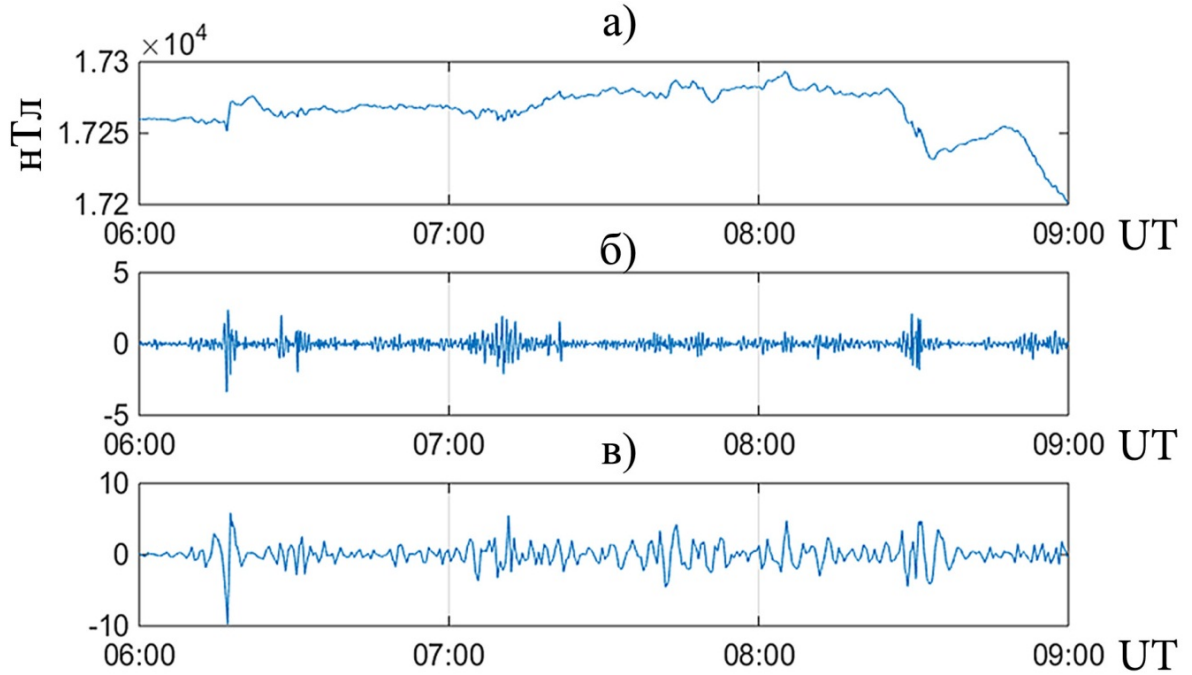


Рисунок 2.3 — Результат выделения пульсаций на основе вейвлет-пакетов: а) N-компонента магнитного поля Земли; б) выделенные возмущения в диапазоне пульсаций Pi1; в) выделенные возмущения в диапазоне пульсаций Pi2

### 2.1.3 Выделение и оценка интенсивности геомагнитных возмущений

Используя непрерывное вейвлет-преобразование, определяемое формулой [35, 36]

$$(W_{\Psi}f)(b,a) := |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)dt, \Psi - \text{вейвлет}, f \in L^2(\mathbb{R}), a, b \in \mathbb{R}, a \neq 0 \quad (2.5)$$

может быть получена более детальная информация о свойствах анализируемой функции  $f$ . Вейвлет  $\Psi$  является оконной функцией и имеет нулевое среднее значение, при стремлении масштаба  $a$  к нулю вейвлет-коэффициенты  $(W_\Psi f)(b,a)$  характеризуют локальные свойства функции  $f$  в окрестности момента времени  $t = b$ . Если в момент времени  $t = b$  в функции возникает локальная особенность, абсолютные значения вейвлет-коэффициентов в окрестности  $t = b$  возрастают. Для выделения локальных особенностей может быть применена пороговая функция [33]:

$$P_{T_a}(W_\Psi f_{b,a}) = \begin{cases} W_\Psi f_{b,a}, & \text{если } (W_\Psi f_{b,a} - W_\Psi f_{b,a}^{med,l}) \geq T_a \\ 0, & \text{если } |W_\Psi f_{b,a} - W_\Psi f_{b,a}^{med,l}| < T_a \\ -W_\Psi f_{b,a}, & \text{если } (W_\Psi f_{b,a} - W_\Psi f_{b,a}^{med,l}) < -T_a \end{cases}, \quad (2.6)$$

где  $T_a = U * St_a^l$  - пороговая функция,  $St_a^l = \sqrt{\frac{1}{l-1} \sum_{k=1}^l (W_\Psi f_{b,as} - \overline{W_\Psi f_{b,a}})^2}$  - стандартное отклонение, рассчитанное в скользящем временном окне длины  $l$ ,  $\overline{W_\Psi f_{b,a}}$  - среднее значение,  $U$  - пороговый коэффициент.

Если в качестве  $f$  рассматривать вариации магнитного поля, абсолютные значения вейвлет-коэффициентов:

$$e_{b,a} = |(W_\Psi f)(b,a)| \quad (2.7)$$

характеризуют величину отклонения вариации поля от ее характерного уровня на масштабе в момент времени  $t = b$  [17]. Поскольку величина отклонения вариации магнитного поля от ее характерного уровня служит мерой степени его возмущенности [1, 21, 15, 18, 16, 7, 34], применение операции (2.6) позволяет выделить периоды повышения геомагнитной активности. Тогда интенсивность возмущений поля в момент времени  $t = b$  может быть оценена как:

$$E_b = \sum_a P_{T_a}(W_\Psi f)(b,a) \quad (2.8)$$

В случае положительных возмущений поля (повышение текущей вариации относительно характерного уровня) величина:

$$e_{b,a}^\pm = (W_\Psi f)(b,a) \quad (2.9)$$

будет положительной ( $e_{b,a}^+$ ), в случае отрицательных возмущений поля (понижение текущей вариации относительно характерного уровня) - отрицательной ( $e_{b,a}^-$ ). Тогда интенсивность положительных и отрицательных возмущений поля в момент времени  $t = b$  может быть оценена, соответственно, как:

$$E_b^+ = \sum_a e_{b,a}^+, \text{ и } E_b^- = \sum_a e_{b,a}^- \quad (2.10)$$

Параметры пороговой функции (2.6) - длина окна  $l$  и пороговый коэффициент  $U$  являются адаптивными и, определяют, соответственно, размеры временного окна, в рамках которого оцениваем возмущения, и интенсивность выделяемых геомагнитных возмущений. Использование адаптивных параметров пороговой функции позволяет нам выделить как кратковременные

незначительные возрастания геомагнитной активности, которые могут наблюдаться накануне магнитных бурь (рис. 2.4), так и более длительные сильные возрастания в периоды магнитных бурь (рис. 2.5). Результаты применения описанной методики представлены в работах [31, 32, 33]

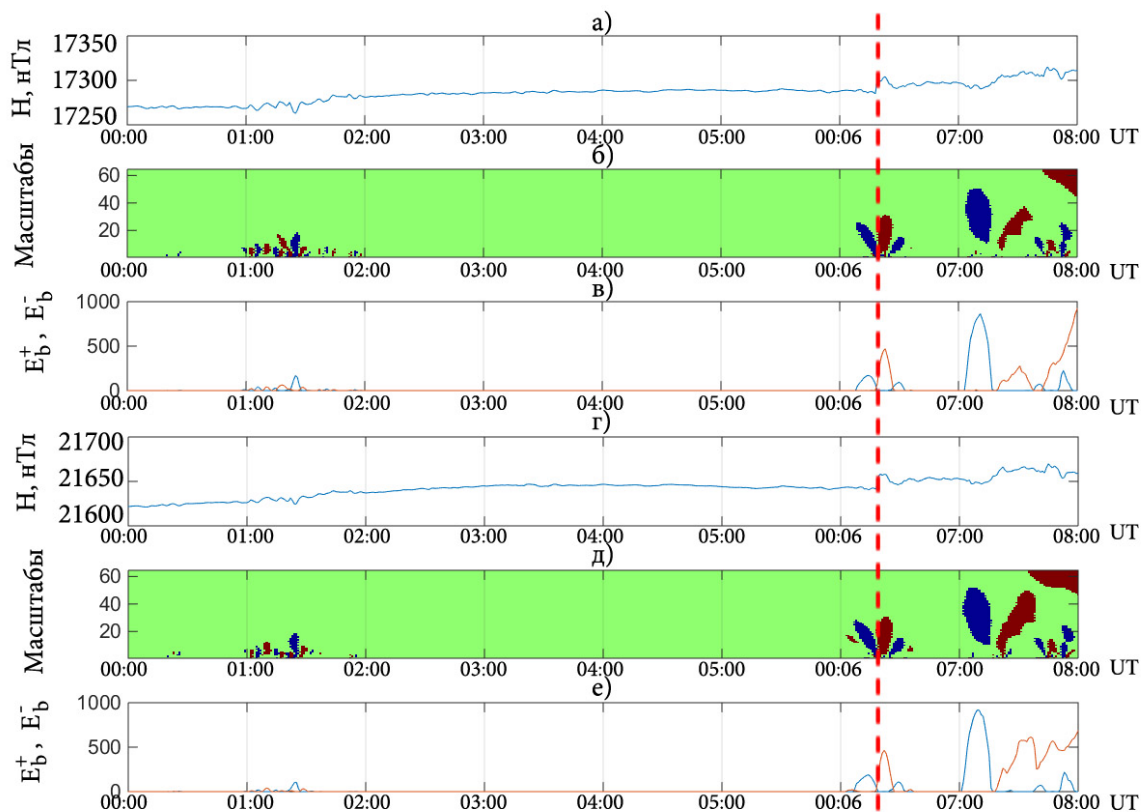


Рисунок 2.4 — Результаты обработки данных в период с 00:00 UT. По 08:00 UT 07 января 2017 г. (использовались параметры пороговой функции  $l = 720, U = 3.$ ): а) Н-компонента магнитного поля Земли (ст. Магадан); б) результат применения операции (2.6) (ст. Магадан), красным цветом отмечены положительные возмущения, синим отрицательные; в) результат применения операций (2.6), (2.10) (ст. Магадан); г) Н-компонента магнитного поля Земли (ст. Паратунка); д) результат применения операции (2.6) (ст. Паратунка), красным цветом отмечены положительные возмущения, синим отрицательные; е) результат применения операций (2.6), (2.10) (ст. Паратунка). Пунктирной линией отмечен момент начала магнитной бури

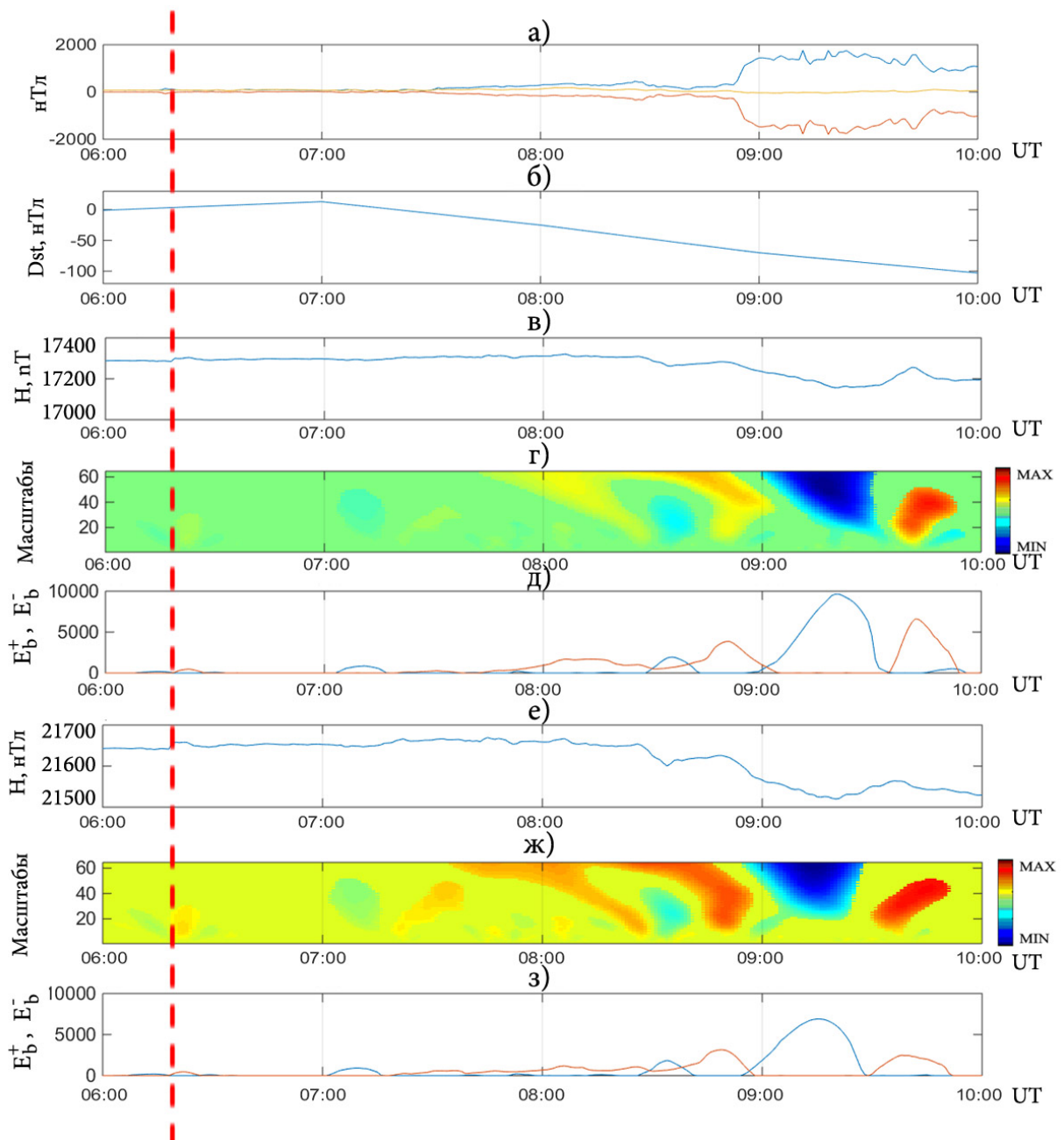


Рисунок 2.5 — Результаты обработки данных в период с 06:00 UT. по 10:00 UT 07 января 2017 г.(использовались параметры пороговой функции  $l = 720, U = 3.$ ): а) Н-компонента магнитного поля Земли (ст. Магадан); б) результат применения операции (2.6) (ст. Магадан); в) результат применения операций (2.6), (2.10) (ст. Магадан); г) Н-компонента магнитного поля Земли (ст. Паратунка);д) результат применения операции (2.6) (ст. Паратунка); е) результат применения операций (2.6), (2.10) (ст. Паратунка). Пунктирной линией отмечен момент начала магнитной бури

#### 2.1.4 Автоматический способ оценки состояния геомагнитного поля

Как отмечено выше, сложная структура вариаций геомагнитного поля делает малоэффективными классические методы анализа данных, которые не позволяют выявлять некото-

рые закономерности и приводят к потере важной информации [18]. Недостатком используемых классических методов и подходов также является недостаточная степень их автоматизации, что является весьма важным в задачах оперативной обработки данных околоземного пространства и прогноза космической погоды. Разработанный в рамках выполнения НИР и представленный ниже способ оценки состояния геомагнитного поля основан на кратномасштабном вейвлет-разложении (КМА) и радиальных нейронных сетях, что позволило его реализовать в автоматическом режиме.

### **Декомпозиция вариаций геомагнитного поля на разномасштабные компоненты. Определение классов состояний геомагнитного поля**

Рассматривались три возможных состояния геомагнитного поля:

- 1) «спокойное» состояние (1 класс, если суммарный за сутки К-индекс  $\sum K \leq 10$ );
- 2) «слабо возмущённое» состояние (2 класс, если  $10 < \sum K \leq 18$ );
- 3) «возмущённое» состояние (3 класс, если  $\sum K > 18$ ). На основе кратномасштабного вейвлет-разложения [35, 36] до уровня  $m$  получено представление данных в виде:

$$f_0(t) = \sum_{j=-1}^{-m} g[2^j t] + f[2^{-m} t] \quad (2.11)$$

где  $g[2^j t] \in W_j, W_j$  - пространство с разрешением  $j$ , порожденное вейвлет-базисом  $\Psi_{j,n}(t) = 2^{j/2} \Psi(2^j t - n)$ , разномасштабные детализирующие компоненты  $g[2^j t] = \sum_n d_{j,n} \Psi_{j,n}(t), d_{j,n} = \langle f, \Psi_{j,n} \rangle, j$  - масштаб; аппроксимирующая компонента  $f[2^{-m} t] = \sum_k c_{-m,k} \phi_{-m,k}(t), c_{-m,k} = \langle f, \phi_{-m,k} \rangle$ . В соответствии с рассматриваемыми состояниями поля компонента  $g[2^j t]$  может иметь одно из трех возможных состояний - «спокойное», «слабовозмущенное» или «возмущенное» состояние. Абсолютные значения коэффициентов компонент  $|d_{j,n}|$  приняты за меру их геомагнитной возмущенности [26]. За меру геомагнитной возмущенности компоненты  $g[2^j t]$  принят максимум абсолютных значений её коэффициентов:  $V_{g_j} = \max_n |d_{j,n}|$ . Для оценки состояния геомагнитного поля введено следующее решающее правило [26, 27]:

- 1) если все компоненты имеют «спокойное» состояние, либо только одна из компонент имеет «слабовозмущенное» состояние, то геомагнитное поле имеет «спокойное» состояние (1 класс);
- 2) если хотя бы одна из компонент имеет «возмущенное» состояние, то геомагнитное поле имеет «возмущенное» состояние (2 класс);
- 3) в остальных случаях считается, что поле имеет «слабовозмущенное» состояние (3 класс).

### **Формирование радиальной нейронной сети по оценке состояния геомагнитного поля**

В выполненной постановке задачи входным вектором нейронной сети является компонента  $g[2^j t]$ . Задачей нейронной сети является определение её состояния. Мерой геомагнитной

возмущенности компоненты является указанная выше величина  $V_{g_j} = \max_n |d_{j,n}|$ . Вследствие сложного характера исследуемого процесса и отсутствием четких границ между рассматриваемыми классами состояний геомагнитного поля введены следующие подклассы состояний компонент  $g[2^j t]$ :

1. для «спокойного» состояния - подкласс « $\alpha$ -спокойных» ( $K_1$ ) :  $\max_n |d_{j,n}| \leq T_j^{\alpha_1}$  и « $\beta$ -спокойных» ( $K_2$ ) :  $T_j^{\alpha_1} < \max_n |d_{j,n}| \leq T_j^{\beta_1}$ .
2. для «слабовозмущенного» состояния - подкласс « $\alpha$ -слабовозмущенных» ( $K_3$ ) :  $T_j^{\beta_1} < \max_n |d_{j,n}| \leq T_j^{\alpha_2}$  и « $\beta$ -слабовозмущенных» ( $K_4$ ) :  $T_j^{\alpha_2} < \max_n |d_{j,n}| \leq T_j^{\beta_2}$ .
3. для «возмущенного» состояния - подкласс « $\alpha$ -возмущенных» ( $K_5$ ) :  $T_j^{\beta_2} < \max_n |d_{j,n}| \leq T_j^{\alpha_3}$  и « $\beta$ -возмущенных» ( $K_6$ ) :  $T_j^{\alpha_3} < \max_n |d_{j,n}| \leq T_j^{\beta_3}$ .

Пороги  $T_j^{\alpha_1}, T_j^{\beta_1}, T_j^{\alpha_2}, T_j^{\beta_2}, T_j^{\alpha_3}, T_j^{\beta_3}$  для введенных подклассов состояний поля определялись путем минимизации ошибки нейронной сети на множестве обучающих векторов. Используя меру возмущенности коэффициента  $|d_{j,n}|$ , для каждого подкласса  $K_i$  в радиальном слое нейронной сети создан один пример  $P_{j,K_i}$  по правилу:

$$P_{j,K_i} = \frac{\sum_{u_i=1}^{U_i} D_{j,u_i}}{U_i} \quad (2.12)$$

где  $U_i = (|d_{j,1}^{u_i}|, |d_{j,2}^{u_i}|, \dots, |d_{j,N_j}^{u_i}|)$ ,  $u_i$  - номер компоненты подкласса  $K_i$ ,  $N_j$  - длина компоненты масштаба  $j$ ,  $U_i$  - количество компонент подкласса  $K_i$ .

Применение правила (2.12) при формировании радиального слоя нейронной сети, в отличие от традиционного подхода [37], позволило существенно уменьшить количество используемых примеров и оптимизирует работу сети в автоматическом режиме.

Архитектура построенной нейронной сети показана на рис.2.6. Архитектура построенной программной системы по реализации способа представлена на рис.2.7.

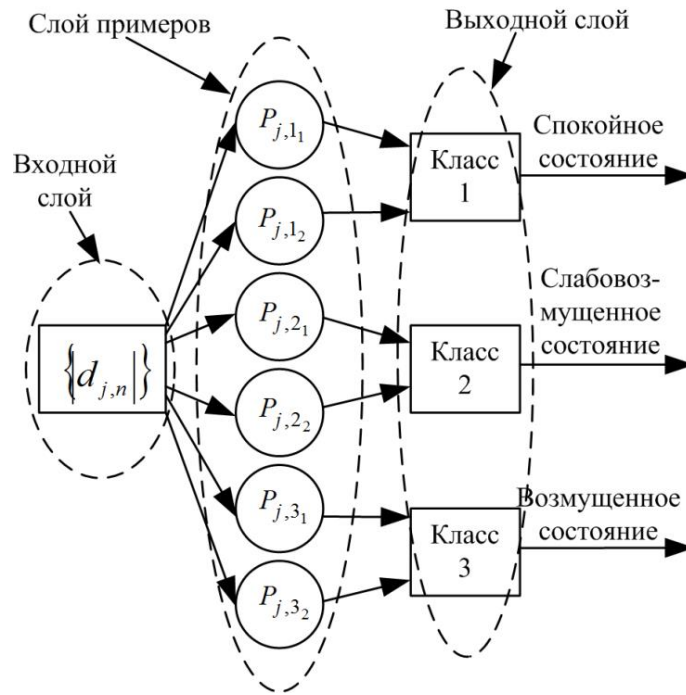


Рисунок 2.6 — Архитектура нейронной сети

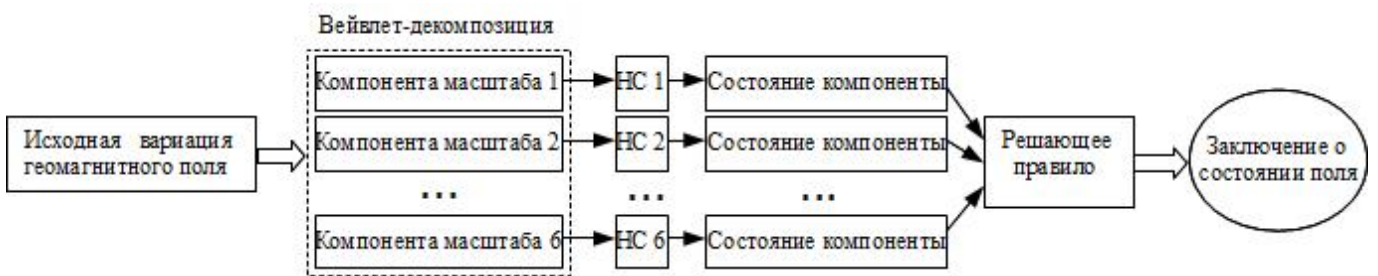


Рисунок 2.7 — Архитектура программной системы.

### 2.1.5 Оценка эффективности способа

С помощью построенной программной системы выполнена оценка состояния вариаций геомагнитного поля, полученных на станции «Паратунка» (Камчатский край) за период 2002-2008 гг. Результаты работы системы представлены в таблице 2.1, где также приведены результатами работы традиционной радиальной нейронной сети. Примеры-образы радиального слоя традиционной радиальной нейронной сети, в соответствии с процедурой создавались следующим образом:

$$P_{K_i} = \frac{\sum_{u_i=1}^{U_i} f_{0,u_i}}{U_i}$$

где  $f_{0,u_i}$  - исходная вариация подкласса  $K_i$ ,  $u_i$  - номер вариации подкласса  $K_i$ ,  $U_i$  - количество вариаций подкласса  $K_i$ .

Результаты, представленные в таблице 2.1, подтверждают эффективность предлагаемого способа и возможность его использования для автоматического определения степени возмущенности вариаций геомагнитного поля в магнитных обсерваториях сети наблюдений.

Таблица 2.1 — Погрешность работы нейронных сетей

Анализируемый период	Погрешность коллектива сетей	Погрешность традиционной сети
2002 г.	18,58	48,82
2003 г.	11,96	71,4
2004 г.	19,89	51,16
2005 г.	18,39	54,52
2006 г.	18,57	
2007 г.	23,01	
2008 г.	18,85	

Анализ работы программной системы показал, что в более чем 70% случаев накануне сильных и умеренных магнитных бурь фиксируются слабые возмущения геомагнитного поля (было проанализировано 97 событий). Замечено, что накануне бурь предлагаемым способом фиксируются слабые возмущения геомагнитного поля, что важно для прогноза состояния околоземного космического пространства и предсказания сильных магнитных бурь.

Учитывая большой разброс значений компонент  $g[2^j t]$  и существенное наложение образов, с целью оптимизации способа также рассматривались следующие подклассы состояний геомагнитного поля:

1. Класс спокойной магнитосферы (вариации с максимальным за сутки К-индексом  $\leq 3$ ):

- 1) подкласс 1.1 - наиболее спокойные вариации, типичные для данного класса;
- 2) подкласс 1.3 - вариации, максимальный К-индекс которых равен 2;
- 3) подкласс 1.4 - наиболее возмущенные вариации, максимальный К-индекс которых равен 3;
- 4) подкласс 1.2 - остальные вариации данного класса.

2. Класс возбужденной магнитосферы (вариации с максимальным индексом геомагнитной активности  $K=4$ ):

- 1) подкласс 2.1 - типичные для данного класса вариации;
- 2) подкласс 2.2 - остальные вариации данного класса.

3. Класс, соответствующий наличию магнитной бури (вариации с максимальным за сутки К-индексом  $\geq 5$ ):

- 1) подкласс 3.1 - слабые бури ( $K=5$ );
- 2) подкласс 3.2 - средние бури  $K=6$ ;
- 3) подкласс 3.3 - сильные бури  $K=7$ ;



4) подкласс 3.4 - очень сильные бури  $K=8$  (в соответствии с уровнями, представленными на [29]).

Для формирования заключения о состоянии магнитного поля на основе решений нейронных сетей было введено следующее решающее правило:

- 1) если все компоненты соответствуют спокойному состоянию, то магнитосфера спокойная;
- 2) если хотя бы одна из компонент соответствует состоянию магнитной бури, то считается, что имеет место магнитная буря;
- 3) в остальных случаях считается, что магнитосфера возмущенная.

При таком подходе погрешность программной системы была снижена, и составила 11,25%, при этом погрешность выявления бурь составила всего 4,71%, что говорит об эффективности такого подхода. Результаты работы системы представлены в таблицах 2.2, 2.3.

Таблица 2.2 — Погрешность работы нейронных сетей

Состояние магнитосферы	Погрешность
Спокойное состояние	9,77 %
Возбужденное состояние	30,61 %
Состояние магнитной бури	4,71 %

Таблица 2.3 — Оценка погрешности работы системы для различных подклассов состояний

Состояние	Подкласс	Погрешность
Спокойное состояние	1.1	0%
	1.2	5,56%
	1.3	8%
	1.4	36%
Возбужденное состояние	2.1	30%
	2.2	31,03%
Состояние магнитной бури	3.1	7%
	3.2	4,55%
	3.3	0%
	3.4	0%

Анализ результатов, приведенных в таблице 2.2, показывает, что погрешность классификации возрастает на границах различных состояний поля.

### 2.1.6 Выделение и анализ короткопериодных вариаций геомагнитного поля накануне магнитных бурь

При анализе использовались данные сети станций на Северо-востоке России и приэкваториальных индийских станций НУВ «Хайдарабад» и CPL «Choutuppal» (табл. 2.4).

Таблица 2.4 — Обсерватории, данные которых использовались

Обсерватория	Код IAGA	Географ. широта	Географ. долгота	Геомагн. широта	Геомагн. долгота	Местное время (LT)
о.Котельный (1)	KTN	76°00.0'	137°52.6'	66°44.4'	162°00.0'	UTC+09
Чокурдах (1)	CHD	70°37.0'	147°52.6'	62°8.4'	152°36.6'	UTC+11
Тикси (1)	TIK	65°44.2'	150°53.0'	54°16.2'	146°14.4'	UTC+09
Якутск (1)	YAK	62°02.1'	129°42.1'	52°26.4'	163°13.8'	UTC+09
Магадан (2)	MGD	59°33.1'	150°48.3'	51°32.4'	146°2.4'	UTC+11
Паратунка (2)	PET	52°58.3'	158°15.0'	45°51.6'	137°57.6'	UTC+12
Хабаровск (2)	KHB	48°29.0'	135°04.0'	39°15'	15°48.6'	UTC+10
Хайдарабад (3)	HYB	17°22'00'	78°28'00'	8°50'00'	151°78'00'	UTC+05:30
Choutuppal (3)	CPL	17°17.33'	78°55'	8°37.2'	152°34.8'	UTC+5:30

Примечание: в скобках указана принадлежность обсерватории(1) - ИКФИА СО РАН, (2) - ИКИР ДВО РАН, (3) - CSIR-National Geophysical Research Institute.

Для анализа мелкомасштабных короткопериодных (от нескольких секунд до десятков минут) вариаций геомагнитного поля применялась операция (2.6) со значениями параметров пороговой функции  $l = 1440$  отсчётов, что соответствует 24 часам, и  $U = 7$ . На рис. 2.8 показаны результаты применения данной операции накануне и в период события 7 января 2015г. Анализ результатов показывает, что накануне магнитной бури 6 января 2015 г. в 09:20 и 18:10 UT на анализируемых станциях одновременно возникали кратковременные повышения геомагнитной активности (рис. 2.8). По данным космической погоды (<http://ipg.geospace.ru/space-weather-review/>) в начале суток 5 января зарегистрировано несколько небольших скачков скорости солнечного ветра, вызванные ускоренным потоком солнечного ветра от корональной дыры. Скорость солнечного ветра менялась в пределах 400 - 600 км/сек, а Vz-компонента была в пределах  $\pm 10nT$ . По данным среднеширотных станций геомагнитное поле 5-го и 6-го января спокойное (<http://ipg.geospace.ru/space-weather-review/>). Сопоставление выделенных аномальных предповышений с данными авроральной активности показывает, что в эти моменты времени возрастали значения AE и AL индексов. Учитывая данные космической погоды, синхронное возникновение данного эффекта на различных станциях и одновременное возрастание геомагнитной активности в авроральной зоне, с высокой вероятностью можно предположить солнечную природу данного эффекта и возможную связь с приближающейся магнитной бурей. Также можно отметить, что интенсивность предповышений возрастала в направлении от высоких широт до экватора, на приэкваториальной станции CPL интенсивность предповышений превышает интенсивность геомагнитных возмущений в данном диапазоне частот во время события.

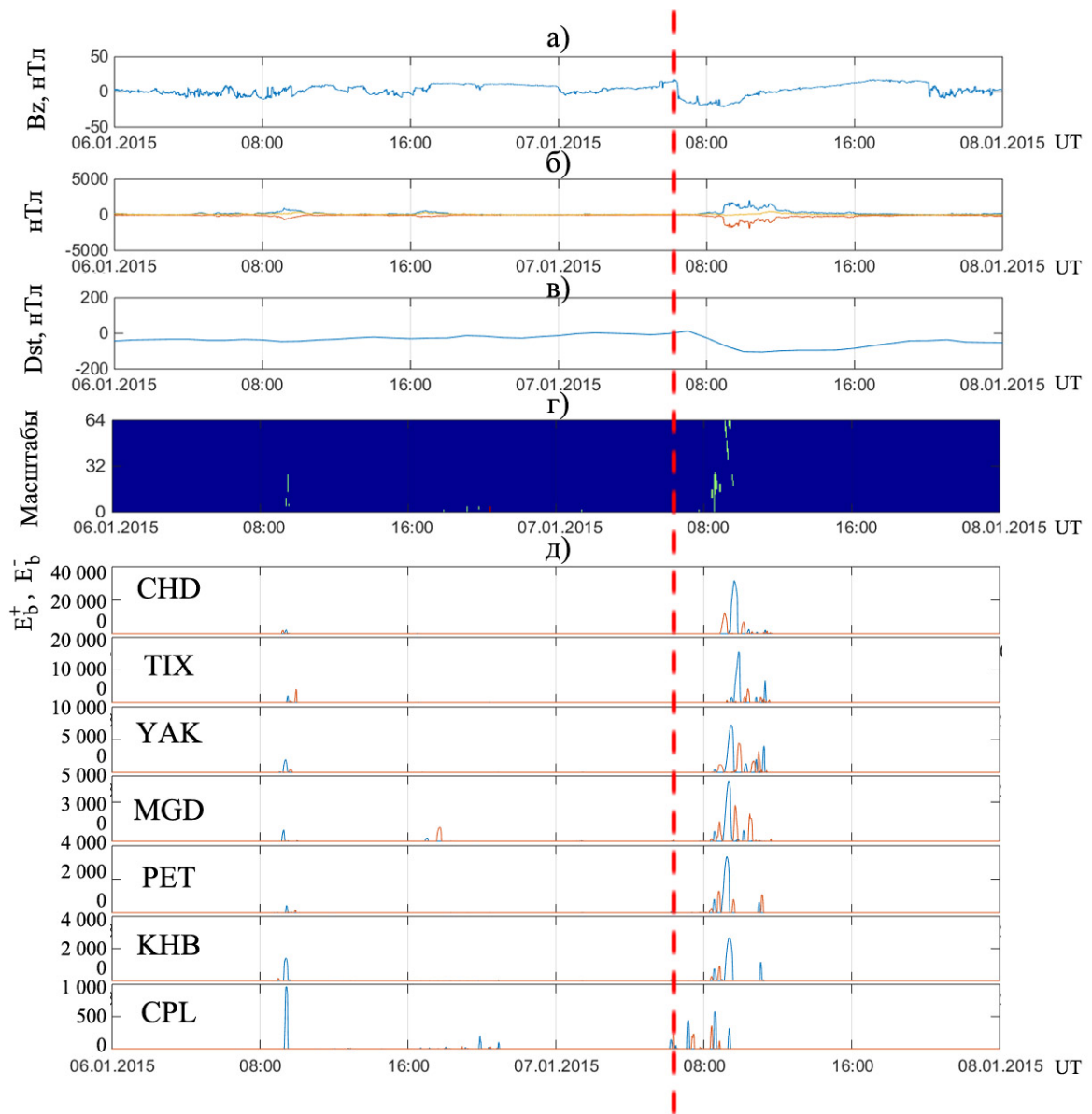


Рисунок 2.8 — Результат обработки данных в период с 06 по 08 января 2015 г.: а)  $V_z$  компонента межпланетного магнитного поля (спутник ACE); б) Индексы AE (синяя линия), AU (желтая линия), AL (красная линия); в) Dst-вариация; г) выделенные синхронные повышения геомагнитной активности (применялась операция (2.6)); д) интенсивность повышений геомагнитной активности (применялись операции (2.6), (2.10)); Пунктирной линией отмечен момент начала магнитной бури

На рис. 2.9 представлены результаты выделения кратковременных повышений геомагнитной активности накануне бури 17 марта 2015 г., Аналогично предыдущему событию одновременно на всех станциях наблюдались мелкомасштабные короткопериодные вариации поля за двое суток до начала бури (рис 2.9). Результаты, представленные в таблице 2.5, также подтверждают возможность аномальных повышений геомагнитной активности накануне магнитных бурь.

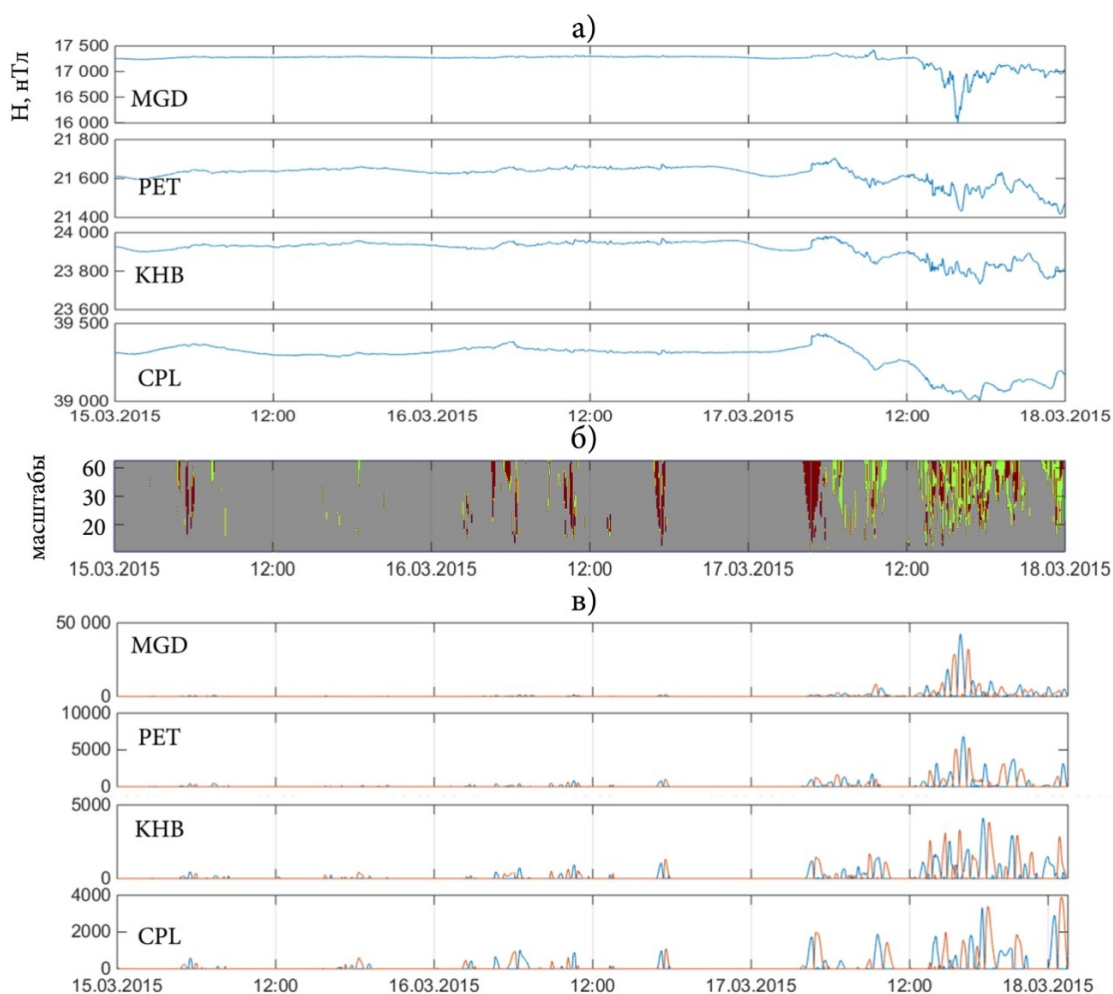


Рисунок 2.9 — Результат обработки данных в период с 15 по 18 марта 2015 г.: а) H-компоненты магнитного поля Земли; б) выделенные синхронные повышения геомагнитной активности (применялась операция (2.6)); в) интенсивность повышений геомагнитной активности (применялись операции (2.6), (2.10)); Пунктирной линией отмечен момент начала магнитной бури.

Таблица 2.5 — Результаты обработки данных в периоды магнитных бурь 2015 г.

Дата магнитной бури	Источник бури	Время начала бури (UT)	Максимум К <sub>p</sub>	максимум Dst	Врем. инт. до начала бури
07.01.2015	CME	6:15	6	-103	21 час
					12 часов 10 минут
					4 часа 55 минут
17.03.2015	CME	4:45	8	-233	16 часов 30 минут
					12 часов 10 минут
					11 часов 15 минут

Продолжение таблицы 2.5

Дата магнитной бури	Источник бури	Время начала бури (UT)	Максимум К <sub>p</sub>	максимум Dst	Врем. инт. до начала бури
21.06.2015	CIR/CME	16:55	8	-111	10 часов
					7 часов
19.12.2015	CME	16:18	7	-170	25 часов 30 минут
					15 часов 30 минут
					7 часов 20 минут
					1 час

### Результаты применения автоматической программной системы по оценке состояния геомагнитного поля

В ходе исследования анализировались данные геомагнитного поля, полученные на станции «Паратунка» (Камчатский край, регистрацию данных выполняет ИКИР ДВО РАН). На рис. 2.10, 2.11 показаны результаты работы программной системы, также результаты оценки состояния геомагнитного поля, полученные на основе методики, описанной в 2.1.3. Результаты показывают, что накануне анализируемых событий система зафиксировала слабые возмущения поля. Результаты применения методики также подтверждают возникновение слабых возмущений в геомагнитном поле.

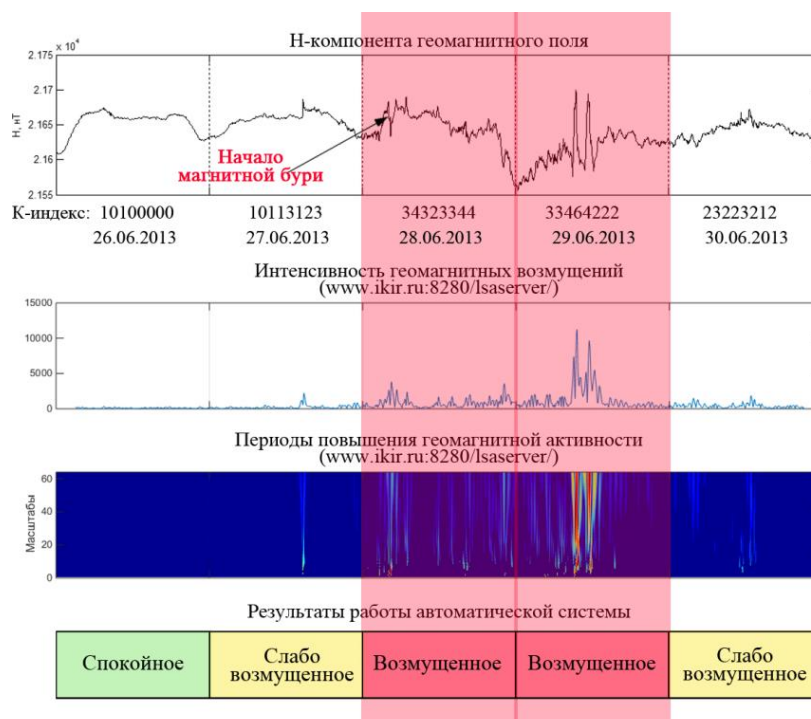


Рисунок 2.10 — Результаты обработки данных за период 6.12.2013-9.12.2013

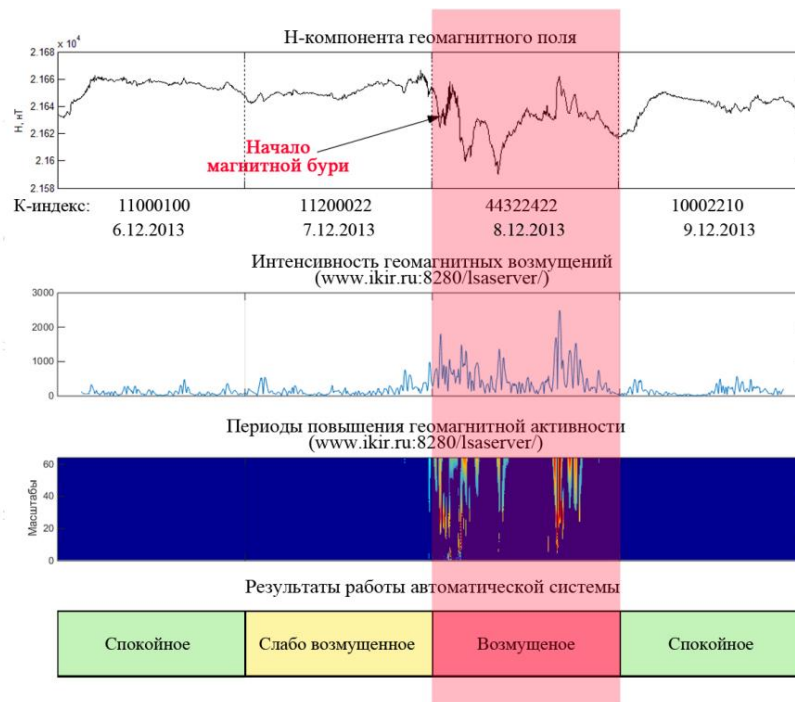


Рисунок 2.11 — Результаты обработки данных за период 26.06.2013-30.06.2013

## Выводы

С использованием разработанных методов выполнен анализ геомагнитных данных в периоды повышенной солнечной активности и сильных магнитных бурь (анализировались события анализировались события 07 января 2015 г., 17 марта 2015 г., 21 июня 2015 г., 15 августа 2015 г., 19 декабря 2015 г., 21 октября 2016 г.). Построенный динамический спектр интенсивности геомагнитных возмущений показал пространственную картину событий и позволил проанализировать распределение геомагнитных возмущений вдоль меридиана наблюдений и на приэкваториальных станциях. В периоды основных фаз бурь выделены области активизаций, имеющие крупные пространственные масштабы и, вероятно, связанные с процессами накопления и сброса энергии в магнитосфере. Накануне событий на анализируемых станциях наблюдались синхронно возникающие локальные повышения геомагнитной активности, которые, по-видимому, связаны с нестационарным воздействием плазмы солнечного ветра на магнитосферу Земли по мере приближения межпланетного возмущения. Подобные аномальные предбуревые эффекты также отмечены в работах других авторов [1]. По результатам обработки большого экспериментального материала и совместного анализа колебаний Н-компоненты геомагнитного поля с колебательными процессами на Солнце авторы [38, 25] показали, что оправдываемость предлагаемого ими метода прогноза геоэффективных вспышечных событий составляет 90%. Данный результат свидетельствует о высокой вероятности возможного возникновения предбуревых аномальных признаков в геомагнитных данных. Возможность автоматической обработки данных и выделения аномальных особенностей на основе разработанных в рамках выполнения НИР ме-

тодов и алгоритмов является важным аспектом предлагаемого подхода для задач оперативного анализа и прогноза космической погоды.

## 2.2 Методы анализа параметров ионосферы

### 2.2.1 Задачи исследования, предлагаемой подход

Исследование направлено на создание методов анализа ионосферных параметров и выделения аномалий, возникающих в периоды ионосферных возмущений. Динамика ионосферы определяется многочисленными эффектами внешнего (космическая погода) и внутреннего (литосфера, атмосфера) происхождения [39, 40, 41, 42]. Наиболее сильные и сложные ионосферные возмущения (ионосферные бури) формируются в периоды солнечных вспышек и геомагнитных бурь, изучение которых имеет важное научное и прикладное значение [41, 43, 44, 45, 46]. Ионосферная буря может состоять из положительной и отрицательной фаз, имеющих сложное пространственно-временное распределение [39, 40, 42, 46]. Хотя механизмы этих эффектов известны (напр. [42]), точное прогнозирование отрицательных и положительных фаз ионосферных бурь в настоящее время не реализовано и связано со сложностью выполнения устойчивых наблюдений в верхних слоях атмосферы. Поэтому развитие эмпирических методик и технических средств по прогнозированию и оценке ионосферных колебаний имеет важное значение [39, 41, 43, 44, 45, 46].

Аномалии в регистрируемых параметрах ионосферы проявляются в виде значительного изменения концентрации электронов в ионосфере по сравнению с некоторым характерным (спокойным) уровнем, и находят отражение в регистрируемых ионосферных данных (анализировались данные полного электронного содержания (ПЭС), критическая частота ионосферы foF2) в виде локальных особенностей различной формы и длительности. Задачи анализа состояния ионосферы и выделения аномалий решаются большим количеством авторов [46, 47, 48, 49, 50, 51, 52]. Среди основных подходов можно выделить традиционный метод скользящей медианы [53, 54], эмпирические модели ионосферы [46, 47, 48, 50, 51], применение адаптивных алгоритмов на основе нейронных сетей [46, 52, 55, 56], и вейвлет-преобразования [55, 56, 57].

Сложная структура ионосферных параметров существенно ограничивает возможности и эффективность применения традиционных методов анализа данных, особенно в возмущенные периоды [43, 44, 45, 58]. Точность и эффективность существующих моделей ионосферы (эмпирические, физические и нейросетевые модели [46, 47, 50, 59, 60]) во многом зависят от наличия качественных исторических данных геофизических параметров, определяющих состояние околоземного космического пространства. Также для применения моделей в режиме реального времени (или близком к нему) необходима оперативная информация о комплексе геофизических параметров, что не всегда реализуемо [46, 47]. В процессе выполнения НИР использовались методы АРПСС, которые в значительной мере лишены этих недостатков, поскольку число пара-

метров моделей АРПСС может быть выбрано на основе сравнительно объективных критериев, даже при наличии ограниченных выборок [58]. Учитывая тот факт, что ионосферные данные имеют сложную нестационарную структуру, и непосредственное применение методов АРПСС не эффективно, в работе предложено совместное использование методов АРПСС с аппаратом вейвлет-преобразования. На основе этого подхода, в работе предложена многокомпонентная модель (МКМ), которая позволяет описать регулярные составляющие вариаций параметров ионосферы и выделить аномальные изменения в данных [43, 44]. Для построения МКМ также использовался другой подход, основанный на совмещении вейвлет-преобразования с нейронными сетями [61, 62, 63, 64, 65, 66]. Идентификация предлагаемых МКМ подробно описана в работах [43, 44, 45, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69]. Для детального описания ионосферных аномалий использовались вычислительные решения, основанные на непрерывном вейвлет-преобразовании и пороговых функциях, представленные в работах [43, 45, 62, 63, 64, 66, 67, 70, 71]. Они позволяют выделять разномасштабные аномалии в ионосфере и оценивать их моменты возникновения, временную длительность и интенсивность.

Разработанные в рамках выполнения НИР методы и алгоритмы анализа ионосферных данных приведены ниже, также ниже представлены результаты оценок предложенных методов и показана эффективность их использования для выделения аномальных изменений в ионосфере.

### 2.2.2 Многокомпонентные модели параметров ионосферы

Как указано выше, моделирование временного хода параметров ионосферы выполнялось на основе применения вейвлет-преобразования (использовались кратномасштабные разложения (КМА)), методов АРПСС и нейронных сетей. В работе построены следующие многокомпонентные модели (МКМ) [43, 44, 45, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69]:

1. Модель 1, основанная на совмещении КМА и методов АРПСС. Идентификация модели 1 выполнялась на основе следующих операций:

1.1. На основе КМА [72, 36] временной ряд foF2 представляется в виде компонент:

$$f(t) = \sum_k c_{-3,k} \phi_{-3,k}(t) + \sum_k d_{-3,k} \Psi_{-3,k}(t) + e(t) = f_1(t) + f_2(t) + e(t) \quad (2.13)$$

где  $c_{-3,k} = \langle f, \phi_{-3,k} \rangle$ ,  $\phi_{-3,k}(t) = 2^{-3/2} \phi(2^{-3}t - k)$ ,  $\phi$  - скэйлинг-функция;  $d_{-3,k} = \langle f, \Psi_{-3,k} \rangle$ ,  $\Psi_{-3,k} = 2^{-3/2} \Psi(2^{-3}t - k)$ ,  $\Psi$  - базисный вейвлет;  $j = -3$  - соответствует 3-му уровню вейвлет-разложения (уровень разложения определялся на основе алгоритма [43]);  $e(t)$  - шум.

Для разложения ((2.13)) используется ортонормированный вейвлет-базис Добеши порядка 3 (определен путем минимизации погрешности аппроксимации).

1.2. На основе методов АРПСС [58] выполняется моделирование компонент  $f_1(t)$  и  $f_2(t)$  (см. соотн. (2.13)):



$$f_1(t) = \sum_{k=1, N_3^\mu} s_{3,k}^1 \phi_{-3,k}(t), f_2(t) = \sum_{k=1, N_3^\mu} s_{3,k}^2 \Psi_{-3,k}(t), \quad (2.14)$$

где  $s_{3,k}^\mu = \sum_{l=1}^{p_3^\mu} \gamma_{3,l}^\mu \omega_{3,k-l}^\mu + e_{3,k}^\mu$  - оценочное значение  $\mu$ -ой компоненты ( $\mu = 1, 2$ );  $p_3^\mu, \gamma_{3,l}^\mu$  - порядок и параметры авторегрессии  $\mu$ -ой компоненты;  $\omega_{3,k}^\mu = \nabla \beta_{3,k}^\mu$ ,  $\beta_{3,k}^1 = c_{-3,k}$ ,  $\beta_{3,k}^2 = d_{-3,k}$ ,  $e_{3,k}^\mu$  - остаточные ошибки модели  $\mu$ -ой компоненты, определяемые как разность между фактическими и модельными значениями,  $N_3^\mu$  - длина  $\mu$ -ой компоненты.

В работах [43, 44] показано, что с использованием исторических часовых данных foF2 станции Паратунка (Камчатка, ИКИР ДВО РАН) за период 1968 - 2013 г. для регулярных компонент  $f_1(t)$  и  $f_2(t)$  были идентифицированы следующие модели:

- для зимнего сезона (для высокой и низкой СА):

$$s_{3,k}^1 = -0.62\omega_{3,k-1}^1 - 0.63\omega_{3,k-2}^1 + 0.36\omega_{3,k-3}^1 + e_{3,k}^1(t),$$

$$s_{3,k}^2 = -0.97\omega_{3,k-1}^2 - 0.93\omega_{3,k-2}^2 + e_{3,k}^2(t)$$

- для летнего сезона для высокой СА

$$s_{3,k}^1 = -0.50\omega_{3,k-1}^1 - 0.58\omega_{3,k-2}^1 + e_{3,k}^1(t),$$

$$s_{3,k}^2 = -0.88\omega_{3,k-1}^2 - 0.80\omega_{3,k-2}^2 + e_{3,k}^2(t)$$

- для летнего сезона для низкой СА:

$$s_{3,k}^1 = -0.83\omega_{3,k-1}^1 - 0.73\omega_{3,k-2}^1 + e_{3,k}^1(t),$$

$$s_{3,k}^2 = -0.95\omega_{3,k-1}^2 - 0.86\omega_{3,k-2}^2 + e_{3,k}^2(t)$$

где  $s_{3,k}^1$  - оценочное значение компоненты  $f_1(t)$ ,  $s_{3,k}^2$  - оценочное значение компоненты  $f_2(t)$ .

Модели 1 (соотн. (2.14)) описывают характерные вариации ионосферных параметров (в периоды спокойной ионосферы), в моменты возникновения аномальных изменений в данных, очевидно, ошибки моделей возрастут. Поэтому для их обнаружения в работе предложено применение порогов:

$$\varepsilon_\mu = \sum_{q=1}^{Q_\mu} |e_{-3,k+q}^\mu| > T_\mu, e_{-3,k+q}^\mu = s_{-3,k+q}^{\mu, \text{фактич}} - s_{-3,k+q}^{\mu, \text{модель}}$$

где  $e_{-3,k+q}^\mu$  - остаточные ошибки модели  $\mu$ -ой компоненты в точке  $k+q$ ,  $\mu = 1, 2$ ,  $q$  - шаг упреждения данных,  $Q_\mu$  - длина упреждения данных на основе модели  $\mu$ -ой компоненты,  $T_\mu$  - пороговое значение  $\mu$ -ой компоненты, определяющее наличие аномалии.

В работе, путем минимизации ошибок (использовался апостериорный риск), выполнена оценка пороговых значений  $T_\mu$ , которые для станции Паратунка (Камчатка) составляют:

1. для зимнего сезона -  $T_1 = 1.37/1.22$  (высокая/низкая СА),  $T_2 = 0.97/0.73$  (высокая/низкая СА).

2. для летнего сезона -  $T_1 = 1.60/1.30$  (высокая/низкая СА),  $T_2 = 0.88/0.80$  (высокая/низкая СА).

На рис. 2.12, 2.13 представлены результаты анализа данных foF2 станции Паратунка, выполненного на основе применения модели 1 в период повышенной солнечной и геомагнитной

активностей. Результаты показывают, что в возмущенные периоды ошибки полученной МКМ возрастают и выходят за пределы стандартного отклонения (СО), что свидетельствует об аномальных изменениях в данных foF2. В период магнитной бури, произошедшей 1 июня 2013г (рис. 2.12), возрастание СО составило 2,5 для компоненты  $f_1(t)$  и 4,5 для компоненты  $f_2(t)$ . В период сильной магнитной бури, произошедшей в период с 20 по 22 декабря 2015 г. (рис. 2.13), наблюдается наиболее существенное возрастание ошибок: более 5 СО для компоненты  $f_1(t)$ , более 2,5 СО для компоненты  $f_2(t)$ .

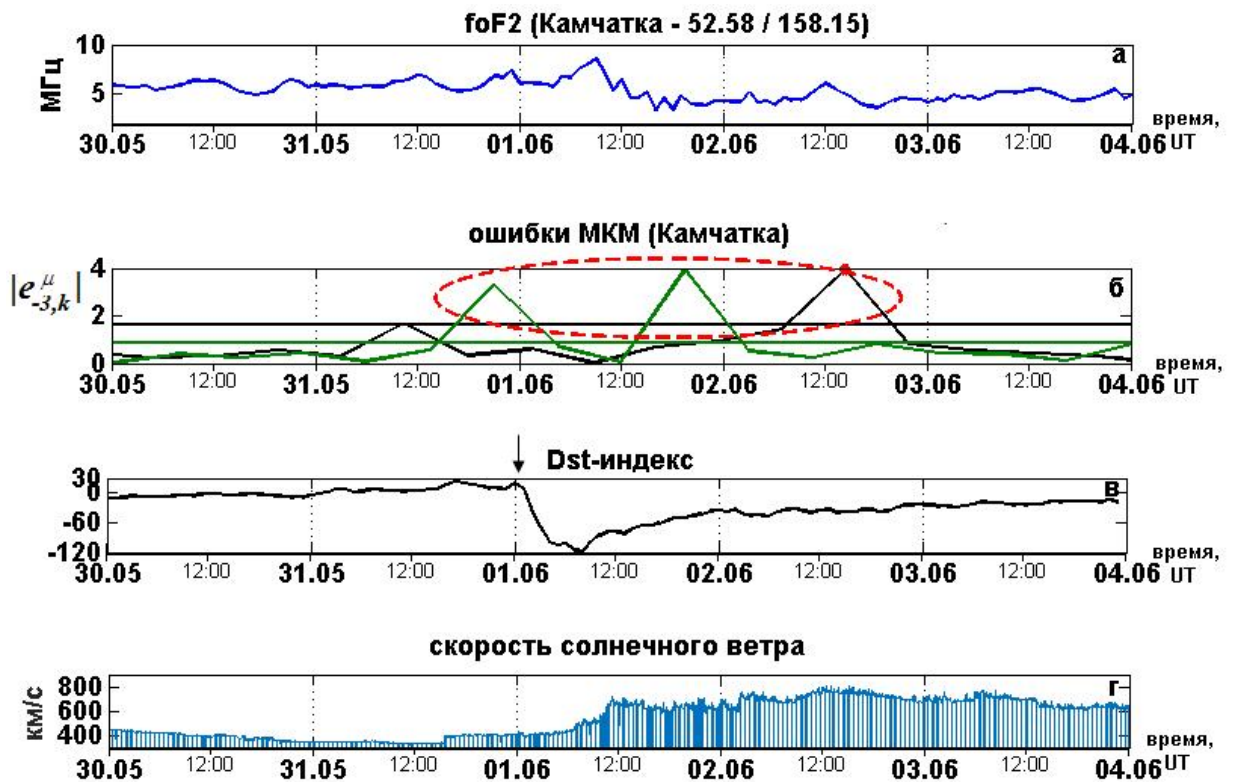


Рисунок 2.12 — Применение МКМ в период магнитной бури 1 июня 2013 г. (Камчатка, время UT): а) - foF2, б) ошибки МКМ (черным - компонента  $f_1(t)$ , зеленым - компонента  $f_2(t)$ ) и их стандартные отклонения, в) - Dst-индекс геомагнитной активности, г) - скорость солнечного ветра. На графике б) пунктиром отмечено возрастание ошибок МКМ в период магнитной бури, на графике в) стрелкой отмечено начало магнитной бури.

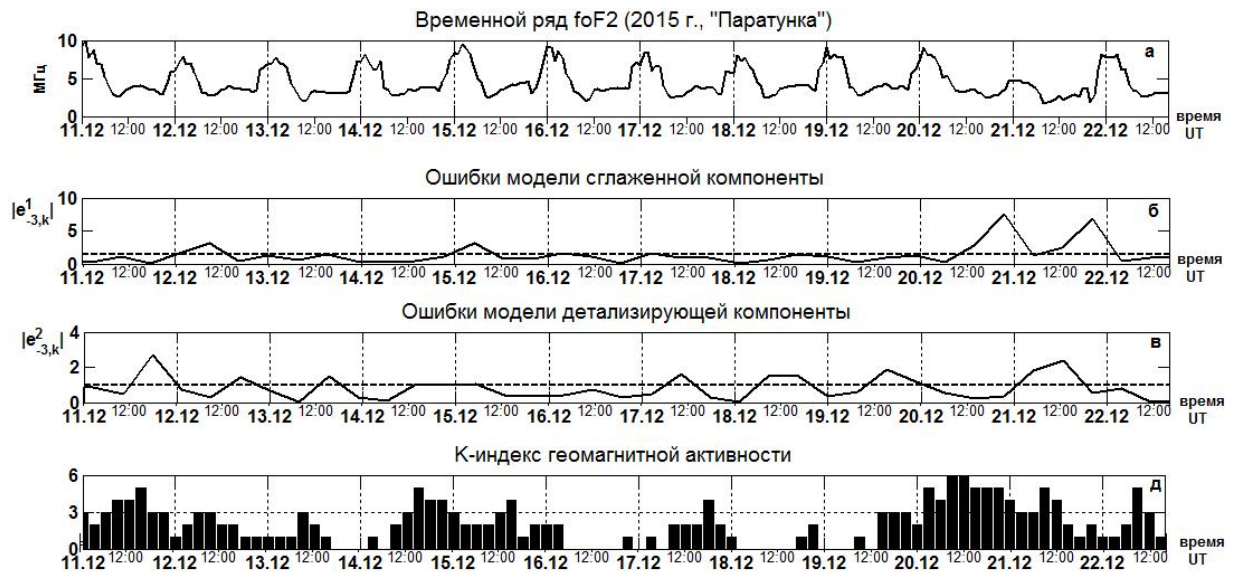


Рисунок 2.13 — Применение МКМ в период магнитной бури 20 декабря 2015 г. (Камчатка, время UT): а) - данные foF2, б) - ошибки модели сглаженной компоненты  $f_1(t)$ , в) - ошибки модели детализирующей компоненты  $f_2(t)$ , г) - К-индекс геомагнитной активности. На б) и в) пунктиром отмечены стандартные отклонения ошибок моделей компонент.

Оценка эффективности модели 1. Для оценки эффективности модели 1 выполнено статистическое моделирование. Сгенерированные модельные временные ряды включали следующие компоненты: медианные значения временного ряда foF2, белый шум, внесенные аномалии вида "треугольный импульс". Медианные значения foF2 были рассчитаны по спокойным периодам с 1969 по 2010 г с учетом солнечной активности и сезонных колебаний (спокойными периодами будем считать периоды, в которых отсутствуют геомагнитные возмущения и сейсмические события). Длительность особенностей составляла от 3 до 17 ч, амплитуда особенностей менялась от 1.5 до 6 МГц, амплитуда шума составляла 1.5 МГц. На рис. 2.14 показаны результаты оценки вероятности обнаружения особенностей в зависимости от их амплитуды и длительности. Анализ рис. 2.14 показывает, что на основе модели могут быть выделены долгопериодные (от 7 ч и более) аномальные особенности с вероятностью от 85%, если их амплитуда превышает амплитуду шума в 1,5 раза.

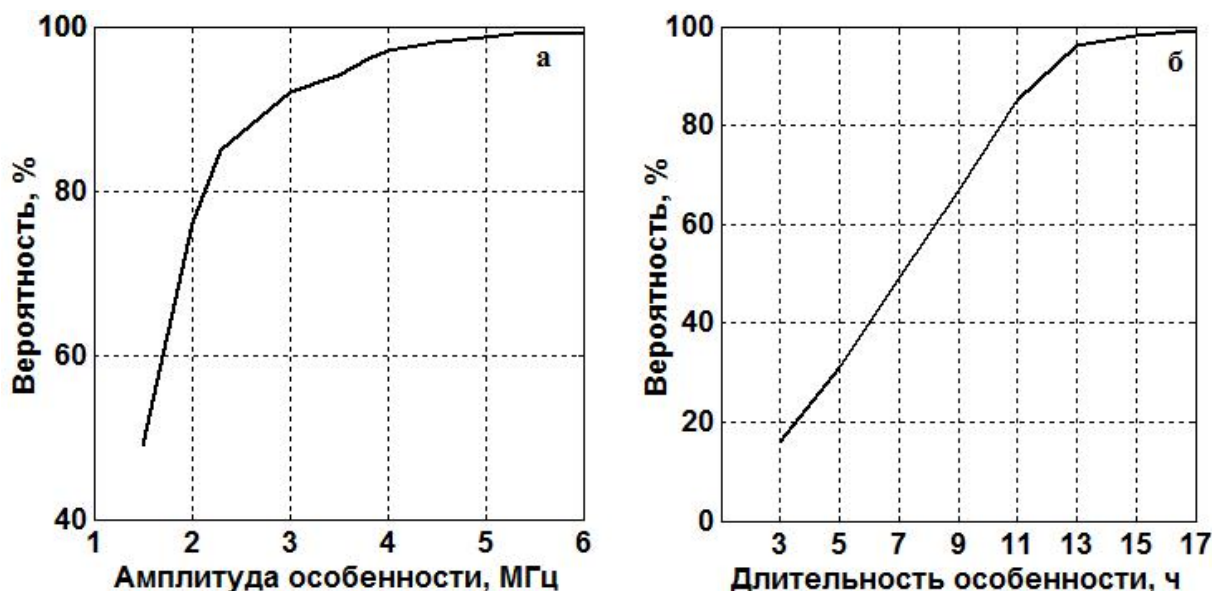


Рисунок 2.14 — График зависимости вероятности обнаружения аномалий от их амплитуды и длительности (зима, низкая СА, амплитуда шума - 1,5 МГц): а) длительность особенности - 7 ч, б) амплитуда особенности - 1,5 МГц.

Для возможности использования МКМ в режиме реального времени, в работе выполнены оценки погрешностей, связанных с краевым эффектом, возникающих на краях временного ряда (табл. 2.6). Оценки выполнялись отдельно для периодов спокойной и возмущенной ионосферы. Погрешность оценивалась для различных моментов времени регистрации данных foF2-k (определялись с учетом суточного хода данных (рис. 2.15)) и включала следующие операции:

1. В точках k выполнялся разрыв временного ряда foF2 и он дополнялся значениями с учетом суточного хода.

2. Выполнялось КМА исходного ряда  $f_N$  и дополненного ряда  $f_{k+h}$  до масштаба  $j = 3$  (см. соотн. (2.13)) и выделялись сглаженные компоненты:  $f_{-3}^N(t) = \sum c_{-3,k} \phi_{-3,k}(t)$  и  $f_{-3}^{k+h}(t) = \sum_n c_{-3,n} \phi_{-3,n}(t)$ .

3. Оценивалась погрешность:  $e = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (f_{-3}^N(t) - f_{-3}^{k+h}(t))^2}$ , где T - длина компонент.

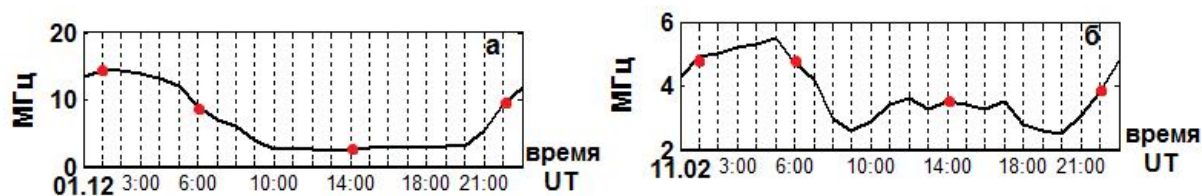


Рисунок 2.15 — Моменты времени разрыва ряда foF2 (k) для зимнего сезона (Паратунка): а) - 2000 г., б) - 2008 г., в) - 2013 г.

Таблица 2.6 — Оценка погрешности краевого эффекта для регулярной сглаженной компоненты.

Спокойные периоды	Моменты времени k, погрешность (1:00 14:00)
20.12.68-09.01.69	1,86 2,42
06.01.70-26.01.70	1,12 1,85
29.12.81-20.01.82	1,83 2,25
23.12.11-13.01.12	0,46 1,01
06.01.13-27.01.13	0,91 0,76
Возмущенные периоды	
26.11.70-20.12.70	2,15 2,65
15.01.11-08.02.11	1,39 0,55
01.12.15-23.12.15	1,39 1,26
31.01.16-18.02.16	1,46 1,66

Анализ приведенных результатов показывает, что в возмущенные периоды вследствие аномальных процессов в ионосфере наблюдается возрастание ошибок модели, значения которых превышают значения погрешности, связанной с краевым эффектом. Это свидетельствует об эффективности модели 1 и возможности ее использования в режиме, близком к реальному времени.

### 2.2.3 Модель 2, основанная на совмещении КМА и нейронных сетей

Идентификация модели 2 выполнялась на основе следующих операций:

1. На основе КМА временной ряд представляем в виде [72]:

$$f_0(t) = \sum_{j=-1}^{-3} g[2^j t] + f[2^{-m} t], \quad (2.15)$$

где  $g[2^j t] = \sum_n d_{j,n} \Psi_{j,n}(t)$ ,  $d_{j,n} = \langle f, \Psi_{j,n} \rangle$ ,  $\Psi$  - базисный вейвлет,  $j$  - разрешение,  $f[2^{-3} t] = \sum_k c_{-3,n} \phi_{-3,n}(t)$ ,  $c_{-3,n} = \langle f, \phi_{-3,n} \rangle$ ,  $\phi$  - сглаживающая скейлинг-функция. Нижний индекс 0 соответствует исходному разрешению данных. Оценки по определению уровня разложения представлены в работах [43, 63, 73].

2. Для аппроксимации сглаженной компоненты  $f[2^{-3} t]$ , полученной на основе операции (2.15), строим нейронную сеть переменной структуры [74]. Построенная нейронная сеть (НС) выполняет отображение данных вида

$$y : f_0(\cdot) \rightarrow f_0^*(\cdot),$$

где  $f_0(\cdot)$  - вход НС,  $f_0^*(\cdot)$  - выход НС. При подаче на вход обученной НС значений функции  $f_0(\cdot)$  из интервала  $(l-Q+1, l)$ , сеть вычисляет упрежденные её значения на временном интервале  $(l+1, l+I)$ , где  $l$  - текущий дискретный момент времени;  $I$  - длина интервала упреждения. Процесс построения НС и результаты ее работы подробно описаны в работах [61, 62, 63, 64, 65, 66].

Для построения НС использовались данные станции Паратунка (Камчатка) за период 1968-2010 гг. С целью аппроксимации характерных вариаций параметров ионосферы периоды, в которые наблюдались геомагнитные возмущения и сейсмическая активность на Камчатке (землетрясения с энергетическим классом  $Ks \geq 12$ , произошедшие от станции ионосферного зондирования в радиусе до 300 км) не использовались при обучении НС. Также при обучении НС не использовались периоды, содержащие значительные пропуски данных. Построенные НС выполняют следующие преобразование данных:

$$c_{-3,k+1}(t) = \phi_3 \left( \sum_i \omega_{ij} \phi_2 \left( \sum_q \omega_{qi} \phi_1 \left( \sum_k \omega_{kq} c_{-3,k}(t) \right) \right) \right),$$

где  $\omega_{kq}$  - весовые коэффициенты нейрона  $q$  входного слоя сети,  $\omega_{qi}$  - весовые коэффициенты нейрона  $i$  скрытого слоя сети,  $\omega_{ij}$  - весовые коэффициенты нейрона  $j$  выходного слоя,  $\phi_1(z) = \phi_2(z) = \frac{1}{1+\exp(-z)}$ ,  $\phi_3(z) = a * z + b$ .

Оценка модели 2.

Для оценки модели 2 производилась оценка погрешности аппроксимации данных ионосферы на основе НС переменной структуры (без применения КМА, т.е. при  $m = 0$ ) и на основе предлагаемого подхода, используя различные уровни разложения  $m$  (см. соотн. (2.15)). Погрешность аппроксимации данных определялась по формуле:

$$E_I(m) = \frac{\| \hat{f}_0^*(t) - f_0^*(t) \|}{\| f_0^* \|},$$

где  $f_0^*(t)$  - желаемое,  $\hat{f}_0^*(t)$  - действительные выходные значения сети. Также в оценках учитывалась доля потерянной на этапе выполнения КМА информации:

$$\epsilon_I(m) = \frac{\| f_0(t) - f_0^*(t) \|}{\| f_0 \|},$$

где  $f_0(t)$  - исходные значения временного ряда. Результаты оценок представлены в таблицах 2.7, 2.8, 2.9, которые подтверждают эффективность предлагаемого подхода.

Таблица 2.7 — Результаты работы НС в зависимости от уровня разложения  $m$  (зимний сезон).

$m$	Активность Солнца	$\phi$	$E_I(m)$	Размер краевого эффекта
0	высокая	нет	0,0805%	0
1	высокая	Db3	0,0270%	10
2	высокая	Db3	0,0131%	20
3	высокая	Db3	0,0093%	40
4	высокая	Db3	0,0046%	80

Таблица 2.8 — Результаты оценки работы построенных нейронных сетей (зимний сезон).

$m$	Активность Солнца	$\phi$	$E_I(m)$	$\epsilon_I(m)$	Размер краевого эффекта
3	низкая	Coif2	0,0042%	0,228%	40

Продолжение таблицы 2.8

$m$	Активность Солнца	$\phi$	$E_I(m)$	$\epsilon_I(m)$	Размер краевого эффекта
3	низкая	Coif3	0,0011%	0,166%	64
3	низкая	Db2	0,0203%	0,213%	24
3	низкая	Db3	0,0057%	0,194%	40
3	низкая	Db4	0,0084%	0,201%	66
3	высокая	Coif2	0,0102%	0,281%	40
3	высокая	Coif3	0,0017%	0,164%	64
3	высокая	Db2	0,0334%	0,272%	24
3	высокая	Db3	0,0093%	0,236%	40
3	высокая	Db4	0,0154%	0,237%	66

Таблица 2.9 — Результаты работы НС (летний сезон).

$m$	Активность Солнца	$\phi$	$E_I(m)$	$\epsilon_I(m)$	Размер краевого эффекта
3	низкая	Coif2	0,0007%	0,117%	40
3	низкая	Coif3	0,0003%	0,111%	64
3	низкая	Db2	0,0137%	0,098%	24
3	низкая	Db3	0,0034%	0,124%	40
3	низкая	Db4	0,0027%	0,104%	66
3	высокая	Coif2	0,0006%	0,083%	40
3	высокая	Coif3	0,0002%	0,080%	64
3	высокая	Db2	0,0083%	0,089%	24
3	высокая	Db3	0,0033%	0,075%	40
3	высокая	Db4	0,0012%	0,087%	66

На рис. 2.16, в качестве примера, показаны ошибки НС, на вход которой поступают исходные данные (без предварительного применения КМА) и ошибки НС, обученной на основе предложенного метода (использовалось КМА до уровня  $m \geq 3$ ). Анализ результатов на рис. 2.16 подтверждает эффективность метода, позволившего повысить качество работы нейронной сети в периоды спокойной ионосферы и детектировать аномальные периоды.

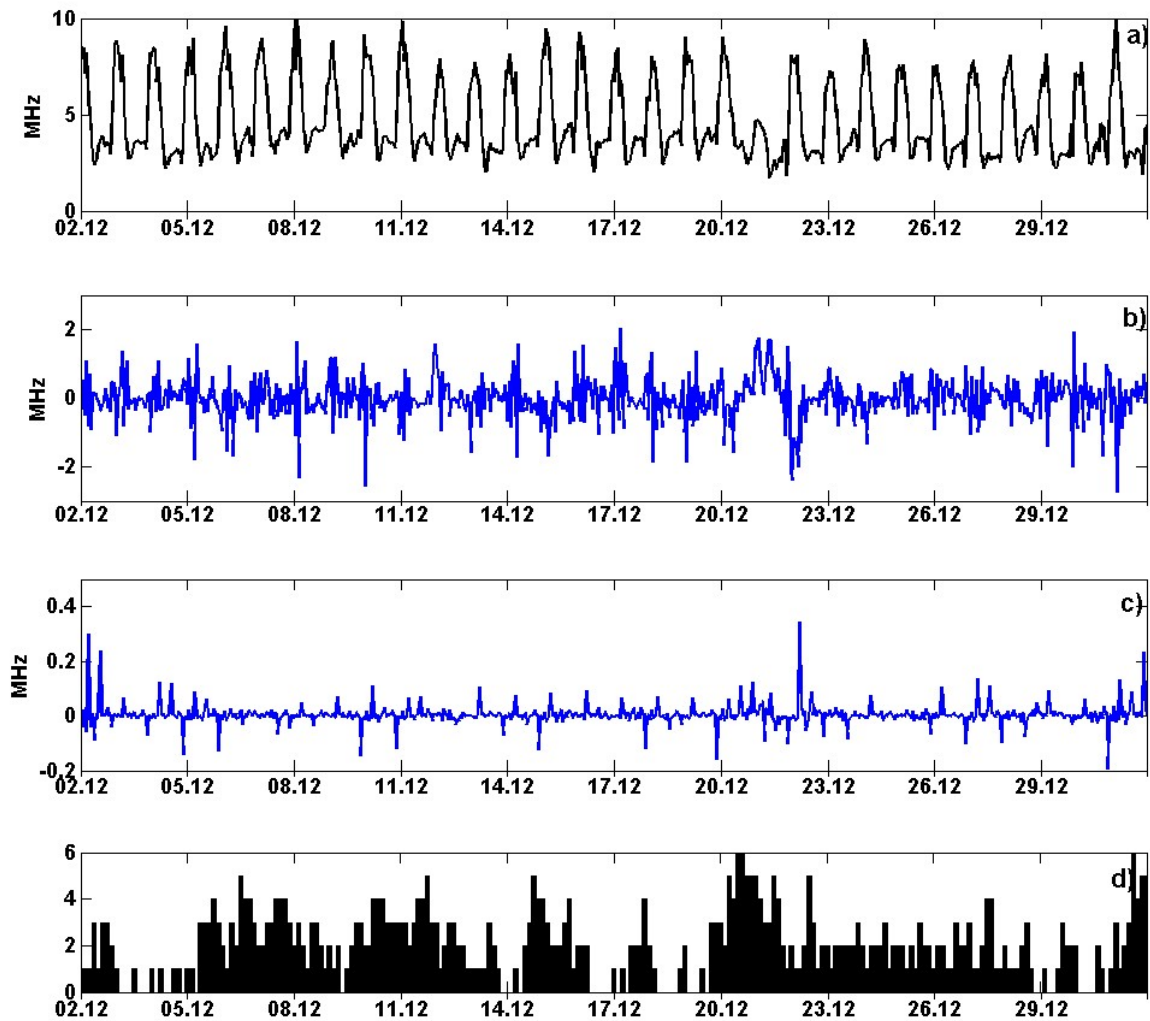


Рисунок 2.16 — Результаты обработки foF2 за 02.12 - 31.12 2015 г. а) - данные foF2; б) - ошибки нейронной сети, обученной без применения вейвлет-преобразования ( $m = 0$ ); в) - ошибки нейронной сети, обученной с применением вейвлет-преобразования ( $m = 3$ , вейвлет - Добеши 3); д) - К-индекс магнитного поля Земли.

### Выделение аномальных периодов в ионосфере, на основе модели 2

Ошибка НС в момент времени  $t$  определяется как разность между желаемым  $f_0^*(\cdot)$  и действительным  $\hat{f}_0^*(\cdot)$  выходными значениями функции:

$$e(t) = \hat{f}_0^*(t) - f_0^*(t).$$

Обученная НС позволяет воспроизводить характерные для спокойных периодов вариации ионосферных параметров. В периоды аномальных изменений во временном ходе данных, очевидно, ошибки НС возрастут, поэтому операция их выделения может быть основана на проверке условия:

$$e(t) > T,$$

где  $T$  - пороговое значение, определяющее наличие аномалии.



На рис. 2.17 показаны результаты анализа параметров критической частоты ионосферного слоя F2 на основе модели 2 (анализируемый период 10.10 - 17.10 2016 г.). В период спокойной геомагнитной обстановки (10 - 12 октября) нейронная сеть показывает малые ошибки аппроксимации данных foF2 (рис. 2.17, графики с, d), в период сильной магнитной бури, произошедшей 13 октября, ошибки существенно возрастают (рис. 2.17, графики с, d). Возрастание ошибок нейронной сети в период магнитной бури свидетельствует об изменении характерного хода параметров ионосферы (рис. 2.17 график а) и возникновении аномальных процессов в ионосфере.

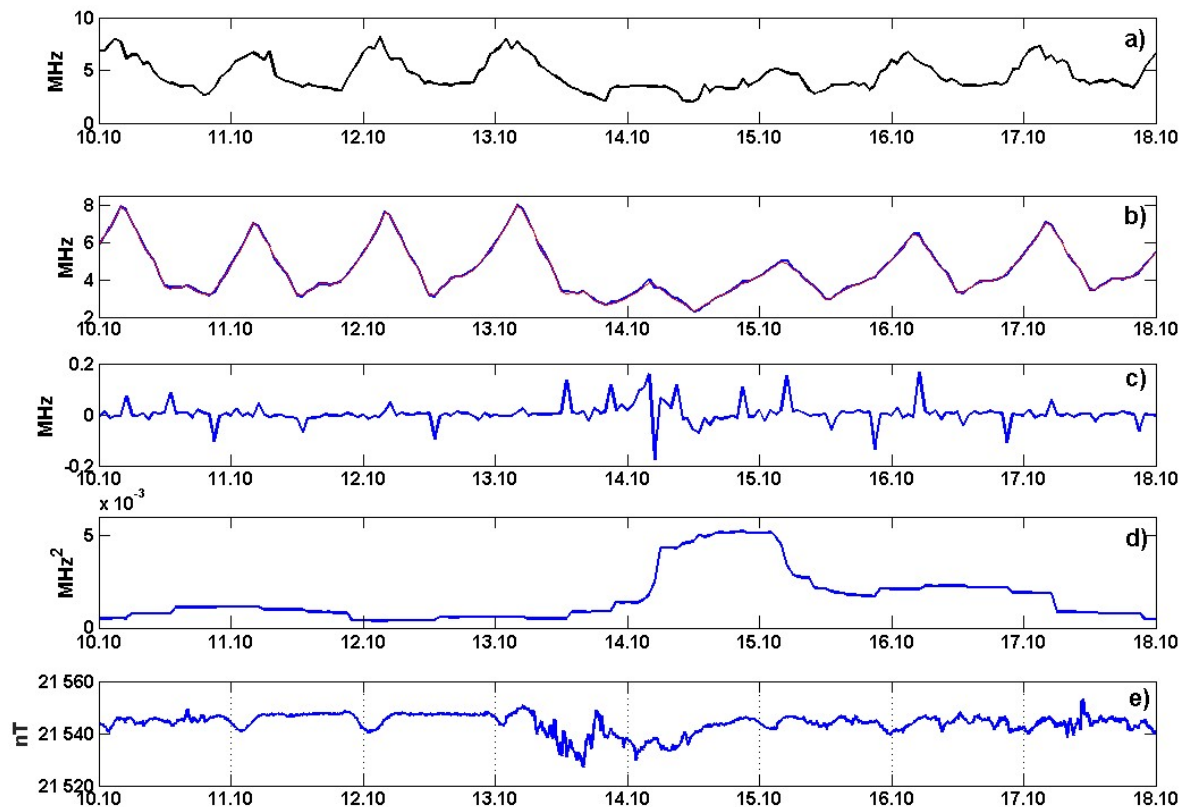


Рисунок 2.17 — Результаты обработки foF2 за 10.10 - 17.10 2016 г. а) - данные foF2; б) - аппроксимация foF2,  $m = 3$ , вейвлет - Добеши 3 (синим - исходные данные, красным - модель); в) - ошибки нейронной сети; г) - дисперсия ошибок, оценивалась в скользящем временном окне, равном 24 отсчета; д) - N-компонента магнитного поля Земли, характеризует состояние геомагнитного поля (мерой геомагнитной возмущенности является величина отклонения текущей вариации геомагнитного поля от характерного уровня).

На рис. 2.18 показаны результаты обработки ионосферных данных в период длительных геомагнитных возмущений (период 23-25 ноября 2016 г.). На анализируемой станции Паратунка (Камчатка) возмущения магнитного поля Земли были зарегистрированы 22, 24 и 25 ноября 2016 г. ([www.ikir.ru](http://www.ikir.ru)). По данным комической погоды (<http://ipg.geospace.ru>) в конце суток 23 ноября пришел ускоренный поток от обширной корональной дыры, скорость солнечного ветра

до конца суток 24 ноября увеличилась от 430 км/сек до 550 км/сек. В начале суток 25 ноября пришел второй ускоренный поток от этой же корональной дыры, скорость солнечного ветра увеличилась до 870 км/сек. Анализ результатов обработки ионосферных данных показывает, что в анализируемом районе за несколько часов до начала первого события и во время бури в ионосфере значительно повысилась электронная концентрация (аномальные возрастания с 09.00 UT 22 ноября по 02.00 UT 24 ноября, показаны на рис. 2.18 b,c красным цветом). Длительность положительной аномалии составила примерно 28 часов, её максимум пришелся на ночные часы LT. В периоды наиболее сильных геомагнитных возмущений (24 ноября в период с 13:20 по 14:45 UT и 25 ноября в период с 5:00 по 7:10 UT, рис. 2.18, график e) наблюдается понижение электронной концентрации (в период с 14.00 ч. 24 ноября по 07.00 ч. 25 ноября по UT, показана на рис. 2.18 синим цветом). Результаты моделирования на основе нейронной сети (рис. 2.18, график d) подтверждают крупномасштабные аномальные изменения в ионосфере в периоды геомагнитных возмущений, восстановление характерного хода параметров ионосферы произошло после завершения магнитных бурь, 26 ноября 2016г.

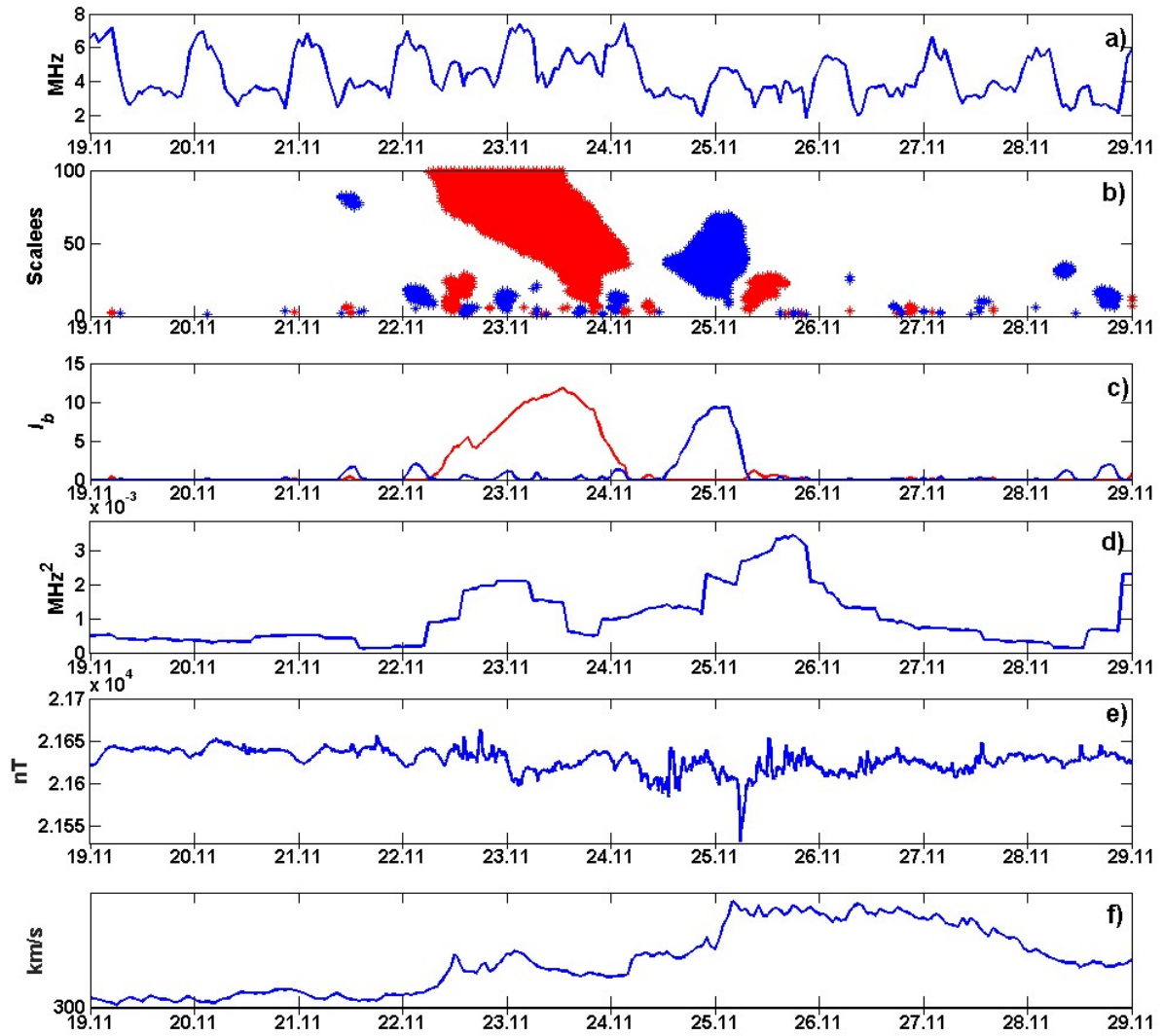


Рисунок 2.18 — Результаты обработки данных за 19.11 - 28.11 2016 г.а) - данные foF2; б) - ионосферные аномалии (красным - положительные аномалии; синим - отрицательные аномалии); в) - интенсивность ионосферных аномалии; г) - дисперсия ошибок нейронной сети, получена при использовании вейвлета Добеши 3; д) - Н-компонента магнитного поля Земли, характеризует состояние геомагнитного поля (мерой геомагнитной возмущенности является величина отклонения текущей вариации геомагнитного поля от характерного уровня); е) - скорость солнечного ветра.

#### 2.2.4 Выделение аномалий в ионосферных данных на основе порогового алгоритма, основанного на непрерывном вейвлет-преобразовании.

Для выделения и детального анализа ионосферных аномалий также использовались вычислительные решения, основанные на непрерывном вейвлет-преобразовании:

$$(W_{\Psi})f(b,a) := |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \Psi - \text{вейвлет}, f \in L^2(\mathbb{R}), a,b \in \mathbb{R}, a \neq 0 \quad (2.16)$$

и применении пороговой функции:

$$P_{T_a}(W_\Psi f_{b,a}) = \begin{cases} W_\Psi^+ f_{b,a}, & \text{если } (W_\Psi f_{b,a} - W_\Psi f_{b,a}^{med}) \geq T_a \\ 0, & \text{если } (W_\Psi f_{b,a} - W_\Psi f_{b,a}^{med}) < T_a \\ W_\Psi^- f_{b,a}, & \text{если } (W_\Psi f_{b,a} - W_\Psi f_{b,a}^{med}) \leq -T_a \end{cases}, \quad (2.17)$$

где порог  $T_a = U * St_a$  - определяет наличие аномалии на масштабе  $a$  вблизи точки  $\xi$  содержащейся в носителе  $\Psi_{b,a}$ ,  $U$  - коэффициент порога,  $St_a = \sqrt{\frac{1}{\Phi-1} \sum_{u=1}^{\Phi} (W_\Psi f_{b,a} - \overline{W_\Psi f_{b,a}})^2}$ ,  $\overline{W_\Psi f_{b,a}}$  и  $W_\Psi f_{b,a}^{med}$  - среднее значение и медиана, определяемые в скользящем временном окне длины  $\Phi$ . В соответствии с (2.17) пороговый коэффициент  $U$  определяет наличие либо отсутствие аномальных изменений в анализируемых данных. В оценках при определении коэффициента  $U$  использовался апостериорный риск, который минимизировался. Для выделенных аномалий выполняется оценка их интенсивности:

$$I_b^+ = \sum_{a=1}^{a_{max}} \frac{|P_{T_a}^+(W_\Psi f_{b,a})|}{\|P_{T_a}^+(W_\Psi f_{b,a})\|_2},$$

$$I_b^- = \sum_{a=1}^{a_{max}} \frac{|P_{T_a}^-(W_\Psi f_{b,a})|}{\|P_{T_a}^-(W_\Psi f_{b,a})\|_2},$$

где  $\|\cdot\|_2$  - евклидова норма,  $P_{T_a}^+(W_\Psi f_{b,a}) = |P_{T_a}(W_\Psi f_{b,a})|$ , при  $(W_\Psi f_{b,a} - W_\Psi f_{b,a}^{med}) \geq T_a$ ,  $P_{T_a}^-(W_\Psi f_{b,a}) = |P_{T_a}(W_\Psi f_{b,a})|$ , при  $(W_\Psi f_{b,a} - W_\Psi f_{b,a}^{med}) \leq -T_a$ .

Оценка эффективности порогового алгоритма. Для оценки эффективности работы порогового алгоритма в режиме реального времени, в работе выполнены эксперименты по оценке влияния краевого эффекта, возникающего на краях временного ряда в процессе непрерывного вейвлет-преобразования, и возможности его минимизации (табл. 2.10, 2.11). Оценки выполнялись отдельно для периодов спокойной и возмущенной ионосферы для различных моментов времени регистрации данных foF2 - k (разрыв ряда выполнялся каждые два часа, начиная с 00:00 UT). В точках k выполнялся разрыв временного ряда foF2, и он дополнялся медианными значениями, рассчитанными для каждого часа на основе предыдущих значений (длина временного интервала для расчета медианных значений составляла 2 недели, 3 недели, 4 недели). Оценка влияния краевого эффекта выполнялась в зависимости от точек разрыва - k и длины временного интервала (табл. 2.10, 2.11), и включала следующие операции:

1. Выполнялось НВП исходного ряда  $f_N$  и дополненного ряда  $f_{k+h}$  (где  $h = a\Omega$ ,  $\Omega$  - носитель вейвлета  $\Psi()$ ) до масштаба  $a = 320$  (см. соотн. (2.16)) и получены вейвлет-коэффициенты:  $W_\Psi f_{b,320}^N$  и  $W_\Psi f_{b,320}^{k+h}$ .

2. Оценивалась погрешность:

$E = \sum_{a=1}^{320} \sqrt{\frac{1}{k-1} \sum_{n=1}^k ((W_\Psi f_{b,320}^N - W_\Psi f_{b,320}^{k+h}) - \overline{W_\Psi f_{b,320}^{k+h}})^2}$ , где  $\overline{W_\Psi f_{b,320}^{k+h}}$  - среднее значение.

Таблица 2.10 — Оценка погрешности краевого эффекта для периодов спокойной ионосферы.

Анализируемый период, 2016 г	Точки разрыва временного ряда (UT)											
	00:00	02:00	04:00	06:00	08:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00	22:00
	величина временного интервала для моделирования временного хода - 2 недели											
01.01-20.01	104.91	103.94	128.49	141.91	157.22	150.22	145.79	149.16	155.78	159.86	163.47	165.36
09.07-02.08	144.13	135.98	141.75	152.38	154.95	158.91	163.33	169.24	175.22	177.66	169.37	167.14
21.03-12.04	98.19	93.44	90.03	91.53	93.35	92.57	90.59	90.60	90.31	89.38	87.30	88.08
05.09-26.09	118.28	139.41	156.95	169.04	159.91	125.78	103.80	100.59	104.05	107.20	110.12	109.72
19.02-10.03	44.19	34.26	41.41	43.71	42.49	44.67	48.63	51.61	54.23	57.97	59.08	49.20
15.06-05.07	78.29	73.58	67.87	68.17	77.32	70.66	51.31	26.18	26.59	35.82	32.21	23.72
	величина временного интервала для моделирования временного хода - 3 недели											
01.01-20.01	86.24	92.02	118.91	132.33	146.90	136.56	129.29	129.49	135.80	139.83	143.84	146.13
09.07-02.08	136.80	126.80	129.38	138.29	140.76	145.35	148.96	154.17	159.88	163.31	160.05	159.00
21.03-12.04	97.22	88.12	77.60	75.41	78.61	76.33	72.85	73.11	73.77	74.84	74.32	78.54
05.09-26.09	124.38	144.26	163.33	178.00	173.22	136.26	104.30	94.98	98.53	103.01	107.88	109.04
19.02-10.03	40.82	42.67	50.53	48.76	48.77	46.43	47.55	49.35	50.95	50.64	45.51	37.62
15.06-05.07	67.9	70.45	75.84	82.41	95.16	99.60	86.70	53.66	48.00	55.46	42.39	33.67
	величина временного интервала для моделирования временного хода - 4 недели											
01.01-20.01	80.12	84.97	109.23	119.96	130.00	115.24	104.14	99.06	103.46	106.53	111.21	115.06
09.07-02.08	127.54	114.20	113.25	120.19	120.70	124.42	129.00	135.84	142.68	147.33	145.72	145.59
21.03-12.04	104.29	89.43	76.42	76.50	83.14	73.25	63.90	64.63	67.53	72.20	74.55	80.98
05.09-26.09	127.85	145.59	163.37	179.62	179.97	142.57	101.48	88.59	91.55	97.16	102.62	105.43
19.02-10.03	44.17	44.84	50.44	50.77	50.95	49.14	51.97	54.36	56.86	58.27	54.74	46.10
15.06-05.07	93.68	100.92	109.32	116.91	133.40	144.86	130.35	73.33	59.54	59.04	44.61	52.03

Таблица 2.11 — Оценка погрешности для периодов возмущенной ионосферы (2 недели)

Даты, 2016 г	Точки разрыва временного ряда (UT)											
	00:00	02:00	04:00	06:00	08:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00	22:00
	анализируемая магнитная буря 13.10.2016 г.											
11.10	166.40	169.16	176.05	198.75	218.45	223.04	232.47	241.78	250.44	259.78	267.48	270.37
12.10	264.56	254.41	255.39	272.27	294.37	320.05	345.78	374.25	401.94	420.12	435.82	458.59
13.10	433.71	412.83	385.65	381.18	380.35	385.51	393.48	406.05	419.54	430.00	435.16	429.55
	анализируемая магнитная буря 25.11.2016 г.											
23.11	309.95	327.38	342.04	358.60	368.99	368.00	351.03	309.80	287.77	253.11	195.61	192.02

Продолжение таблицы 2.11

Даты, 2016 г	Точки разрыва временного ряда (UT)											
24.11	198.25	211.69	213.41	228.30	233.61	233.10	239.21	240.42	237.89	235.97	217.97	199.64
25.11	176.78	158.81	157.67	170.99	182.03	188.22	192.57	192.70	190.97	195.36	177.47	148.86

Анализ полученных результатов показывает, что в возмущенные периоды (табл. 2.11) погрешность, связанная с краевым эффектом, превышает погрешность для спокойных периодов (табл. 2.10), что говорит о наличии аномальных эффектов в ионосфере. Данные результаты подтверждают высокую чувствительность метода, и возможность его реализации в режиме реального времени (по мере поступления данных регистрации).

### Результаты применения порогового алгоритма

На рис. 2.19 показаны результаты обработки ионосферных данных за 30 дней (07 марта - 05 апреля 2015). В указанный период произошло два сильных ионосферных возмущения. Первое ионосферное возмущение соответствует магнитной буре 17 марта 2015 г. По данным космической погоды (<http://ipg.geospace.ru/>) в начале суток 17 марта к Земле подошла ударная волна от выброса корональной массы, произошедшего 11 марта в 00.45 UT, скорость солнечного ветра возросла до 500 км/сек. В 10.45 UT из-за ускоренного потока (вспышка C9/1F в 02.13 UT.15 марта) скорость солнечного ветра увеличилась до 670 км/сек, и до конца суток 17 марта скорость оставалась высокой (около 600 км/сек, рис. 2.19 e). Анализ результатов показывает, что накануне магнитной бури в ионосфере возникла положительная аномалия, длительностью около 36 часов и максимумом в 15.00 UT (рис. 2.19 b,c). В начале магнитной бури положительная аномалия сменилась на отрицательную аномалию, длительностью около 25 часов (рис. 2.19 b,c).

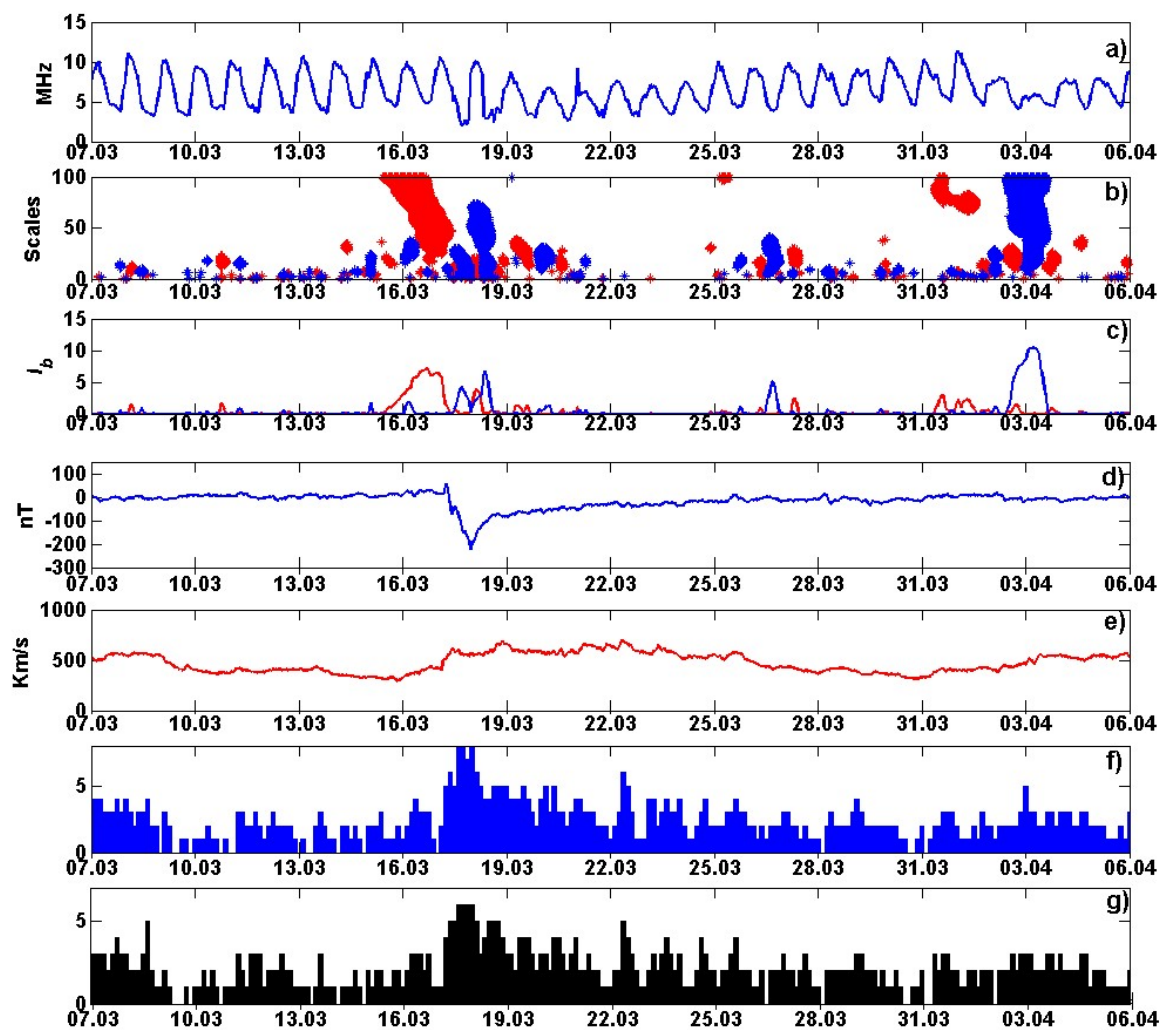


Рисунок 2.19 — Результаты обработки данных за период 07.03 - 05.04 2015. а) - часовые данные foF2 (ст. Паратунка); б) - положительные (красным) и отрицательные (синим) ионосферные аномалии; в) - интенсивность аномалий; г) - DST индекс; д) - скорость солнечного ветра; е) - Kp-индекс; з) - K-индекс (ст. Паратунка).

Анализ результатов в период магнитной бури 19 декабря 2015г., выполненный по ионосферным данным станций Паратунка (53.0 N, 158.7 E) и Норфолк (-35.6 N, 160 E) (см. рис. 2.20), показывает наиболее характерное поведение ионосферы в возмущенные периоды (характерное поведение определено путем обработки ряда событий, основные результаты исследования представлены в отчете в п. 2.4 и описаны в работах [41, 43, 45, 62, 69, 70, 71, 75]). За несколько часов до начала бури наблюдалось крупномасштабное и длительное по времени повышение электронной концентрации в ионосфере. В период начальной фазы бури скорость солнечного ветра достигла значений 490 Км/с, одновременно с повышением скорости солнечного ветра на анализируемых станциях возрастала интенсивность положительных ионосферных аномалий. Далее, на этапе основной фазы магнитной бури (наблюдается существенное понижение Dst-индекса), произошло существенное понижение электронной концентрации в ионосфере (рис. 2.20 б,в,г,д).

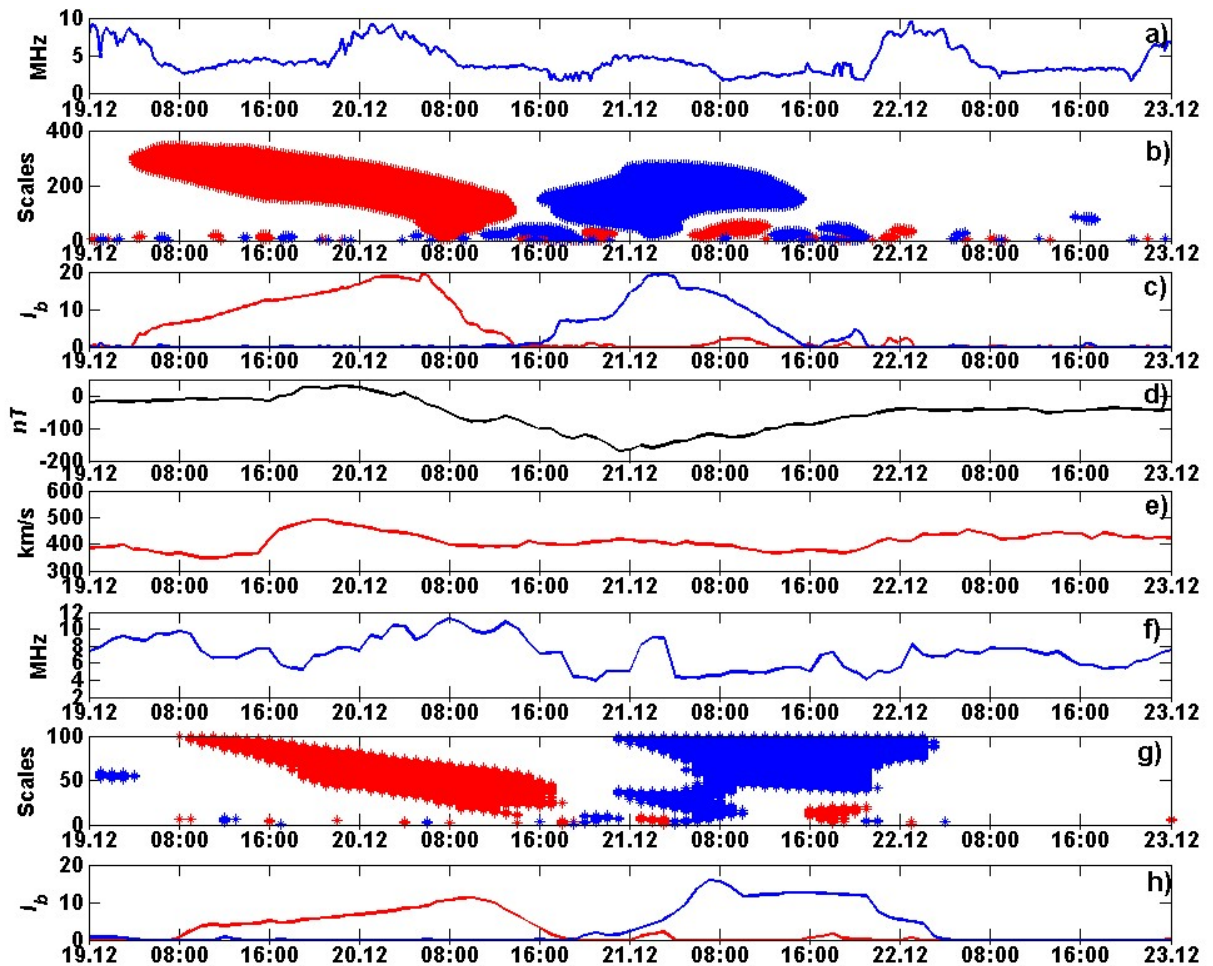


Рисунок 2.20 — Результаты обработки данных за период 19 - 22 декабря 2015. а) - часовые данные foF2 (ст. Паратунка); б) - положительные (красным) и отрицательные (синим) ионосферные аномалии (ст. Паратунка); в) - интенсивность аномалий (ст. Паратунка); д) - DST индекс; е) - скорость солнечного ветра; ф) - часовые данные foF2 (ст. Норфолк); г) - положительные (красным) и отрицательные (синим) ионосферные аномалии (ст. Норфолк); г) - интенсивность аномалий (ст. Норфолк).

## 2.3 Анализ динамики вариаций космических лучей

### 2.3.1 Постановка задачи, анализ предлагаемых подходов

Наблюдения космических лучей используются при проведении ряда фундаментальных и прикладных исследований, связанных с мониторингом и прогнозом космической погоды [2,3]. Весьма актуальной задачей является выделение аномальных изменений в космических лучах (предповышений и предпонижений интенсивности космических лучей), которые могут возникать накануне сильных геомагнитных бурь [79, 80, 81, 82]

Данные космических лучей имеют сложную структуру, в их динамике находят отражение 11-летний цикл и 27-дневный солнечный период вращения и присутствует суточный ход,



обусловленный асимметрией формы магнитосферы, которая изменяется во времени при изменении параметров солнечного ветра [82, 83]. Известно, что наиболее существенные изменения в параметрах космических лучей вызывают выбросы коронарной массы и следующие за ними изменения в параметрах межпланетного поля и солнечного ветра [84]. Традиционные методы анализа данных не являются достаточно эффективными для их исследования [84, 13, 85, 86]. В работе анализ вариаций космических лучей выполнялся с использованием методов вейвлет-преобразования, а также на основе их совмещения с аппаратом нейронных сетей. Данный подход получает в настоящее время интенсивное развитие [85, 87, 88, 89, 90, 14, 86]. Использование нейронных сетей при первичной обработке данных нейтронных мониторов позволило повысить эффективность процедуры подавления шума, по сравнению с медианными методами [13]. На основе совмещения вейвлет-преобразования с методом разложения на эмпирические моды в долгосрочных временных изменениях хода космических лучей выделены доминирующие временные масштабы (периоды 11 лет, 22 года, 6 лет и двухлетние колебания) и определена их физическая природа [85].

В рамках выполнения НИР, на основе применения различных конструкций вейвлет-преобразования и многослойных нейронных сетей разработан метод и алгоритмы анализа вариаций космических лучей по данным сети наземных станций. Разработанный инструментарий описан ниже, он позволяет детально изучать структуру данных, определять характерные вариации и выделять аномалии.

### 2.3.2 Метод анализа данных космических лучей

#### Модель временного хода данных космических лучей

В соответствии со структурой данных космических лучей, содержащих рекуррентную составляющую и разномасштабные спорадические эффекты, предложена следующая обобщенная модель временного хода космических лучей (МКЛ):

$$f_{\text{НМ}}(t) = \sum_n r_n \phi_n + \sum_k \sum_n l_n^k \rho_n^k + \sum_g \sum_n s_n^g \tau_n^k + e(t) = R(t) + \sum_k L_k(t) + \sum_g S_g(t) + e(t) \quad (2.18)$$

где  $R(t) = \sum_n r_n \phi_n$  - рекуррентная составляющая,  $\sum_k L_k(t) = \sum_k \sum_n l_n^k \rho_n^k$  - крупномасштабные спорадические составляющие,  $\sum_g S_g(t) = \sum_g \sum_n s_n^g \tau_n^k$  - тонкие спорадические эффекты (локальные повышения и понижения),  $e(t)$  - шум. Построение МКЛ основано на совмещении вейвлет-преобразования и нейронных сетей. 1. На основе вейвлет-преобразования выполняются разложения данных вида:

$$f(t) = f_{(-m)}(t) + \sum_{j=-m}^{-1} g_j(t) \quad (2.19)$$

где  $g_j \in W_j$ ,  $f_{-m} \in V_{-m}$ ,  $g_j = \sum_n d_{j,n} \psi_{j,n}$ ,  $f_{-m} = \sum_n c_{-m,n} \phi_{-m,n}$ ,  $\Psi_j = \{\psi_{j,n}\}_{n \in \mathbb{Z}}$  - вейвлет-базис,  $\phi_j = \{\phi_{j,n}\}_{n \in \mathbb{Z}}$  - базис, порожденный скейлинг-функцией.

Выделенные на основе разложений (2.19) рекуррентные составляющих данных космических лучей аппроксимируются на основе многослойных нейронных сетей прямого распространения (МНСПР). Правомочность данной процедуры доказана в теореме Цыбенко [37]:

Архитектура МНСПР позволяет для любой функции  $p(f_{t_1}, f_{t_2} \dots f_{t_{\gamma_0}})$  построить аппроксимацию вида  $F(f_{t_1}, f_{t_2} \dots f_{t_{\gamma_0}}) = \sum_{i=1}^{\gamma_1} \alpha_i \Phi(\sum_{j=1}^{\gamma_0} \omega_{i,j} f_{t_j} + \beta_i)$  :

$|F(f_{t_1}, f_{t_2} \dots f_{t_{\gamma_0}}) - p(f_{t_1}, f_{t_2} \dots f_{t_{\gamma_0}})| < \varepsilon$ , где  $\gamma_0, \gamma_1$ - число нейронов входного и скрытого слоя соответственно;  $\varepsilon > 0, \varepsilon \in R$ ,  $(f_{t_1}, f_{t_2} \dots f_{t_{\gamma_0}})$ -вектор входных значений сети,  $\Phi(\lambda(n)) = \frac{1}{1+e^{-\alpha\lambda(n)}}$  - сигмоидальная функция активации.

Идентификация компоненты МКЛ  $f_\alpha(t) = R(t) + \sum_k L_k(t)$  (см. соотн.(2.18)) выполнялась на основе следующих операций:

1.1. На основе кратномасштабных вейвлет-разложений (КМА) [36] получены представления вариации КЛ в виде:

$$f(t) = f_{a,(-m)}(t) + \sum_{j=-1}^{-m} f_{d,j}(t) \quad (2.20)$$

где  $f_{a,(-m)}(t) = \sum_n c_{-m,n} \phi_{-m,n}(t)$ ,  $f_{d,j}(t) = \sum_n d_{j,n} \Psi_{j,n}$ ,  $\Psi_j = \{\Psi_{j,n}\}_{n \in Z}$ -вейвлет-базис,  $\phi_j = \{\phi_{j,n}\}_{n \in Z}$  - базис, порожденный скейлинг-функцией.

Для составляющих КЛ  $f_{a,(-m)}(t)$  на основе нейронной сети (НС) построены отображения

$$\gamma : f_{a,(-m)}(t) \Rightarrow \overline{\overline{f_{a,(-m)}(t)}} \quad (2.21)$$

где  $f_{a,(-m)}(t)$  - вход НС,  $\overline{\overline{f_{a,(-m)}(t)}}$  - выход НС. В результате выполнения 1.1 и 1.2 построена следующая нейросетевая модель аппроксимации временного хода данных космических лучей:

$$\overline{\overline{c_{-m,n+1}}} = \sum_{i=1}^{\gamma_2} \alpha_i \Phi_{sigm}(\sum_{j=1}^{\gamma_1} \omega_{ij} \Phi_{sigm}(\sum_{k=0}^{\gamma_0} \omega_{jk} c_{-m,n-k} + \beta_k) + \beta_j) + \beta \quad (2.22)$$

где  $\Phi_{sigm}(n) = \frac{1}{1+e^{-\alpha\lambda(n)}}$  сигмоидальная функция активации,  $\omega_{jk}$  весовые коэффициенты 1-го скрытого слоя,  $\omega_{ij}$  весовые коэффициенты 2-го скрытого слоя,  $\alpha_i$  весовые коэффициенты выходного нейрона,  $\beta_k$  пороговые коэффициенты 1-го слоя скрытого,  $\beta_j$  пороговые коэффициенты второго скрытого слоя, пороговый коэффициент выходного нейрона,  $\gamma_0$  размерность вектора входа,  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  число нейронов 1-го и 2-го слоев.

Определение параметров нейросетевой модели выполнялось на основе алгоритмов, представленных в работах [14, 86, 92, 93, 94]

### 2.3.3 Алгоритмы анализа данных космических лучей и выделения аномальных эффектов

Очевидно, аномалии в вариациях КЛ могут содержать трендовые изменения, возникающие в периоды длительных Форбуш-эффектов, а также могут иметь локальную структуру, которая характерна для локальных повышений и понижений интенсивности КЛ. Описанная выше компонента МКЛ  $f_\alpha(t) = R(t) + \sum_k L_k(t)$  использовалась в работе для выделения трендовых изменений вариаций КЛ. Разработанный алгоритм состоит из следующих операций.

Алгоритм выделения крупномасштабных аномальных изменений во временном ходе КЛ:

1. Оцениваем ошибки модели:  $e(n) = \overline{c_{-5,n}} - c_{-5,n}$  где  $c_{-5,n}$  – реальное значение коэффициента в момент времени  $t = n$ ,  $\overline{c_{-5,n}}$  – экстраполированное значение.

2. Если  $|e(t_0)| \geq T_s$ , где  $T_s$ - некоторая пороговая функция, то  $t_0$  - момент возникновения спорадической вариации.

3. Ближайший момент времени  $t_1 > t_0 : |e(t_0)| < T_s$ , - момент исчезновения спорадической вариации. Тогда длительность выделенной особенности найдется как  $L_{\text{сп}} = t_1 - t_0$ .

4. Относительная амплитуда выделенной спорадической вариации найдется как  $A_s = \max_{t_0 < t < t_1} e(t)$

Очевидно, реализация описанного алгоритма требует определения порогов  $T_s$ , свидетельствующих о возникновении аномалии в данных. Для определения порогов в работе оценивались ошибки НС на периодах, содержащих спорадические вариации, и на периодах рекуррентного хода, и применялся критерий минимизации апостериорного риска [91]. При выполнении оценок учитывалось влияние краевого эффекта на ошибку НС. Использовалась следующая методика проведения экспериментов по оценке порогов  $T_s$ :

1. Выполнялась оценка погрешности НС на временных периодах, содержащих и не содержащих спорадических особенностей:

$$\bar{e} = \sqrt{\frac{1}{N_T} \sum_n^{N_T} (\overline{c_{-5,n}} - c_{-5,n})^2}, N_T\text{- размер интервала усреднения.}$$

2. На основе преобразования данных вида:  $\forall \Theta \in [1, \frac{\tau_m}{2}] f_{HM}(t_0 + \Theta) = f_{HM}(t_0 - \Theta)$  оценивались ошибки НС на интервале  $[t_0 - \frac{\tau_m}{2}, t_0]$ :  $\delta e = \sqrt{\frac{2}{\tau_m} \sum_i^{\frac{\tau_m}{2}} (e_i - e_{mir,i})^2}$

3. Выполнялось усреднение ошибок отдельно для периодов содержащих спорадические вариации ( $\overline{\delta e}$ ) и для периодов содержащих спорадические вариации  $\overline{\delta e_s}$ .

4. Используя априорные данные, определялся порог  $T_s$ :

$$T_s > \bar{e} + \overline{\delta e} + \overline{\delta e_s}$$

Замечание. Порог  $T_s$  оценивался отдельно для каждой НС и каждой станции наблюдения. Результаты оценок для станций Апатиты (АРТУ) и Мыс Шмидта (CAPS) за 2005-2015 года приведены в таблице 2.12.

Таблица 2.12 — Оценка изменения ошибок сети в окрестности содержащей краевой эффект.

Сеть	$\bar{e}$	$\overline{\delta e}$	$\overline{\delta e_s}$	$T_{smin}$
АРТУ 2005	0,046	0,004	0,0002	0,0502
АРТУ 2007	0,018	0,0013	0,0001	0,0194
АРТУ 2010	0,0076	0,0002	0,00015	0,00795
АРТУ 2014	0,0096	0,0002	0,00015	0,00195
АРТУ 2015	0,0015	0,0013	0,0004	0,0032

Продолжение таблицы 2.12

Сеть	$\bar{e}$	$\overline{\delta e}$	$\overline{\delta e_s}$	$T_{s_{min}}$
CAPS 2005	0,012	0,009	0,005	0,021
CAPS 2007	0,006	0,0014	0,0003	0,0077
CAPS 2010	0,0015	0,0013	0,0004	0,0032
CAPS 2014	0,0025	0,0011	0,0003	0,0039
CAPS 2015	0,0015	0,0013	0,0004	0,0032

Для выделения локальных аномальных эффектов (кратковременных повышений и понижений в КЛ), которые описывает компонента МКЛ  $f_\beta(t) = \sum_k L_k(t) + \sum_g S_g(t)$  (см. соотн. (2.18)), в работе использовалось непрерывное вейвлет-преобразование [35, 36]. Разработанный алгоритм представлен ниже.

Алгоритм выделения локальных аномальных изменений во временном ходе КЛ:

1. Выполняем непрерывное вейвлет-преобразование функции:

$$(W_\Psi f)(b,s) := |s|^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \Psi\left(\frac{t-b}{s}\right) dt, f \in L^2(R), s, b \in R, s \neq 0$$

2. Применяем пороговую функцию  $P_{T_s}$ :

$$P_{T_s}(W_\Psi f_{b,s}) = \begin{cases} W_\Psi f_{b,s}, & \text{если } (W_\Psi f_{b,s} - W_\Psi f_{b,s}^{med,l}) \geq T_s \\ 0, & \text{если } |W_\Psi f_{b,s} - W_\Psi f_{b,s}^{med,l}| < T_s \\ -W_\Psi f_{b,s}, & \text{если } (W_\Psi f_{b,s} - W_\Psi f_{b,s}^{med,l}) < -T_s \end{cases},$$

где  $W_\Psi f_{b,s}^{med,l}$  - медианное значение, рассчитанное в скользящем временном окне длины  $l$ .  $T_s = U * St_s^l$  - пороговая функция,  $St_s^l = \sqrt{\frac{1}{l-1} \sum_{k=1}^l (W_\Psi f_{b,s} - \overline{W_\Psi f_{b,s}})^2}$  - стандартное отклонение, рассчитанное в скользящем временном окне длины  $l$ ,  $\overline{W_\Psi f_{b,s}}$  - среднее значение,  $U$  - пороговый коэффициент.

3. Оценка интенсивности аномалий:  $Y(t) = \sum_s P_{T_s}(W_\Psi f_{b,s})$ , которая в случае локального повышения КЛ будет положительной, а в случае локального понижения КЛ отрицательной.

4. Момент возникновения аномалии  $t_k$  на масштабе  $s_0$  определяется как:  $t_k = b_0$ , если  $|W_\Psi f_{b_0,s_0} - W_\Psi f_{b_0,s_0}^{med,l}| \geq T_{s_0}^l$

5. Длительность аномалии на масштабе  $s_0$  определяется как  $L_{s_0} = t_j - t_k : \forall b_i \in \{t_1, t_2\}, t_j > t_k : |W_\Psi f_{b_i,s_0} - W_\Psi f_{b_i,s_0}^{med,l}| \geq T_{s_0}^l$

Результаты по оценке параметров алгоритма приведены в работах [70, 71, 95, 96, 97].

### 2.3.4 Результаты экспериментов по обработке данных космических лучей

Для анализа динамики КЛ в работе использованы данные станций северного полушария Kiel, Oulu, Apty, Caps, Mgdn, Athn, Mosc, и южного полушария Kingston, Mcmd. Для оценки геоэффективности параметров межпланетного пространства использовались данные со

спутника ACE (<http://www.srl.caltech.edu/ACE/>) (скорость солнечного ветра, параметры межпланетного магнитного поля (ММП)). Оценка состояния магнитосферы выполнялась с использованием Dst индекса (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst/dir/>).

На рис.2.21,2.22,2.23,2.24 на примере событий 7 сентября 2015 и 5 апреля 2010, приведены результаты применения описанного выше подхода и реализованных на его основе алгоритмов анализа данных космических лучей. В более расширенном виде результаты экспериментальных исследований представлены в работах [70, 86, 92, 93, 94, 96, 97].

Первая анализируемая геомагнитная буря зарегистрирована примерно в 13:00 UT 7 сентября 2015 (рис 2.21 и 2.22). Скорость солнечного ветра достигла значения 700 км/с,  $B_z$  компонента ММП была отрицательной в течение почти 12 часов. Анализ результатов обработки (см. рисунки 2.21.c,d,f и 2.22.c,d,f) показывает, что на анализируемых станциях до начала магнитной бури наблюдалось возрастание интенсивности КЛ в области низких и высоких частот (показано красным цветом). На станции Kiel (северное полушарие, рисунок 2.21) возрастание интенсивности КЛ проявилось более четко за несколько минут до начала бури, в остальное время имело менее заметный характер. На станции Kingston (южное полушарие, рисунок 2.22) данный эффект проявился примерно за 12 часов до начала бури, и был локализован в низкочастотном диапазоне. Данное повышение носило кратковременный характер, что, по-видимому, связано с изменением формы магнитосферы и жесткости обрезания на этой станций. Возникшее во время бури Форбуш-понижение (показано синим цветом) наблюдалось на станции Kiel на несколько часов раньше, и достигло максимума примерно в 03:00UT 7 сентября. На станции Kingston данный эффект проявился позже, около 06:00 UT, но имел большую амплитуду. На обеих анализируемых станциях в период Форбуш понижения ошибки НС возросли существенно выше порога  $T_s$  (более чем в 5 раз), но на станции Kingston событие имело более яркий и продолжительный характер. В период аномальных изменений хода КЛ Dst индекс имел отрицательные значения, что характеризует понижение вариаций геомагнитного поля (относительно характерного уровня), по-видимому, связанное с возрастанием энергии в магнитосфере.

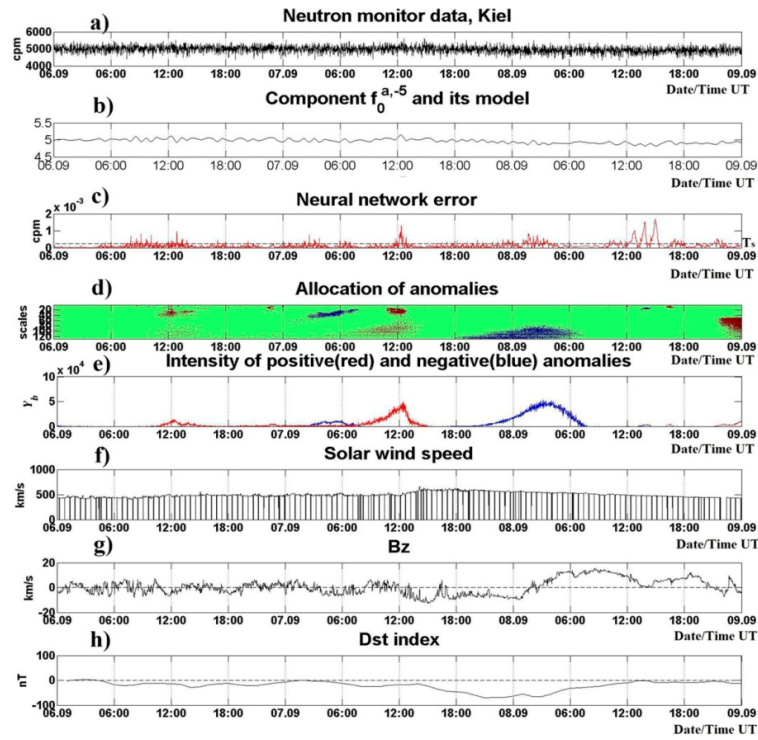


Рисунок 2.21 — Анализ вариаций космических лучей за период 6-8 сентября 2015 г, станция Киль.

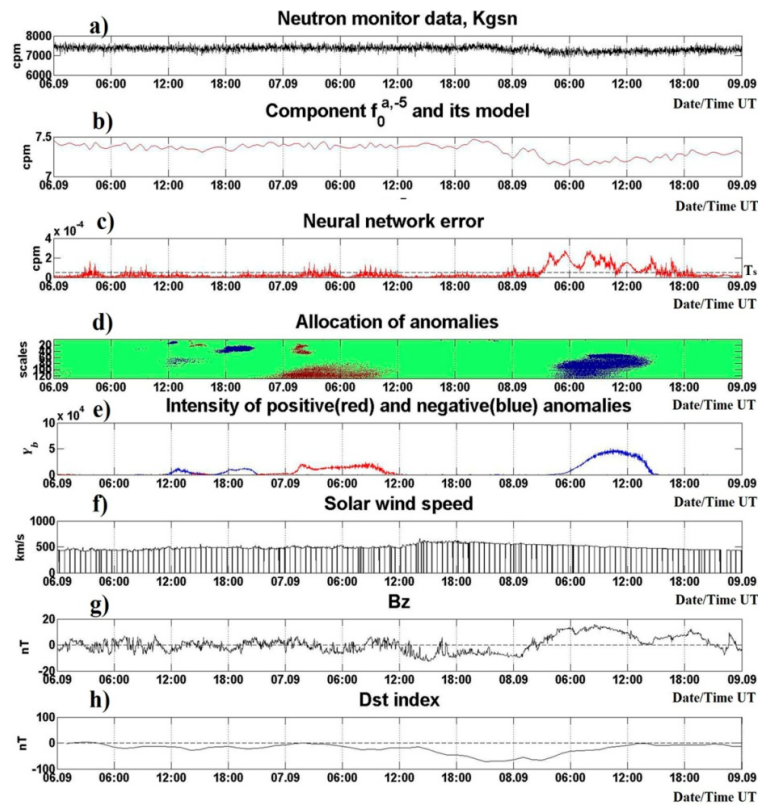


Рисунок 2.22 — Анализ вариаций космических лучей за период 6-8 сентября 2015 г, станция Кингстон.

Вторая анализируемая магнитная буря была зарегистрирована на Земле 5 апреля 2010 г. в 08.26 UT, как внезапное начало SC магнитной бури (рис.2.23 и 2.24). Как показывает анализ результатов обработки, представленных на рис.2.23.c,d,f и 2.24.c,d,f, примерно в 8:00 UT 4 апреля, за сутки до прихода ударной волны, на обеих анализируемых станциях наблюдалось повышение интенсивности КЛ. На обеих станциях данный эффект имел постепенное смещение в область высоких частот, что, возможно, связано с ускорением частиц по мере приближения возмущения. На станции Оулу (северное полушарие, рисунок 2.23), максимум возрастания интенсивности КЛ наблюдался около 4:00 UT 5 апреля, на станции Kingston около 0:00 UT 5 апреля. Форбуш-понижение на обеих станциях наблюдается около 12:00 UT (ошибки НС на обеих станциях превысили пороговое значение  $T_s$  в несколько десятков раз).

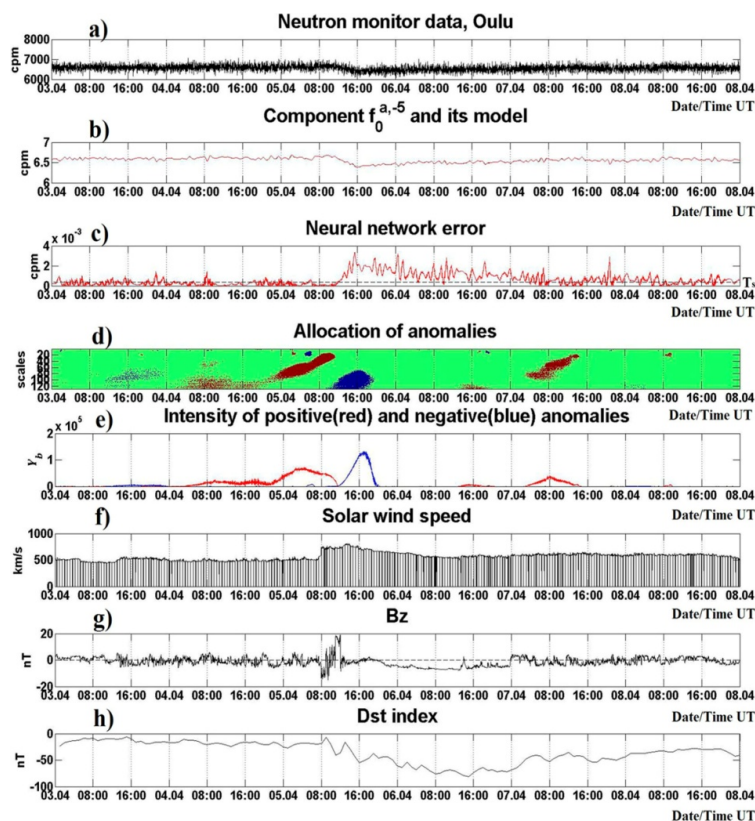


Рисунок 2.23 — Анализ вариаций космических лучей за период 3-8 апреля 2010 г, станция Оулу. .

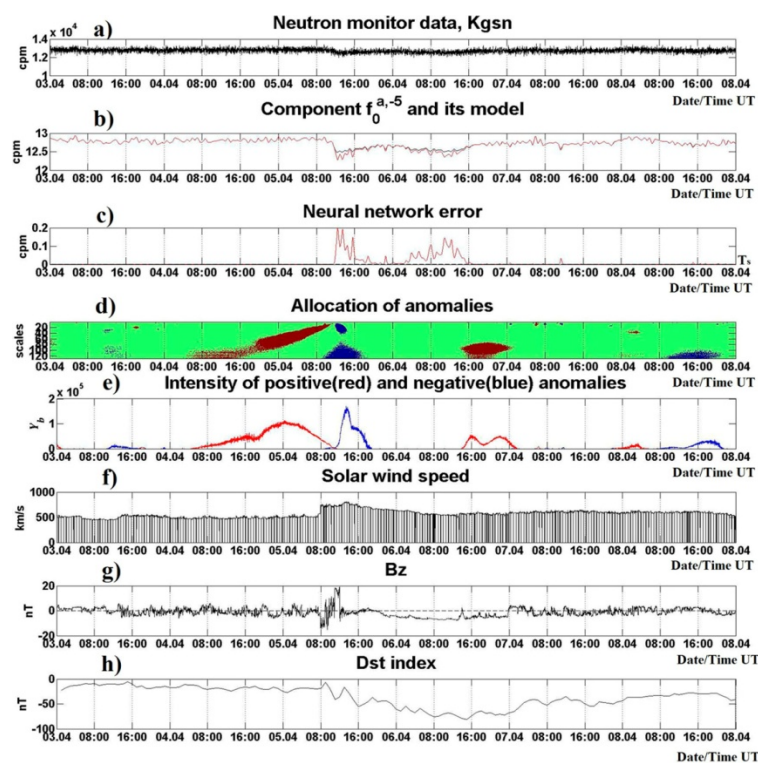


Рисунок 2.24 — Анализ вариаций космических лучей за период 3-8 апреля 2010 г, станция Кингстон.

## Выводы

Оценки предлагаемого метода анализа вариаций космических лучей показали его высокую чувствительность и эффективность. На основе обработки данных в периоды повышенной солнечной и геомагнитной активности подтвержден факт возможного аномального возрастания интенсивности КЛ (эффект предповышения КЛ) за несколько часов до начала геомагнитных бурь. Подобные предповышения КЛ ранее показаны в работах [92, 93, 94, 95, 96, 97], а также отмечены авторами [80, 79, 98]. Данные эффекты могут использоваться в качестве предвестников сильных геомагнитных бурь (являться дополнительным фактором) в задаче прогноза космической погоды, решение которой не является на сегодняшний момент удовлетворительным [99, 100, 101]. Результаты работы также показывают эффективность предлагаемого подхода и разработанных на его основе алгоритмов для выделения подобных эффектов.

## 2.4 Задача прогноза космической погоды

Основной целью исследования являлось создание методов изучения нестационарных процессов в магнитосферно-ионосферной системе по данным геофизического мониторинга, а также на их основе разработка алгоритмов анализа данных и выделения эффектов солнечного происхождения, характеризующих аномальные процессы в околоземном космическом пространстве. Как отмечено выше, состояние магнитосферно-ионосферной системы является важным фактором космической погоды, что определяет большой практический интерес данного иссле-



дования. Особенно важны наблюдения в высокоширотных (в число которых входят анализируемые станции ИКИР ДВО РАН - Магадан и Мыс Шмидта) и приэкваториальных областях, где прогноз космической погоды весьма важен для надежной работы технической инфраструктуры региона. В настоящее время на создание методов анализа данных с приложением в задачах космической погоды направлены усилия ученых и научных групп во многих странах мира. Неполные априорные знания о динамике магнитосферных токовых систем, ограниченный объем получаемой оперативной информации, а также наличие шумов, возможные аппаратные сбои др., безусловно, делает данную задачу весьма сложной и требует применения комплекса методов и технологий. В данном исследовании основные усилия были направлены:

- на изучение динамики ионосферы в периоды повышенной солнечной активности, создание эффективных методов и алгоритмов выделения аномальных процессов в ионосфере, формирующихся в периоды солнечных вспышек и геомагнитных бурь;

- на создание методов и вычислительных алгоритмов анализа магнитных данных и выделения аномальных возрастных интенсивности геомагнитных возмущений, наблюдаемых накануне магнитных бурь;

- на изучение динамики вариаций космических лучей, наблюдения которых играют важную роль при проведении исследований, связанных с мониторингом и прогнозом космической погоды. Особое внимание уделялось созданию методов анализа данных и оперативного выделения аномальных изменений в космических лучах (предповышений и предпонижений интенсивности космических лучей (методы анализа данных космических лучей описаны в работах [14, 70, 86, 92]).

Ниже представлены результаты применения разработанных авторами и описанных в книге методов в периоды экстремальных солнечных событий и геомагнитных бурь.

#### **2.4.1 Совместный анализ ионосферных и магнитных данных**

Представлены результаты обработки данных в периоды сильных магнитных бурь 2010 - 2015 гг. Первая анализируемая магнитная буря, произошедшая 3 августа 2010 г., на анализируемых станциях Новосибирск и Паратунка (Камчатка) была зарегистрирована в период с 18:40 - 18:50 UT (рис. 2.25). По результатам обработки магнитных данных наибольшие возмущения геомагнитного поля наблюдались 4 августа в период с 11:25 по 23:00 по UT (рис. 2.25 б,в,и,к). Максимальные значения интенсивности возмущений зафиксированы одновременно на станциях 4 августа в 11:30 по UT (местное время: Новосибирск 18:30, Паратунка (Камчатка) 23:30). Накануне события в период 02.08.2010-03.08.2010 (анализировались станции (Томск) и Паратунка (Камчатка)) наблюдались аномальные возрастания в ионосферных параметрах (положительная фаза ионосферной бури, показана на рис. 2.25 г,л красным цветом). Максимум ионосферных аномалий пришелся на утренние и дневные часы LT (рис. 2.25 д,м). Во время магнитной бури концентрация электронов в ионосфере существенно понизилась и возникла отрицательная фаза ионосферной бури (показана на рис. 2.25 г,л синим цветом). Результаты

моделирования ионосферных параметров (рис. 2.25 е,ж,н,о использовались методы, описанные в п. 2.2.2) подтверждают крупномасштабные аномальные изменения в ионосфере в период события.

В следующий анализируемый период 03.03 - 14.03 2012 произошли три магнитные бури (рис. 2.26). На анализируемой станции Паратунка (Камчатка) была зарегистрирована продолжительная магнитная буря 7 марта в 07:20 (от вспышки класса X1.1 5 марта), непродолжительная магнитная буря 9 марта в 02:08 по UT (от вспышек класса X5.4 и X1.3 7 марта) и непродолжительная магнитная буря 12 марта в 10:20 по UT (с приходом ускоренного потока от коронального выброса 9 марта, произошедшего вместе со вспышкой M6.3.) (рис. 2.26). Наиболее сильные геомагнитные возмущения возникали 7-8 марта преимущественно в ночное время LT (рис. 2.26 б,в). По результатам обработки ионосферных данных 5-7 марта 2012 года в ионосферных параметрах наблюдались аномальные возрастания (положительная фаза ионосферной бури, показана на рис. 2.26 д красным цветом). Наибольшей интенсивности ионосферная аномалия достигла 6 марта в ночное время LT. Через несколько часов произошло существенное понижение электронной концентрации, и возникла отрицательная фаза ионосферной бури (показана на рис. 2.26 д синим цветом) длительностью около суток, с максимумом интенсивности в дневное время. Результаты моделирования данных (рис. 2.26 ж,з моделирование параметров ионосферы выполнялось на основе методов, представленных в п. 2.2.2) подтверждают аномальное поведение ионосферы во время трех анализируемых событий, наибольшее отклонение от фона наблюдалось 8 марта и характеризовалось пониженной электронной концентрацией.

Третье анализируемое событие - магнитная буря 17 марта 2013г (рис. 2.27). В вариациях геомагнитного поля на анализируемых станциях Якутск (г. Якутск) и Паратунка (Камчатка) 14 - 15 марта наблюдались слабые геомагнитные возмущения (рис. 2.27 б,в,и,к). Магнитная буря была зарегистрирована 17 марта в 07:05 по UT (от CME 15 марта). Накануне события 14 марта 2013 года на станциях наблюдались аномальные возрастания в ионосферных параметрах (положительная фаза ионосферной бури, показана на рис. 2.27 г,л красным цветом). Максимальные значения интенсивности ионосферных возмущений зарегистрированы в дневное время LT: 16 марта на Камчатке (рис. 2.27 м) и 17 марта в Якутске (рис. 2.27 д). В период наиболее сильных геомагнитных возмущений 17 марта в ночное время LT в анализируемых районах произошло существенное понижение электронной концентрации, и возникла отрицательная фаза ионосферной бури (показана на рис. 2.27 г,л синим цветом), продолжительность аномалии составила около суток с максимумами интенсивности в ночное время LT в Якутске (рис. 2.27 д,е,ж) и в дневное время LT на Камчатке (рис. 2.27 и,н,о).

Следующее анализируемое событие 1 июня 2013 г. (см. рис. 2.28) показывает аналогичный, рассмотренным выше событиям, характер поведения ионосферы в возмущенный период. Накануне магнитной бури наблюдается аномальное повышение электронной концентрации, в период события наблюдается существенное понижение концентрации электронов (рис. 2.27 б, в, и, к). Результаты моделирования (рис. 2.28 г, л, применялись методы, описанные в п. 2.2.2) также показывают наличие аномальных процессов в ионосфере накануне и в период события:

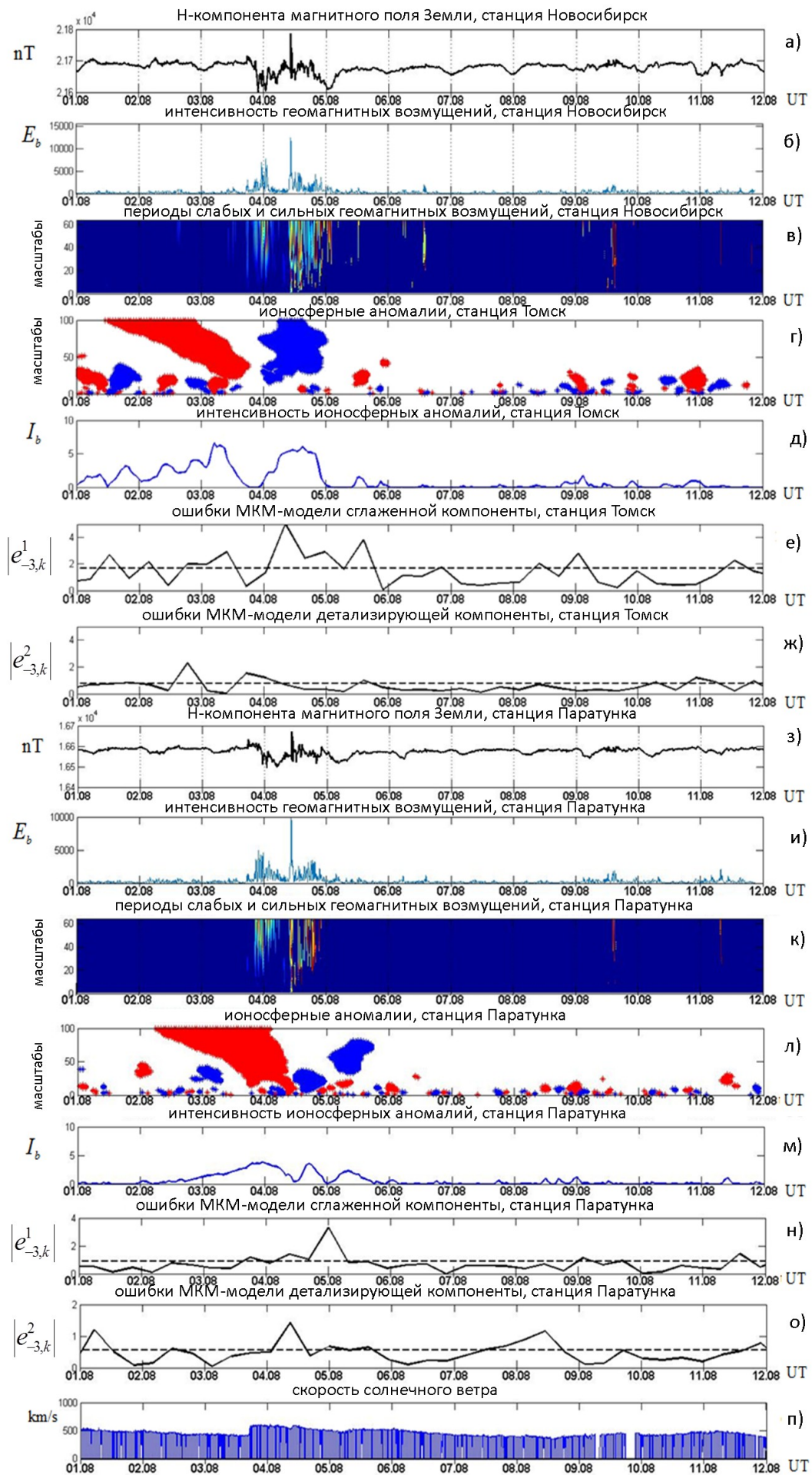


Рисунок 2.25 — Результаты обработки <sup>47</sup> данных за период 01.08 - 11.08 2010.

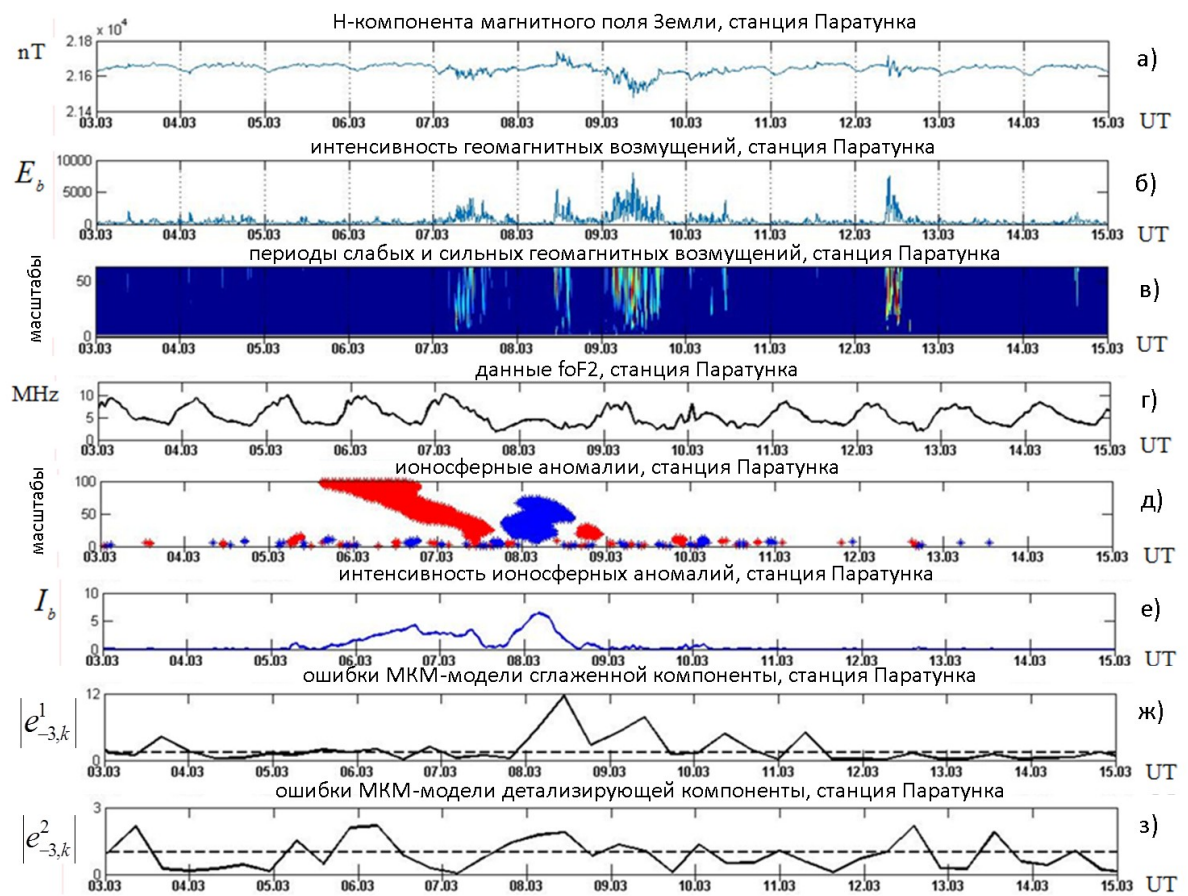


Рисунок 2.26 — Результаты обработки данных за период 03.03 - 14.03 2012.

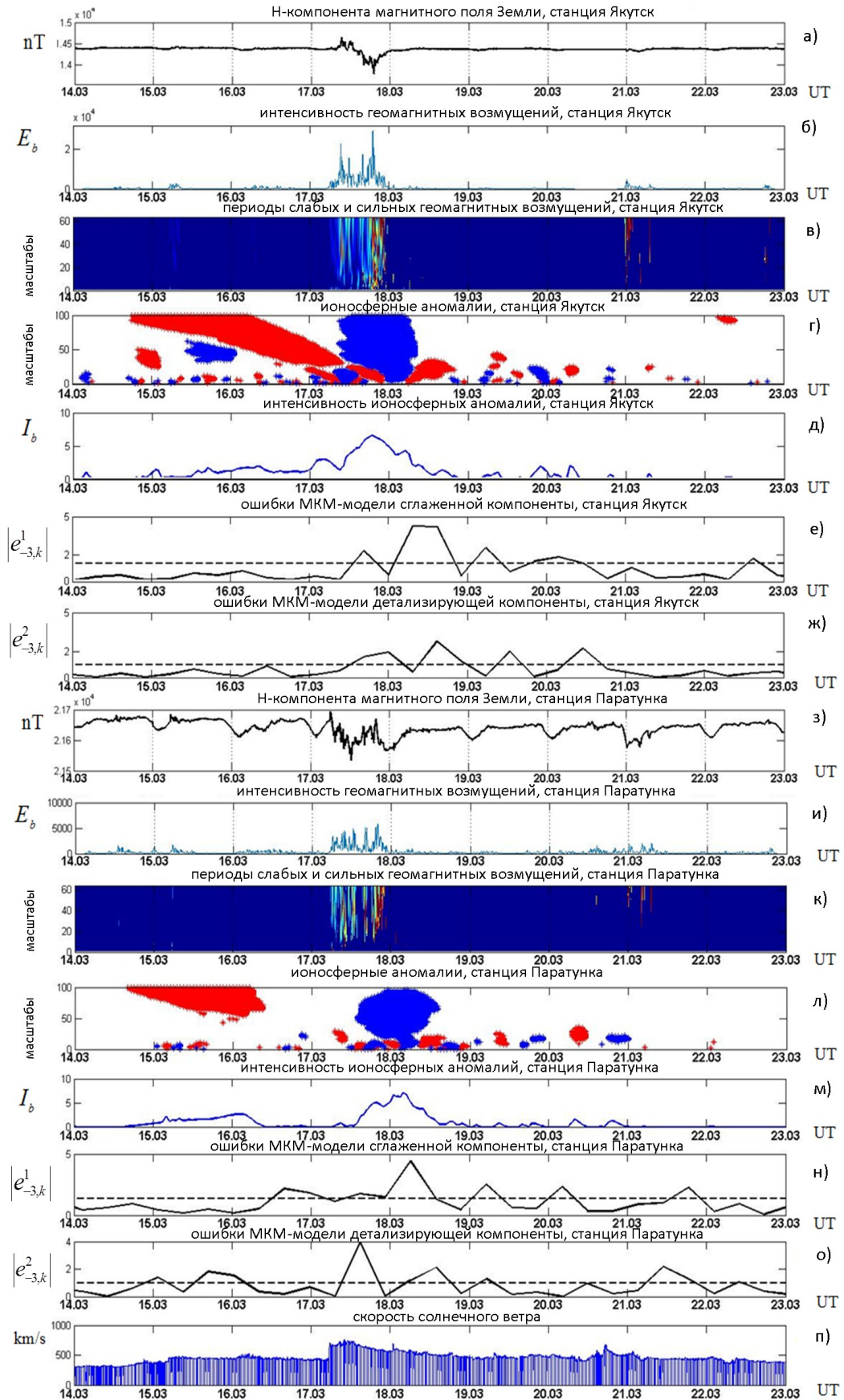


Рисунок 2.27 — Результаты обработки данных за период 14.03 - 22.03 2013.

существенное возрастание ошибок МКМ для станции Паратунка ( $f[2^{-3}t]$  - более 2,5 стандартных отклонений (СО);  $g[2^{-3}t]$  - более 4,3 СО) и для станции Гакона ( $f[2^{-3}t]$  - более 3,4 СО). По данным космической погоды [<http://ipg.geospace.ru/>] ускоренные потоки от выбросов корональной массы (два СМЕ от 27 мая) и от обширной экваториальной корональной дыры вызвали накануне события 31 мая 2013г. увеличение скорости солнечного ветра на 50 км/сек, 1 июня - с 400 до 700 км/сек и 2 июня - до 800 км/сек (см. рис. 2.28 ж, о). Значение Vz компоненты ММП опустилось до -10 нТ в 18 UT 31 мая и до -20 нТ в 00.00 UT 1 июня. На среднеширотных станциях 29 - 31 мая геомагнитное поле было спокойное, 1 июня - умеренно возмущенное; на высокоширотных станциях 29 и 30 мая - спокойное, 31 мая - от умеренно до сильно возмущенного, 1 июня - сильно возмущенное. Постепенное начало магнитной бури зарегистрировано 1 июня в 00.00 UT [<http://ipg.geospace.ru/>]. Сопоставление времени возникновения, длительности и динамики интенсивности аномалии с данными космической погоды, а также с учетом того, что в период с 30 мая по 1 июня интегральная СА была низкая [<http://ipg.geospace.ru/>], позволяет предположить связь выделенной ионосферной аномалии с приближающейся магнитной бурей.

Аналогичный характер поведения ионосферы также наблюдался в периоды магнитных бурь 5 апреля и 3 августа 2010 г. (событие 5 апреля рассмотрено в работе [41], событие 3 августа - в работе [45]), 7 марта 2012г. [45], 17 марта и 2 октября 2013г. (события рассмотрены в работах [43, 45]), 19 февраля и 4 ноября 2014 [45]. Накануне событий концентрация электронов повышалась, в периоды магнитных бурь, а в некоторых случаях на фазе восстановления, наблюдалось существенное и длительное по времени понижение электронной концентрации. Результаты обработки ионосферных данных в периоды рассмотренных событий приведены в таблице 2.13.

Таблица 2.13 — Результаты обработки ионосферных данных станции Паратунка.

Дата события / время начала (UT) / характер события: ПН - постепенное начало, РН - резкое начало / сила бури: У-умеренная, С-сильная	СА	Наличие (отсутствие) аномалии накануне бури: П-положит., О - отриц. / длительность / за сколько часов до начала бури выделена	Наличие (отсутствие) аномалии в период бури: П-положит., О - отриц. / длительность	Порог U
5.04.2010 / 8.26 / РН/ С	низ.	П/ 17 ч / 16 ч до	О/29 ч	2
3.08.2010/18.40-18.50/ ПН / С	низ.	П / 38 ч/ 19 ч до	О/10 ч	2
7.03.2012 / 05.28-05.45 / ПН / С	выс	П/ 37 ч/ 12 ч до	О/ 17 ч	2.5
17.03.2013 / 06.05/ РН/ С	выс	П/ 31 ч / 27 ч до	О/22 ч	2.5
1.06.2013 / 00.40/ ПН / С	выс	П/ 42 ч / 4 ч до	О/ 25 ч	2.5

Продолжение таблицы 2.13

Дата события / время начала (UT) / характер события: ПН - постепенное начало, РН - резкое начало / сила бури: У-умеренная, С-сильная	СА	Наличие (отсутствие) аномалии накануне бури: П-положит., О - отриц. / длительность / за сколько часов до начала бури выделена	Наличие (отсутствие) аномалии в период бури: П-положит., О - отриц. / длительность	Порог U
2.10.2013 / 01.52/ РН/ У	выс	П/ 38 ч /27 ч до	О/ 20 ч	2.5
8.12.2013/1.00-2.20/ПН / С	выс	О/ 28 ч / 14 ч до	П/14 ч	2.5
14.12.2013 / 15.00-16.00 / ПН / У	выс	—	П /21 ч	2.5
19.02.2014 / 03.50/ ПН / С	выс	П / 23 ч / 10 ч до	О /14 ч	2.5
11.09.2014/23.30/ПН/ С	выс	—	О/ 31 ч	2.5
04.11.2014/10.10/РН/ У	выс	П/ 25 ч / 14 ч до	О/ 22 ч	2.5

#### 2.4.2 Результаты совместной обработки данных космических лучей и ионосферных параметров

В обработке использовались минутные данные нейтронных мониторов станций Кингстон (Австралия) и часовые ионосферные данные станции Паратунка (Россия) (используемые методы и алгоритмы анализа данных космических лучей представлены в работах [14, 70, 86, 95].

На рис. 2.29 показаны результаты обработки данных в период 20-23 января 2015 года. По данным космической погоды [<http://ipg.geospace.ru/>] 21 января из-за ускоренного потока от корональной дыры скорость солнечного ветра увеличилась до 550 км/сек, южная компонента ММП опустилась до  $B_z = -15$  нТ, 22 января скорость солнечного ветра оставалась в пределах 550 - 400 км/сек,  $B_z = -10$  нТ. Анализ данных космических лучей показывает возникновение положительной аномалии за 20 часов до начала магнитной бури, которая зарегистрирована в период 21 января 2015 г. (аномалия показана на рис. 2.29 е красным цветом). За несколько часов до начала бури уровень космических лучей понизился (аномалия показана на рис 2.29 е синим цветом). За несколько часов до начала магнитной бури в ионосферных параметрах наблюдается возникновение положительной аномалии (показано на рис 2.29 г, h красным цветом). Максимум положительной аномалии приходится примерно на 05.00 UT 22 января.

На следующем рисунке (рис. 2.30) показаны результаты обработки данных в период 15-18 февраля 2015 г. В этот период 17 февраля 2015 г. произошла сильная магнитной бури. Анализ космической погоды [<http://ipg.geospace.ru/>] показывает, что влияние скоростного потока солнечного ветра от коронарной дыры в вечернее время UT 16 февраля привело к снижению Dst индекса до значения -25 нТл. Примерно в 6:00 UT 17 февраля скорость потока



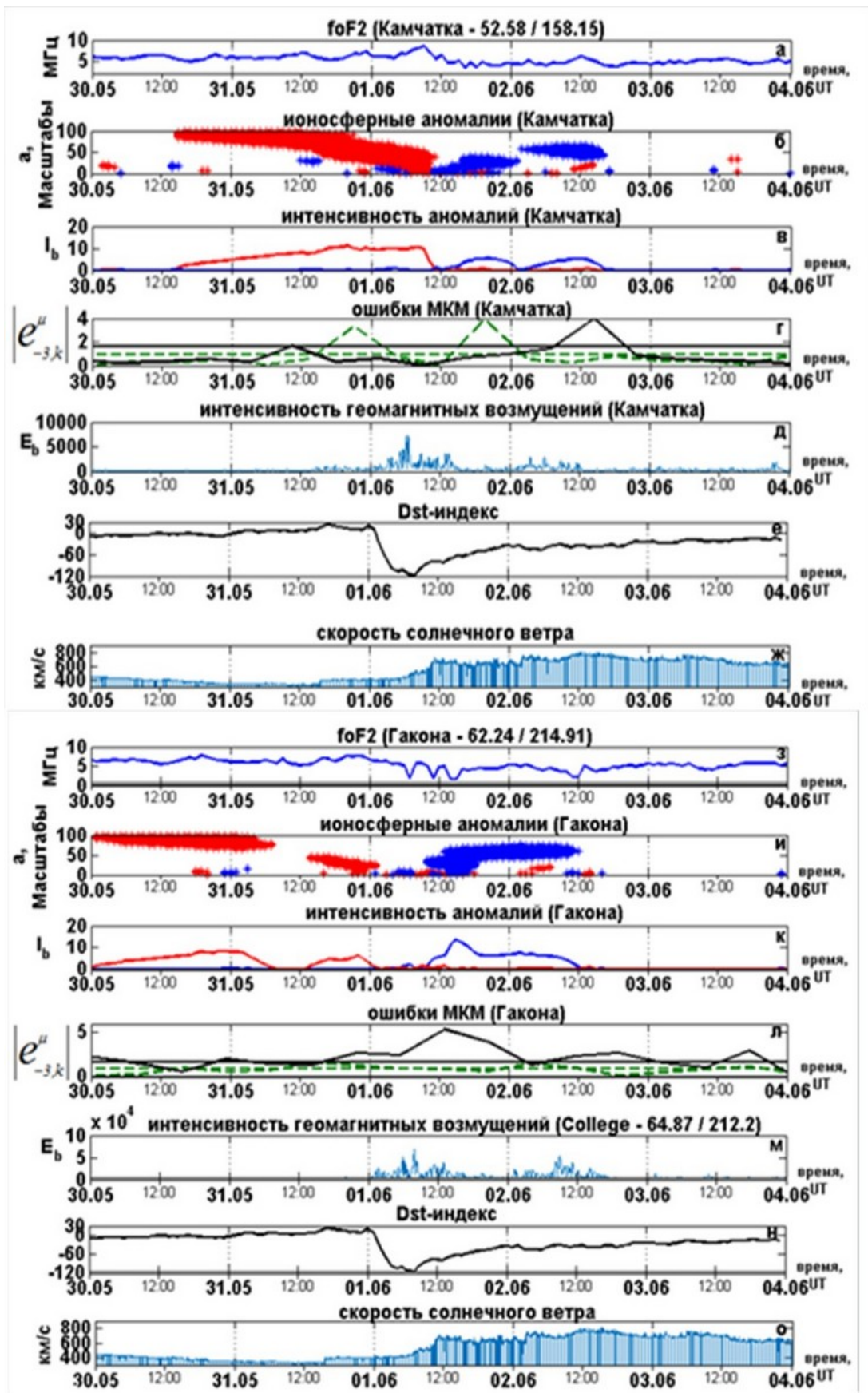


Рисунок 2.28 — Результаты обработки данных за период 30.05 - 03.06 2013г. б), и) - синим цветом показаны отрицательные аномалии, красный - положительные, г), л) - ошибки МКМ сглаженной (черным) и детализирующей (зеленым) компонент и их стандартные отклонения.



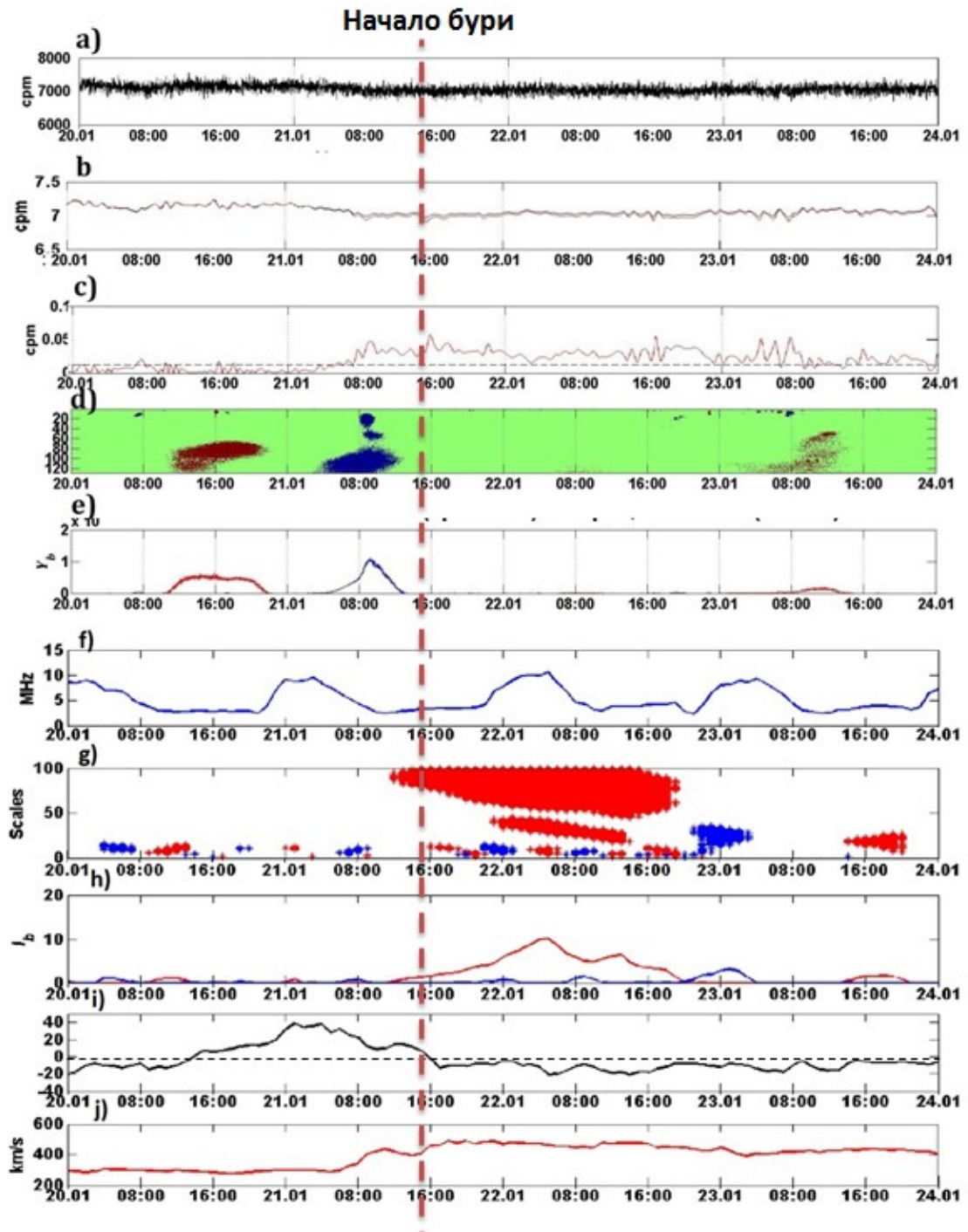


Рисунок 2.29 — Результаты обработки данных за период 20-23 января 2015 г. а) - Данные нейтронного монитора станция Kingston; б) - спокойная компонента данных нейтронного монитора и её модель; с) - ошибка нейронной сети; д) - выделенные положительные (красным) и отрицательные (синим) аномалии; е) - интенсивность положительных (красным) и отрицательных (синим) аномалий; ф) - ионосферные данные; г) - выделенные ионосферные аномалии; г) - интенсивность ионосферных аномалий; и) - индекс DST; ж) - скорость солнечного ветра.

солнечного ветра возросла до 380 км/с и продолжала расти до вечера UT 17 февраля. В этот период Dst-индекс продолжал снижаться до -50 нТл. Результаты анализа ионосферных параметров показывают возникновение крупномасштабной положительной аномалии (положительная ионосферная буря), возникшей накануне бури (рис. 2.30 f,g, показано красным цветом). Максимальных значений интенсивность ионосферной аномалии достигла в 04.00 UT17 февраля 2015 года. В конце суток 18 февраля электронная концентрация ионосферы существенно понизилась и возникла отрицательная аномалия (рис. 2.30 f,g, аномалия показана синим цветом). Как отмечено выше, а также по результатам работ [41, 43, 45, 61, 62, 68, 69, 70, 71, 75], подобное поведение ионосферы является характерным в периоды повышенной солнечной активности. Анализ данных космических лучей показывает сильное положительное возрастание интенсивности за 20 часов до начала магнитной бури (рис. 2.30 d, e, показано красным цветом). В момент начала магнитной бури в вариациях космических лучей наблюдается отрицательная аномалия, которая, вероятно, связана с возникновением непродолжительного Форбуш-понижения малой амплитуды.

## **Выводы**

Выполненные исследования подтвердили факт возможного аномального возрастания интенсивности КЛ за несколько часов до начала сильных магнитных бурь. Данные аномальные эффекты могут использоваться в качестве предвестников магнитных бурь (являться дополнительным фактором) в задачах прогноза космической погоды. В момент прихода ударной волны в данных космических лучей зафиксированы понижения интенсивности, характерные для Форбуш-понижений. Анализ ионосферных параметров показал в периоды возрастания интенсивности космических лучей аномальные повышения электронной концентрации. Результаты работ [68, 76, 77, 78] свидетельствуют, о неоднократных наблюдениях данного эффекта в ионосфере. Такие предбуревые аномальные особенности в ионосфере также могут служить сигналом о предстоящей магнитной буре и имеют важное прикладное значение.

## **2.5 Особенности проявления сейсмической и солнечной активности в процессах взаимодействия геофизических полей**

При изучении закономерностей геофизических полей мы должны ясно понимать какие внешние факторы влияют на параметры этих полей. С одной стороны, изменение космической погоды и космического климата затрагивают изменение характеристик во всех геосферных оболочках. С другой стороны, изменение физических характеристик в геосферных оболочках могут быть обусловлены не только космической погодой, но и другими причинами. Отделение одного от другого является важной составляющей исследовательского процесса.

В §2.5.1 рассматриваются особенности годового тренда вертикальной компоненты геомагнитного поля по измерениям на obs. «Паратунка» [102, 103, 104, 105].

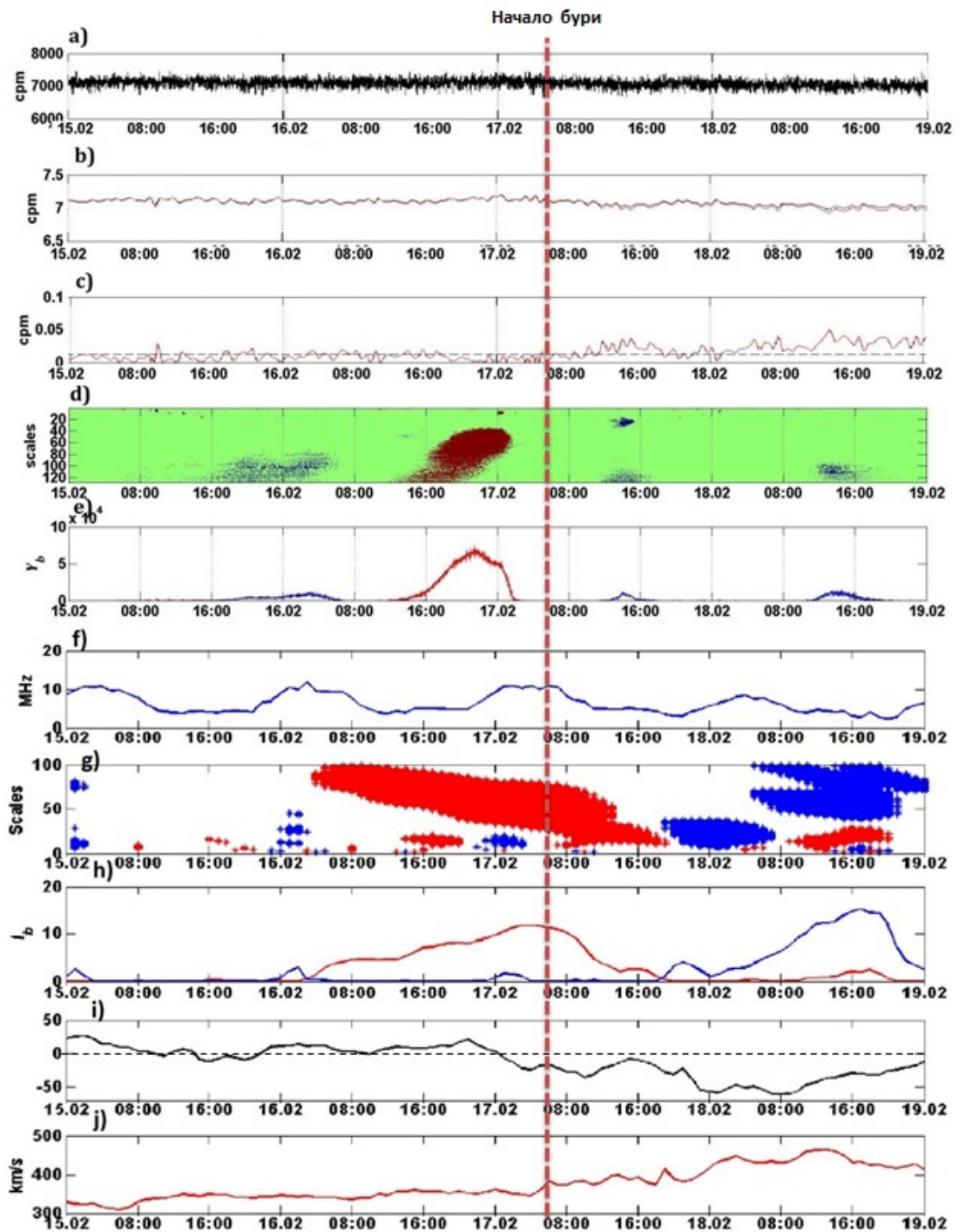


Рисунок 2.30 — Результаты обработки данных за период 15-18 февраля 2015 г. а) - данные нейтронного монитора станция Kingston; б) - спокойная компонента данных нейтронного монитора и её модель; в) - ошибка нейронной сети; д) выделенные положительные (красным) и отрицательные (синим) аномалии; е) - интенсивность положительных (красным) и отрицательных (синим) аномалий; ф) - ионосферные данные; г) - выделенные ионосферные аномалии; г) - выделенные ионосферные аномалии; з) - интенсивность ионосферных аномалий; и) - индекс DST; ж) - скорость солнечного ветра.

В §2.5.2 рассмотрены временные ряды электропроводности литосферы за 5-ти летний период на юге Камчатки [106, 107, 108] с 2001 по 2016 гг. в пунктах Верхняя Паратунка, Тундровый и Шипунский, расположенных на побережье Авачинского залива Камчатки, где по долгосрочному прогнозу ожидается катастрофическое землетрясение. В поведении временных рядов полугодовых значений электропроводности литосферы в большей мере в период с 2012 по 2016 гг проявились изменения в п. Шипунский, который находится вблизи сейсмофокальной зоны. Выявленные изменения электропроводности литосферы связываются с влиянием проводимости зон разломов на п-ове Шипунский, которая, по-видимому, меняется из-за наличия минерализованных растворов при сжатии и растяжении земной коры при геодинамических процессах в зоне субдукции. Изменения электропроводности литосферы из-за влияния проводимости разломов подтверждены данными численного трёхмерного моделирования магнитотеллурического поля.

В §2.5.3 [109, 110] представлен анализ сезонного и годового хода аэроэлектрического поля среднеширотной обсерватории Паратунка на Камчатке за 1997-2016 гг. Наблюдаются устойчивые от года к году сезонные интервалы наибольших и наименьших значений. Показана изменчивость годового тренда аэроэлектрического поля в приземном слое воздуха на обсерватории, находящейся в активном геодинамическом регионе. Большой положительный тренд сменился плавным отрицательным. Это, возможно, связано либо с изменением интенсивности эманации радона в районе обсерватории, либо с изменением вулканической активности на Камчатке.

При интерпретации результатов измерений мы должны быть уверены в их достоверности и качестве приборного парка. Метрологическим исследованиям измерений электрического поля в приземной атмосфере посвящен §2.5.4 [111, 112, 113]. Атмосферное электрическое поле (АЭП) является объектом интенсивных научных исследований. Экспериментальную основу для таких исследований обеспечивают мониторинговые измерения АЭП на обсерваториях, а также специальные наблюдения на временных станциях. Однако, в настоящее время не существует как стандартов для этих измерений, так и международных или национальных центров по сбору данных. Поэтому достоверность полученных результатов на обсерваториях обычно обеспечивается штатными процедурами калибровки и сравнением разнотипных приборов.

В условиях хорошей погоды наблюдается характерный суточный ход напряженности атмосферного электрического поля с максимумом в утреннее время. Ставилась задача выяснить какие процессы в атмосфере вызывают этот максимум. Этому посвящен §2.5.5 [114] Получены статистические оценки параметров эффекта: времени начала, времени максимума и его интенсивности и длительности. Экспериментально показано, что максимум суточного хода напряженности атмосферного электрического поля связан с высотным распределением температуры воздуха. На восходе Солнца в спектрах мощности напряженности электрического поля усиливаются колебания в полосе периодов  $T > 1$  ч. Колебания в полосе периодов 2,0-2,5 ч вызваны удаленными источниками выше динамо-области ионосферы, а колебания в полосе периодов 0,5-1 ч – источниками в нижней атмосфере. Предложен возможный механизм генерации этих

колебаний, связанный с вихревым движением конвективных ячеек, зарождающихся на восходе Солнца в обменном слое атмосферы.

Экстремальные события в различных геофизических оболочках приводят к возникновению аномалий в геофизических полях. В §2.5.6 представлены результаты исследований аномалий в электрических параметрах приземного слоя атмосферы перед землетрясениями.

В §2.5.6 [115] проанализированы данные измерений параметров вертикального зондирования ионосферы, измерений вертикальной компоненты приземного квазистатического атмосферного электрического поля и соответствующих ему величин электропроводности приземного слоя воздуха на комплексной геофизической обсерватории «Паратунка» за период с 28.01.2016 г. по 30.01.2016 г. с целью обнаружения возможных аномалий, предшествующих землетрясению с магнитудой  $M_w = 7.2$ , произошедшему 30.01.2016 г. Большая часть выделенных аномалий может быть связана с процессами подготовки этого землетрясения.

Далее в §2.5.6 [116] представлен анализ аномальных вариаций температуры приземной атмосферы на Камчатке перед сильными Курильскими землетрясениями: 15 ноября 2006 г. и 13 января 2007 г. Показано, что за 7-8 суток перед землетрясениями включается источник тепла, дополнительный к естественному источнику от земной поверхности. Интенсивность его такова, что он последовательно увеличивает температуру и влажность атмосферы, существенно изменяя их регулярный суточный ход. Одновременно на больших высотах с помощью метеорологических спутников были зарегистрированы аномальные потоки уходящего от земли инфракрасного излучения. Полученные результаты в совокупности с результатами ранее исследованных аномальных вариаций других геофизических полей позволяют сделать вывод о том, что дополнительный источник тепловых аномалий в приземной атмосфере находится в коре земли.

Анализ явлений космической погоды по наблюдениям в северо-восточном регионе России представлен в §2.5.7 [117]. Рассмотрены геофизические эффекты солнечных событий 2014 по системе наблюдений северо-востока России. Выявлены эффекты возбуждения волн в атмосферном электричестве приземного слоя воздуха в результате внезапного начала магнитной бури. Накануне событий 4 ноября 2014 г. и 27 августа 2014 года в ионосфере выделены положительные аномалии, которые возникали независимо от местного времени на фоне спокойного и слабовозмущенного геомагнитного поля. Продолжительность таких предбуревых повышений составляла от несколько часов до полутора суток. Накануне магнитной бури 11 сентября кратковременная положительная аномалия в ионосфере возникла в период локального повышения геомагнитной активности.

### **2.5.1 Годовой ход вертикальной компоненты геомагнитного поля на Камчатке**

Исследование вековых вариаций геомагнитного поля, измеренных на обсерваториях северо-западной части Тихого океана, позволяет судить об особенностях геодинамических про-

цессов этого региона. Для этих целей были выбраны данные векового хода геомагнитного поля в обсерваториях, расположенных на материке (Иркутск), на островах Хонсю (Какиока), Хоккайдо (Мамамбецу) и п-ове Камчатка (Паратунка) (рис. 2.31).

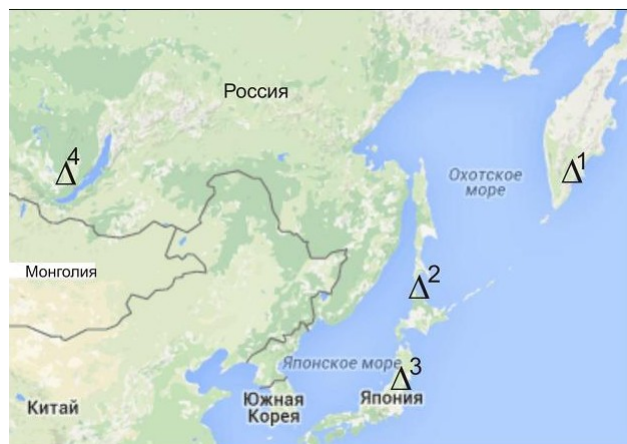


Рисунок 2.31 — Схема расположения геомагнитных обсерваторий. 1-Паратунка; 2-Мамамбецу; 3-Какиока; 4-Патроны (Иркутск)

В этих обсерваториях имеются непрерывные наблюдения геомагнитного поля на протяжении многих лет (<http://intermagnet.org/imos>). По временным рядам выделены синхронные интервалы наблюдений с 1968 по 2014 гг. Анализ выполнен по трём составляющим геомагнитного поля  $H$ ,  $D$ ,  $Z$ . При этом основное внимание уделено компоненте  $Z$ , которая более чувствительна к геоэлектрическим неоднородностям среды. Сравнительный анализ вековых ходов вертикальной составляющей в obs. Паратунка, Какиока, Мамамбецу и Иркутск свидетельствует о следующем. В поведении вековых ходов в период с 1968 до 2001 гг. на всех четырёх обсерваториях выражены подобные вариации (рис. 2.32). Интенсивность вариаций составляет первые сотни нТл. Важно отметить, что с 2001 по 2014 гг. в поведении годовых ходов только в obs. Иркутск, Какиоки и Мамамбецу проявились вариация с интенсивностью около 100 нТл. Однако в obs. Паратунка данная вариация практически не выражена. Возникает вопрос, почему вековой ход в obs. Паратунка отличается за последние 14 лет от вековых ходов в obs. Патроны, Какиока и Мамамбецу.

Обратимся к возможной природе вариаций векового хода. В поведении магнитного поля проявляются вековые вариации, связанные с изменением внешних ионосферных, магнитосферных, коровых и магнитогидродинамических источников, расположенных в жидкой части ядра [118, 119]. Изменения поля коровых источников невелики и составляют первые нТл. Они наблюдаются в основном в сейсмоактивных регионах. Вековые вариации внешних источников по амплитуде оцениваются в первые десятки нТл. Они по интенсивности существенно меньше вариаций магнитогидродинамических источников. Ранее предполагалось, что вариации с периодами 11 лет и менее могут существовать у глубинных источников, но из-за экранирующего влияния верхней хорошо проводящей мантии не проникают к поверхности Земли. Вариации с такими периодами связаны только с внешними источниками. Также механизмы магнитогидродинами-

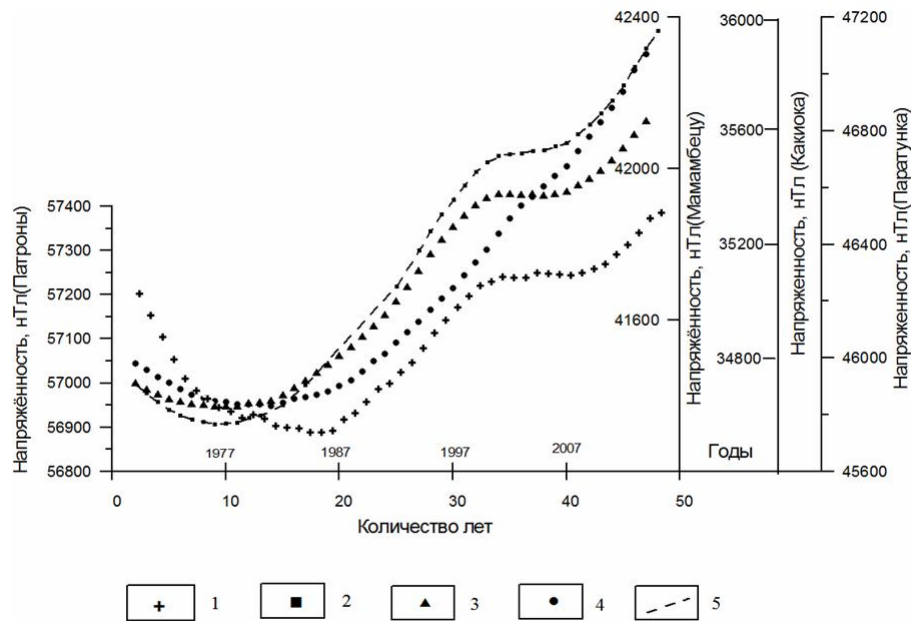


Рисунок 2.32 — Вековые хода напряжённости вертикальной составляющей геомагнитного поля в обсерваториях Паратунка (1), Мамамбецу (2), Какиока (3); Патроны (4). 5- отсутствие значений напряжённости поля в обсерватории Мамамбецу

ческой генерации поля не допускали возникновение вариаций с периодами менее 10000–100000 лет. Однако, Брагинский [120] на основе работ Карри [121] доказывает, что вариации с периодами от 4 до 33 лет могут быть связаны с турбулентными пульсациями в жидкой части ядра. Согласно [121], такие вариации недипольного поля могут иметь региональный характер и проявляться не обязательно на всей поверхности Земли.

Исходя из этого, можно полагать, что вариации интенсивностью в первые сотни нТл в вековых ходах в обсерваториях Паратунка, Патроны, Какиока и Мамамбецу являются региональными. Вариации, как было отмечено раньше, подобны в период с 1968 по 2001гг, а в последующий период вариация в obs. Паратунка практически не проявилась.

Предполагается, что выявленные особенности могут быть обусловлены изменением физического состояния мантии. Информацию о динамике физических свойств пород на больших глубинах (400–700км) дают данные многолетнего сейсмического мониторинга по мировой и региональным сетям сейсмологических станций. Сейсмичность рассмотрена на расстояниях от обсерваторий соизмеримых с расстояниями до гипоцентров сильных глубоких землетрясений, которые могли оказать существенное влияние на физическое состояние верхней мантии. Анализ показал, что в районах Японии и Байкальского рифта сильных землетрясений ( $M \geq 6$ ) на указанных глубинах за последние 35 лет не было. Сильные глубокие землетрясения ( $H \geq 600$  км) в рассматриваемый период произошли только в районе Южной Камчатки. Они сопровождались многочисленными афтершоками на глубинах 400–700км (рис. 2.33). Сильнейшим из них является Охотоморское землетрясение на глубине около 630 км с магнитудой  $M_w = 8.3$  (Global GMT),

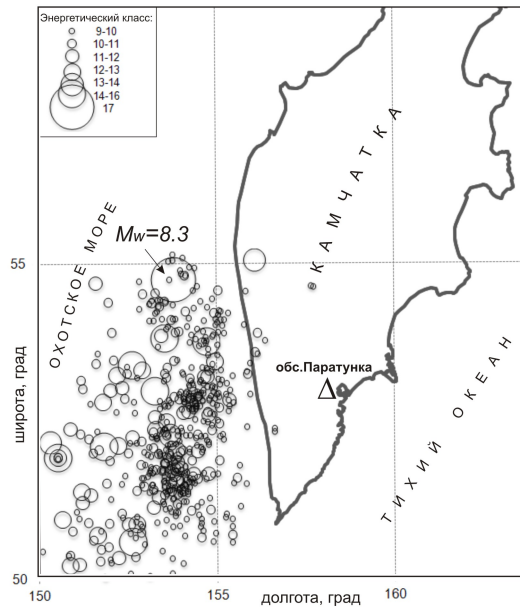


Рисунок 2.33 — Схема расположения эпицентров глубоких землетрясений (400–700 км) в районе Южной Камчатки за период с 1968 по 2015 гг. Треугольником на схеме Камчатки обозначено местоположение геомагнитной обсерватории Паратунка

По данным регионального каталога Камчатского филиала Геофизической службы РАН энергетический класс землетрясения  $Ks = 17$ . Эпицентр его располагался на расстоянии примерно 100 км к западу от побережья Южной Камчатки. Землетрясение ощущалось на расстояниях до 9500 км [122].

Представление о динамике сейсмичности на глубинах 400–700 км даёт гистограмма землетрясений с  $K > 9$ , на которой видно, что усиление сейсмичности начинается примерно с 2001 года (рис. 2.34). С этого же времени отмечается расхождение вековых ходов вертикального геомагнитного поля в обсерваториях. Паратунка и Патроны, Какиока, Мамамбецу. Как мы уже отмечали, данное расхождение обусловлено тем, что в obs. Паратунка вариация в 2001–2014 гг практически не проявилась в вековом ходе.

О возможной природе аномального поведения векового хода в obs. Паратунка судить крайне трудно, так как крайне мало сведений о точном механизме проводимости в мантии. По данным сейсмической томографии зона перехода от верхней к нижней мантии в районе Южной Камчатки отличается пониженной скоростью сейсмических волн по сравнению с Японскими островами [123, 124]. Можно предположить следующее. В результате землетрясений на глубинах 400–700 км выделилась энергия, изменились температура и давление. Это привело к усилению физико - химических процессов пород в зоне перехода от верхней к нижней мантии. Последние исследования в области физики минералов указывают на возможность глубинной дегидратации слэба в переходной зоне мантии и выделения водосодержащего флюида [125].

Согласно [126, 127], удельное электрическое сопротивление пород на глубинах 400–700 км составляет 100–5 Ом·м, соответственно. Предполагается, что жидкая фаза имеет электриче-



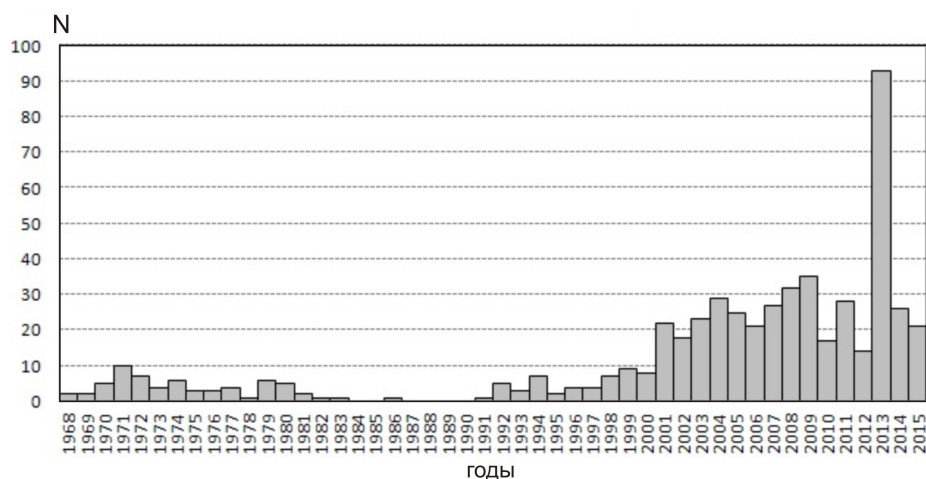


Рисунок 2.34 — Гистограмма глубоких (400–700 км) землетрясений энергетического класса  $K = 9–17$  в районе Южной Камчатки (см. рис. 2.33)

ское сопротивление сотые – тысячные доли Ом·м [128]. Появление жидкой фазы в гальванически связанном состоянии даже в объёме сотых долей процента приведёт к сильному увеличению электропроводности пород [129, 130]. Интегральная проводимость толщи пород на глубинах 400–700 км возрастёт на несколько порядков. Появление такой проводящей глубинной неоднородности в районе Южной Камчатки, по-видимому, оказало сильное влияние на поведение вековой вариации геомагнитного поля. Можно полагать, что вековые вариации геомагнитного поля содержат информацию о динамике электропроводности мантии.

### 2.5.2 Годовой ход электропроводности литосферы на Камчатке

Изучение длительных трендов физических характеристик в одной среде помогает понять характер связей между всеми геосферными оболочками. В данном параграфе представлены результаты изучения динамики электропроводности литосферы на Тихоокеанском побережье Камчатки, где по долгосрочному прогнозу ожидается катастрофическое землетрясение с  $M \geq 8.5$  [131]. Здесь с 2001 года осуществляется мониторинг электропроводности литосферы в пунктах Верхняя Паратунка, Тундровый, Шипунский на побережье Авачинского залива (рис. 2.35). Пункт Шипунский приближен к зоне субдукции, где в большей мере проявились изменения глубинной электропроводности в последние годы. Полученные результаты и возможная природа изменения электропроводности литосферы рассмотрены в настоящем сообщении.

### Методика наблюдений и обработки данных электромагнитного мониторинга

На всех пунктах приемные каналы регистрации электромагнитного поля ориентированы по направлениям С-Ю и В-З, а также по направлениям осей геоэлектрической неоднородности среды. В п. Шипунский наблюдения поля осуществлялись по основным и дублирующим линиям различной длины, которая определяется входным импедансом среды на различных частотах и интенсивностью магнитного поля [133]. Эксплуатация пунктов наблюдений и пред-

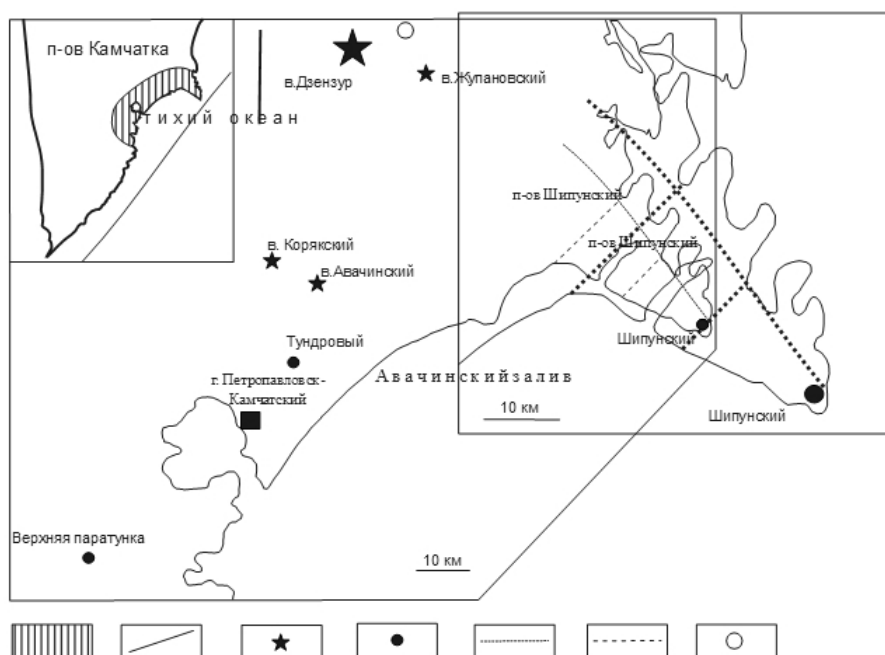


Рисунок 2.35 — Схема расположения пунктов наблюдений электромагнитного поля Земли. На врезке изображено положение района исследований. 1 - район исследований; 2 - глубоководный жёлоб; 3 - вулканы; 4 - пункты наблюдений; 5 и 6 - продольный и поперечные разломы на п-ове Шипунский [132]. Большой звёздочкой отмечен эпицентр Жупановского землетрясения

варительная обработка данных выполняется Камчатским филиалом Геофизической службы РАН. [134]. Более глубокая обработка полученной информации осуществляется с использованием специальной программы, создающей входные данные для расчётов передаточных магнитотеллурических функций в широком диапазоне периодов. Эти входные данные, созданные автоматически, представляют собой синхронные временные ряды электрического и геомагнитного полей заданной продолжительности. По ним для различных временных интервалов определяется магнитотеллурический импеданс [135]. Для определения электропроводности среды использована программа, алгоритм которой основан на известной робастной методике, разработанной Дж.Ларсеном. [136]. Анализ показал, что для получения устойчивых главных значений импеданса в диапазоне периодов от первых минут до первых часов необходим временной массив с дискретностью 1 минута не менее 5 суток. В результате обработки временных рядов электромагнитного поля в пп. Верхняя Паратунка, Тундровый, Шипунский с 2001 по 2016 года получены главные значения кажущегося электрического сопротивления в диапазоне периодов от 300 до 10000 секунд для временных интервалов равным 5 суткам. С меньшей дисперсией характеризуются временные ряды в пп. Верхняя Паратунка, Тундровый и Шипунский на периоде 500 с. Они в дальнейшем пересчитаны в средние полугодовые значения кажущегося электрического сопротивления.

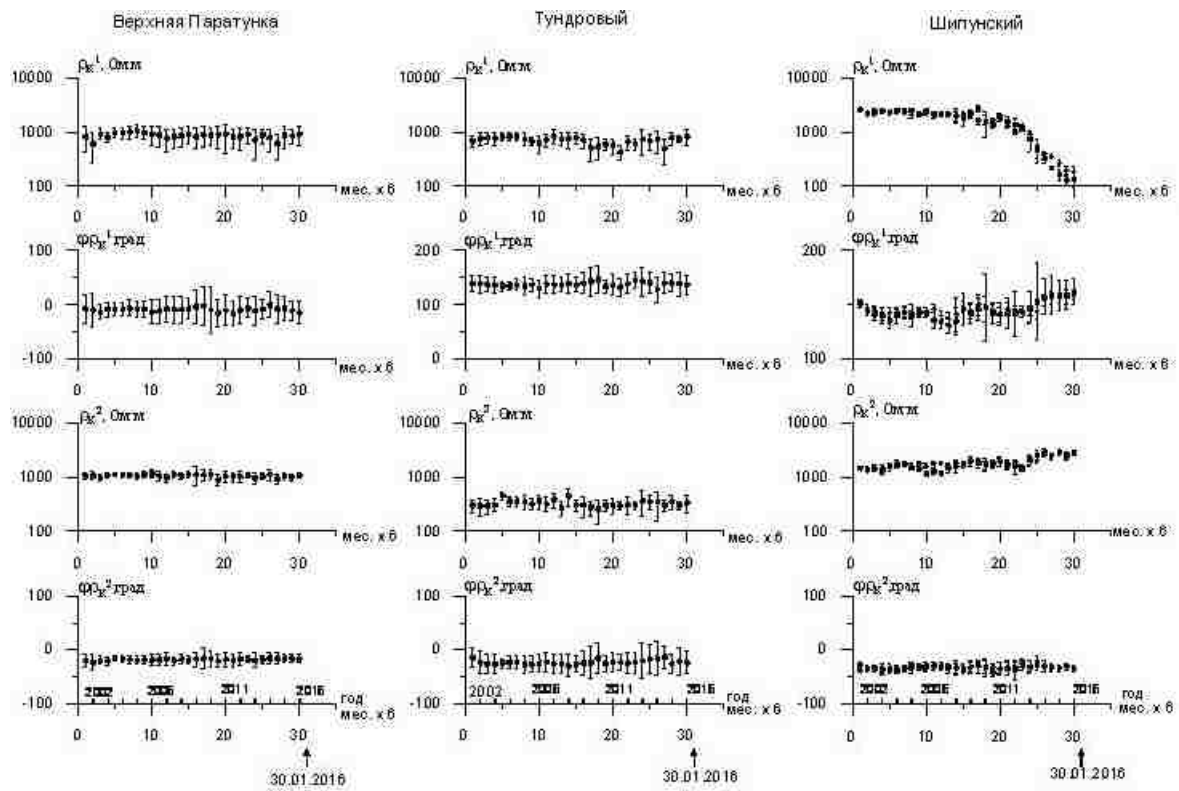


Рисунок 2.36 — Временные ряды полугодовых значений кажущегося электрического сопротивления и фазы импеданса на периоде 500с в пп. Верхняя Паратунка, Тундровый и Шипунский.  $\rho_k^1 \cdot \varphi^1$  и  $\rho_k^2 \cdot \varphi^2$  - кажущееся электрическое сопротивление и фаза импеданса в направлениях по простиранию и вкрест сейсмофокальной зоны. В п. Шипунский на графиках  $\rho_k$  и  $\varphi$  кружки и квадратики обозначают значения сопротивлений и фаз, полученных для приёмных линий различной длины

## Интерпретация временных рядов электропроводности литосферы

Полученные временные ряды кажущегося сопротивления и фазы импеданса изображены на рис. 2.36. В п. Верхняя Паратунка и Тундровый полугодовые значения кажущегося сопротивления и фазы импеданса практически не меняются. Отдельные отклонения значений сопротивления и фаз импеданса от графиков находятся в пределах ошибок их определения. В пп. Шипунский изменения электропроводности геологической среды за последние 5 лет. проявились на обеих установках приёмных каналов. Так, по направлению вдоль зоны субдукции (т.е. вкрест простирания п-ова Шипунский) кажущееся электрическое сопротивление уменьшается от первых тысяч до первых сотен Ом·м. Вкрест зоны субдукции (т. е. по простиранию п-ова Шипунский оно увеличилось примерно в 2 раза. Анализ показывает, что изменение электропроводности геологической среды не связано с метеорологическими факторами. Также нельзя объяснить его влиянием внешнего ионосферного, магнитосферного источника. Важно отметить, что для определения электропроводности использованы вариации электрического и геомагнитного полей с когерентностью не менее 0.8. В пользу отсутствия влияния внешнего источника свидетельствуют данные мониторинга электропроводности в пп. Верхняя Паратунка и Тундровый, где кажущееся сопротивление и фаза импеданса практически не меняются на протяжении 15 лет. Можно полагать, что изменение электропроводности геологической среды в п. Шипунский связано с геодинамическими процессами.

Как мы уже отмечали, п-ов Шипунский расположен в зоне субдукции, где ярко выражены процессы, связанные с сейсмичностью. Землетрясения в зоне субдукции вызваны напряжениями, возникающими при погружении океанической плиты под Камчатку. Земная кора в результате такого воздействия может испытывать сжатие или растяжение, что может повлиять на поведение электропроводности земной коры. Возникает вопрос, каким образом изменение напряжённости литосферы влияет на её электропроводность. Известно, что существенное влияние на электропроводность горных пород оказывает наличие высокоминерализованных растворов в порах, образующих связанные каналы. Такими каналами являются многочисленные трещины и разломы. На полуострове Шипунском выявлены разломы северо-восточного и северо-западного простираний, т.е. по направлениям вдоль и вкрест простирания зоны субдукции (рис. 2.35) Разломы выражены в приповерхностных частях разреза зонами повышенной трещиноватости пород [132].

Попробуем оценить возможные изменения электропроводности геологической среды в связи с различной электропроводностью разломов на п-ове Шипунский. С этой целью выполнено численное моделирование магнитотеллурического поля с использованием трёхмерной пробной модели южной Камчатки, включающей разломы на п-ове Шипунский. Геоэлектрические параметры верхнего слоя на суше приняты из работы [137, 138]. Мощность осадочно-вулканогенного чехла составляет 3 км, а удельное электрическое сопротивление 50 Ом·м. В модель включены разломы, которые выявлены по геолого-геофизическим данным [132]. Один из этих разломов проходит вдоль п-ова Шипунский (рис. 2.31). Удельное электрическое сопротивление

морской воды принято 0.25 Ом·м. Глубинные геоэлектрические разрезы континента и дна океана приняты из работы [139] для теплового потока изучаемой территории в 60 мВт/м<sup>2</sup> и возраста дна омывающих морей и океана в 40 млн. лет [140]. В результате моделирования по программе Макки [141] получены кривые МТЗ по главным направлениям для моделей с проводящими и непроводящими разломами и локально-нормальные кривые. В случае, если пункт наблюдения находится в зоне проводящего разлома вдоль п-ова Шипунский, то электрическое сопротивление по направлению вдоль сейсмофокальной зоны при увеличении проводимости разлома уменьшается почти на порядок из-за действия эффекта «S». При этом сопротивление в направлении вкрест простирания сейсмофокальной зоны заметно возрастает. Таким образом, данные моделирования подтверждают изменения продольного и поперечного электрического сопротивления литосферы из-за влияния проводящих глубинных разломов. Проводимость разломов определяется степенью их насыщенности минерализованными растворами, которая зависит, по-видимому, от напряжённости литосферы в зоне субдукции. Предполагается, что изменение электрического сопротивления верхних частей литосферы связано с увеличением или уменьшением степени насыщенности разломов минерализованными флюидами при растяжении или сжатии земной коры при геодинамических процессах в зоне субдукции. Причиной изменения степени насыщенности минерализованными растворами может быть активизация процессов в сейсмофокальной зоне в связи с Жупановским землетрясением произошедшем 30.01.216 г. на глубине 178 км с  $M_w = 7.1$ . Эпицентр находился на расстоянии около 85 км от п. Шипунский. Это землетрясение является самым сильным за последние 30 лет на указанном эпицентральной расстоянии до данного пункта. Также нельзя исключать вероятность аномального увеличения электропроводности в п. Шипунский в последние годы в связи с подготовкой катастрофического землетрясения в Авачинском заливе, согласно долгосрочному прогнозу Федотова С. А. [131].

### 2.5.3 Годовой ход напряженности электрического поля в приземной атмосфере на Камчатке

Известно, что наибольшее влияние на динамические характеристики атмосферного электричества в приземном слое атмосферы оказывают метеорологические процессы и орография местности. Поэтому представляло интерес рассмотреть подробно особенности климата на п/о Камчатка.

Обсерватория «Паратунка» ( $\varphi = 52^{\circ}58,3'N$ ,  $\lambda = 158^{\circ}14,9'E$ ) расположена на юге Камчатского полуострова (рис. 2.37) к западу от Авачинской бухты в долине, защищенной грядами невысоких сопок на высоте 50 м над уровнем моря.



Рисунок 2.37 — Расположение обсерватории «Паратунка» на Камчатском полуострове.

### **Климатические и погодные условия на юге Камчатки**

Основным климатообразующим процессом на Дальнем Востоке и на Камчатке является атмосферная циркуляция. Она оказывает наибольшее влияние на состояние погоды в целом. Положение Камчатки на восточной окраине Евразии, для которой характерны значительные термобарические контрасты, активная циклоническая деятельность, перестройка и смена генерального направления меридиональных составляющих атмосферной циркуляции, обуславливают здесь сложную и изменчивую погоду.

Основными климатическими центрами действия атмосферы в северной части Тихого океана и в Азии являются алеутская депрессия и сибирский максимум зимой, северотихоокеанский максимум и азиатская депрессия летом, взаимодействием которых и определяется характер атмосферной циркуляции на Камчатке и омывающих ее морях. Одной из особенностей циркуляции атмосферы над югом полуострова является активная циклоническая деятельность, особенно в осенне-зимний период (рис. 2.38) [142]. Летом циклоническая деятельность заметно ослабевает, однако это ослабление обусловлено не столько уменьшением числа циклонов, сколько уменьшением их глубины. Повторяемость барических образований и связанный с ними характер циркуляции определяют вынос на юго-восточное побережье полуострова той или иной воздушной массы. Совершенно очевидно, что в течение всего года здесь преобладает воздух морской умеренный. Континентальный умеренный воздух, редко отмечаемый на юго-востоке Камчатки, есть не что иное, как трансформированный морской умеренный воздух, поступающий с Охотского моря. Арктический воздух в район обсерватории поступает зимой из северных районов Берингова моря (морской) или из районов Колымы (континентальный), существенно трансформируясь по пути движения.

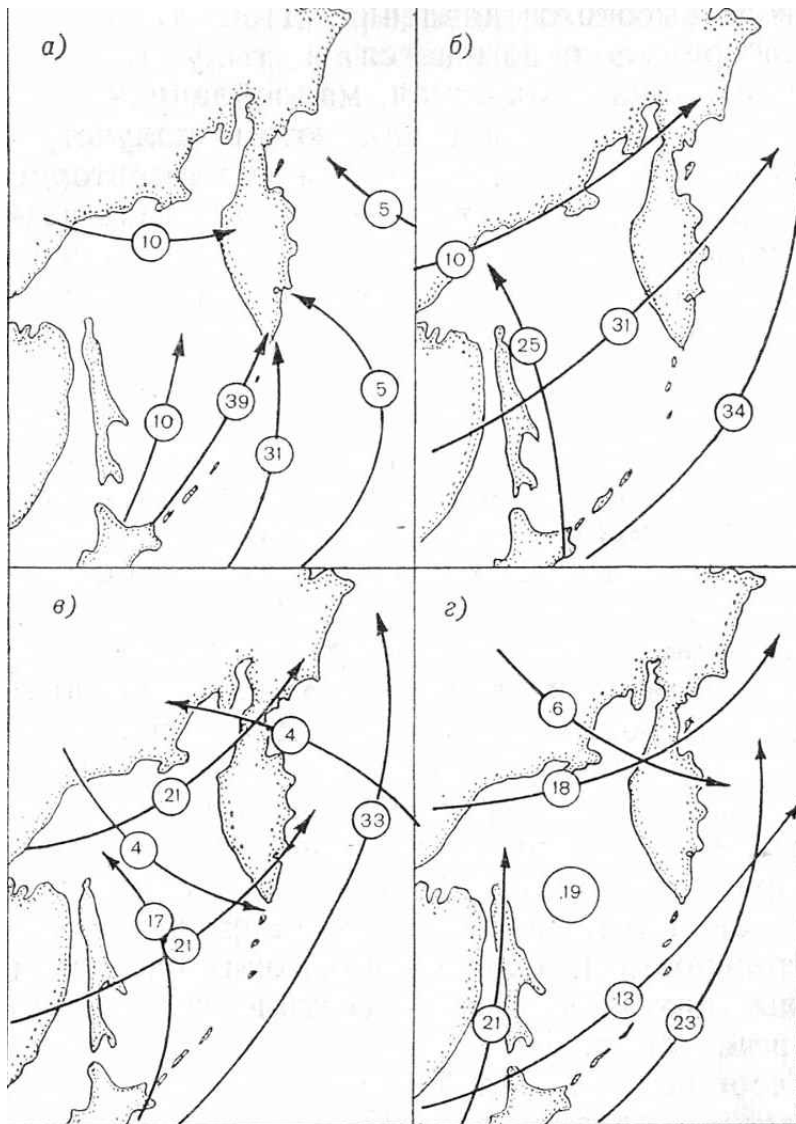


Рисунок 2.38 — Типовые траектории циклонов, оказывающих влияние на погоду юга Камчатки, и их повторяемость (%) в январе (а), апреле (б), июле (в), октябре (г) [142].

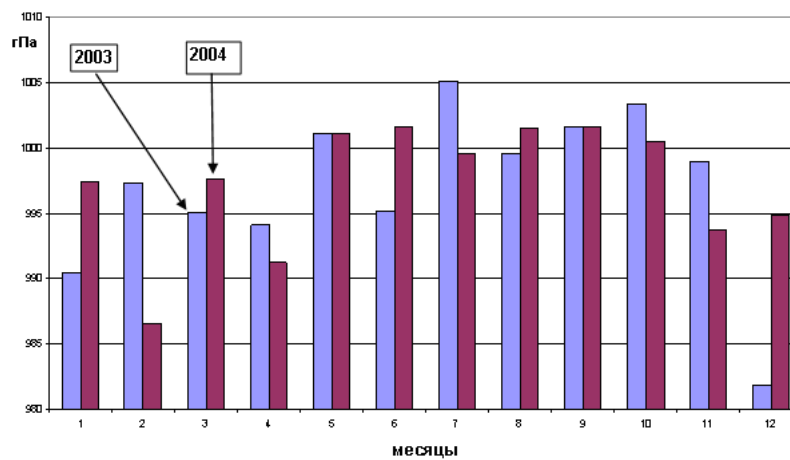


Рисунок 2.39 — Гистограмма распределения давления по месяцам за 2003-й, 2004-й годы.

На рис. 2.39 показана гистограмма распределения атмосферного давления на обсерватории по датчику, расположенному на высоте 60 метров над уровнем моря за 2003-й, 2004-й годы. Устойчивость показаний за май и сентябрь свидетельствует, что летне-зимняя перестройка климата проходит по стандартному сценарию. Наименее предсказуемыми являются зимние месяцы. Годовой ход давления полностью определяется циркуляционными процессами над югом Камчатки и омывающими ее водами Тихого океана, Берингово и Охотского морей. Минимум среднемесячного давления приходится на декабрь - январь – период максимального развития циклонической деятельности в алеутском районе. Этот ход относится к океаническому типу, для которого характерны небольшая амплитуда годового хода и максимум в теплый период.

Климатическое лето, в отличие от календарного, наступает, когда среднесуточная температура превышает 10 градусов по шкале Цельсия. Устойчиво летняя, но не обязательно солнечная, погода в районе обсерватории наблюдается только в августе. Среднемесячные температуры за период 2003–2009 гг. представлены на рис. 2.40, за период 2010–2016 гг. представлены на рис. 2.41.

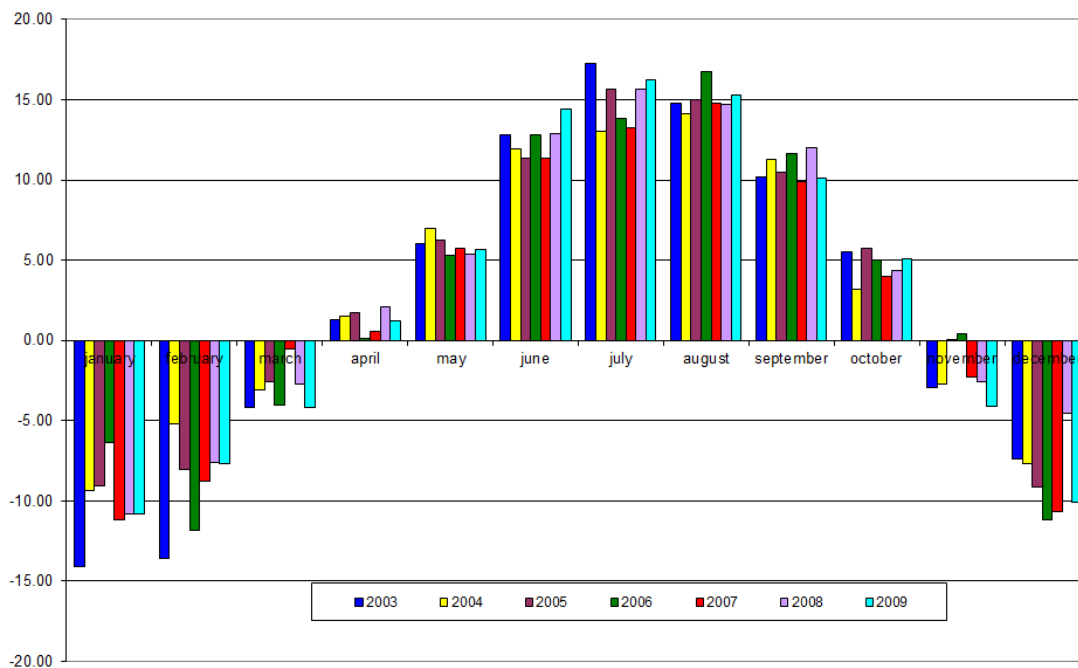


Рисунок 2.40 — Годовой ход среднемесячной температуры за 2003–2009 гг.

Средняя годовая температура воздуха на обсерватории за 2003–2016 гг. представлена на рис. 2.42. Среднее за весь этот период было 2.7°C, что совпадает со значением из работы [142]. Это ниже, чем в Петербурге и Стокгольме расположенных значительно севернее, на широте более 60°.

Ветер – горизонтальное движение воздуха относительно земной поверхности. Датчик ветра был установлен на водонапорной башне на высоте 25 метров. Измерения ведутся с интервалом 10 минут. На рис. 2.43 представлены графики силы ветра в районе обсерватории Паратунка за 2003 и 2004 гг.



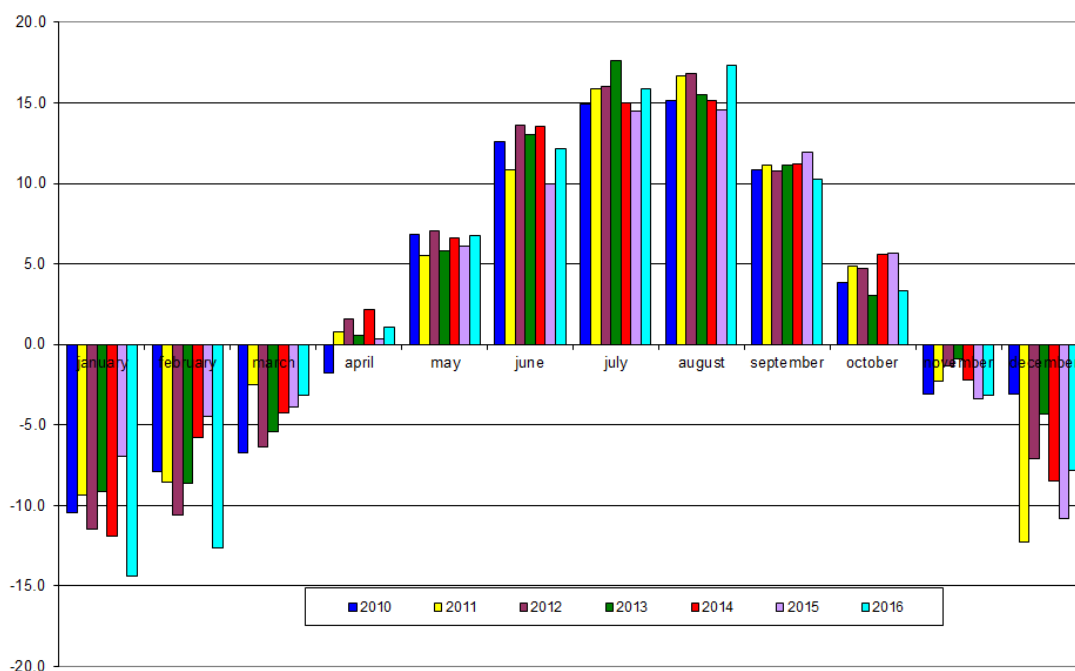


Рисунок 2.41 — Годовой ход среднемесячной температуры за 2010–2016 гг.

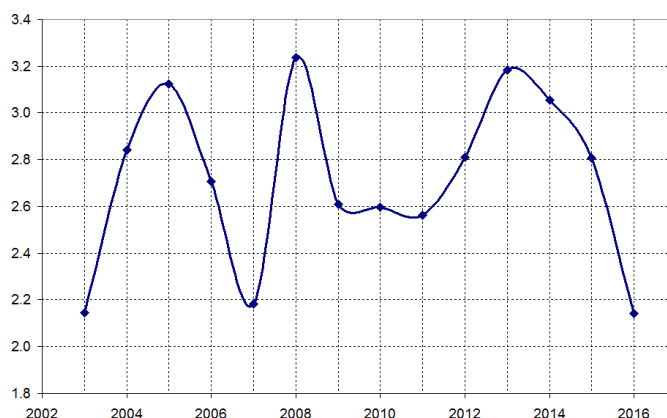


Рисунок 2.42 — Среднегодовая температура воздуха за 2003–2016 гг.

Ветер связан со всем комплексом гидрометеорологических характеристик. Особенно четко эта связь прослеживается в прибрежных районах. Так, в зимний период потоки с моря обуславливают теплую с осадками погоду, а ветры с суши (в Паратунке это северо-западные, северные и западные), наоборот, способствуют установлению сухой, холодной погоды.

Режим ветра у поверхности земли формируется, как известно, под воздействием трех факторов: атмосферной циркуляции, градиента давления и рельефа местности. Первые два фактора являются причиной межгодовых, сезонных и неперидических изменений в режиме ветра, а третий «рельеф местности» проявляется в искажении направления и скорости ветра в пограничном слое, т.е. вносит определенную погрешность в режим ветра. На рис. 2.44 представлена роза ветров в районе обсерватории Паратунка. Наиболее сильными являются северные и северо-западные ветры.

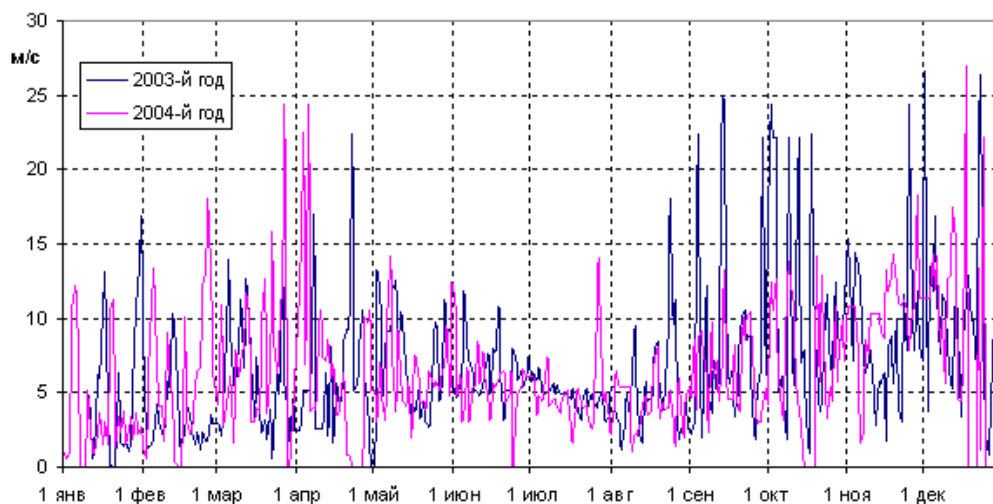


Рисунок 2.43 — Сила ветра в районе обсерватории Паратунка за 2003 и 2004 гг.

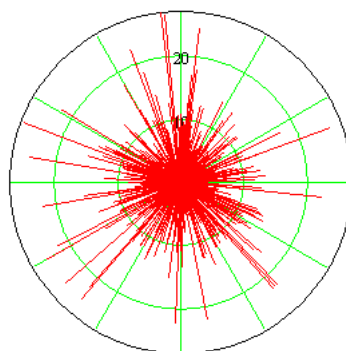


Рисунок 2.44 — Роза ветров в районе обсерватории Паратунка.

### Влияние осадков на напряженность электрического поля

Наиболее сильным метеорологическим фактором, влияющим на возмущенность напряженности электрического поля, являются осадки. Пример поведения поля, когда в течении суток тип осадков менялся по порядку снег-дождь-снег приведен на рис. 2.46. График униполярности (отношение электропроводности, вызванной положительными ионами, к электропроводности, вызванной отрицательными ионами,  $K = \lambda_+/\lambda_-$ ) во время дождя за 8 августа 2009 г. показан на рис. 2.47. График униполярности во время снегопада за 26 февраля 2010 г. показан на рис. 2.48. Как видно из графиков оба эти явления связаны с избытком в одном случае отрицательных ионов (дождь), в другом случае положительных ионов (снег). Однако нередко бывают события, когда во время сильных осадков в том и другом случае они сопровождаются сильными знакопеременными осцилляциями. Снег в районе обсерватории лежит 7 месяцев в году, с ноября по конец мая (рис. 2.45).

Гроза – атмосферное явление, при котором между отдельными облаками или между облаком и землей возникают многократные электрические разряды (молнии), сопровождающиеся

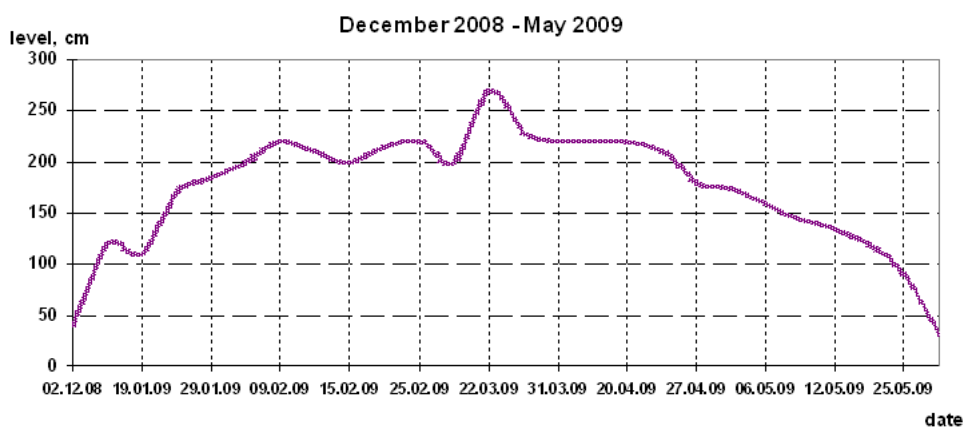


Рисунок 2.45 — Уровень снега зимой 2008-2009 гг.

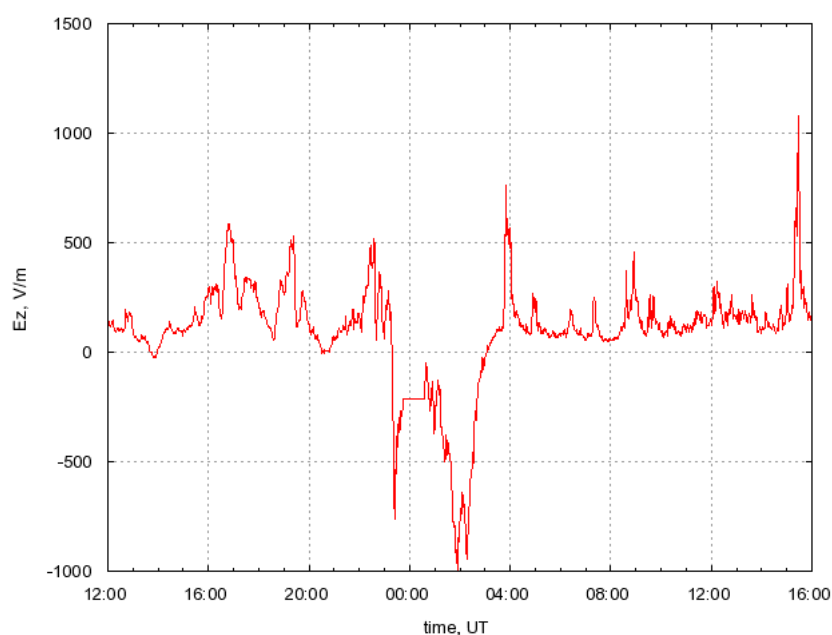


Рисунок 2.46 — Поведение электрического поля в условиях смены осадков снег-дождь-снег.

громом. Грозовая деятельность определяется процессами атмосферной циркуляции и в значительной мере местными физико-географическими условиями: рельефом местности, близостью водоема. Она характеризуется числом дней с грозой и продолжительностью гроз.

Вследствие недостаточного прогрева в теплое полугодие грозы на Камчатке - явление довольно редкое. С 1937 по 1982 годы (45 лет) было зарегистрировано всего 22 грозы. Все они, кроме двух, отмечались в летнее время. В 1980 г. было две грозы и обе зимой (в марте и в декабре).

В абсолютном большинстве случаев летние грозы на юге Камчатки возникают при прохождении холодных фронтов на фоне сравнительно высоких температур. Зимние же грозы обычно связаны с фронтами окклюзии и адвекцией очень теплой, очень влажной воздушной массы с Тихого океана. Именно при такой ситуации отмечались зимние грозы в Петропавловске-Камчатском в марте и декабре 1980 г.

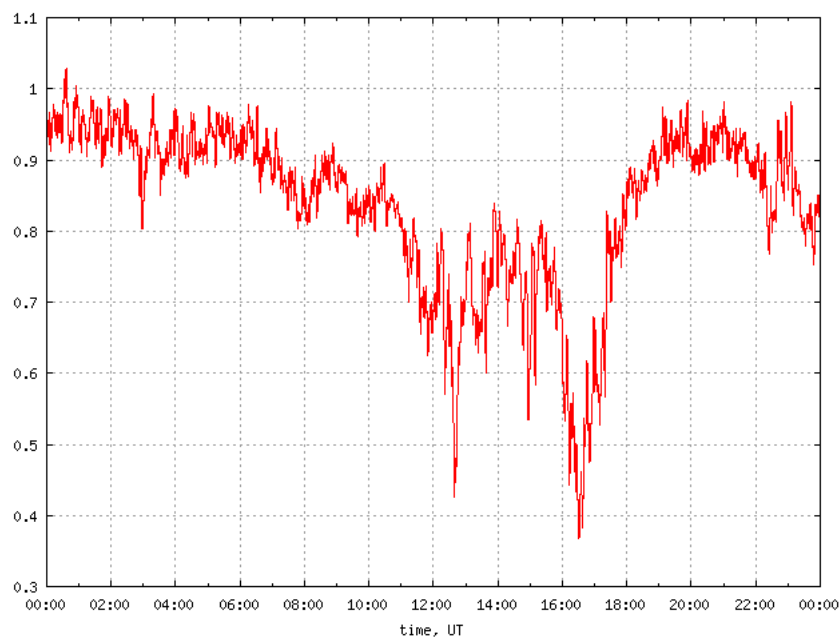


Рисунок 2.47 — График униполярности во время дождя 8 августа 2009 г.

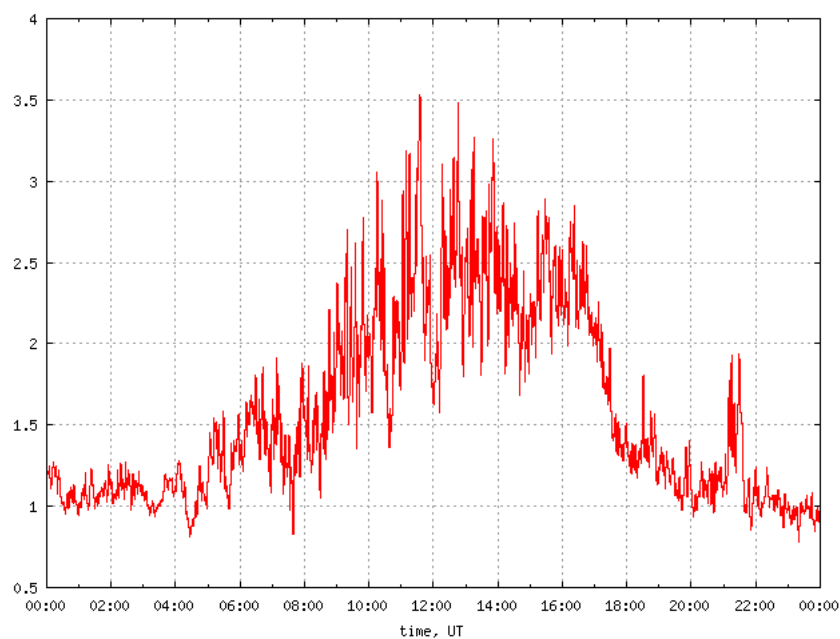


Рисунок 2.48 — График униполярности во время снега 26 февраля 2010 г.

Среднее годовое число дней с грозой в Паратунке меньше 0,5, максимальное - 3. Средняя продолжительность гроз не превышает 0,5 ч в день с грозой и 0,2 ч в целом за год. В годовом ходе грозы наиболее вероятны в августе (среднее число дней с грозой равно 0,2), а в суточном ходе - от 15 до 18 ч [142].

Град – явление еще более редкое, чем грозы. Среднее годовое число дней с градом составляет 0,2, наибольшее - 3. Выпадение града отмечалось в период с августа по ноябрь, причем в августе и ноябре град наблюдался лишь однажды. В сентябре и октябре среднее число дней с градом меньше 0,1, а максимальное равно 2.

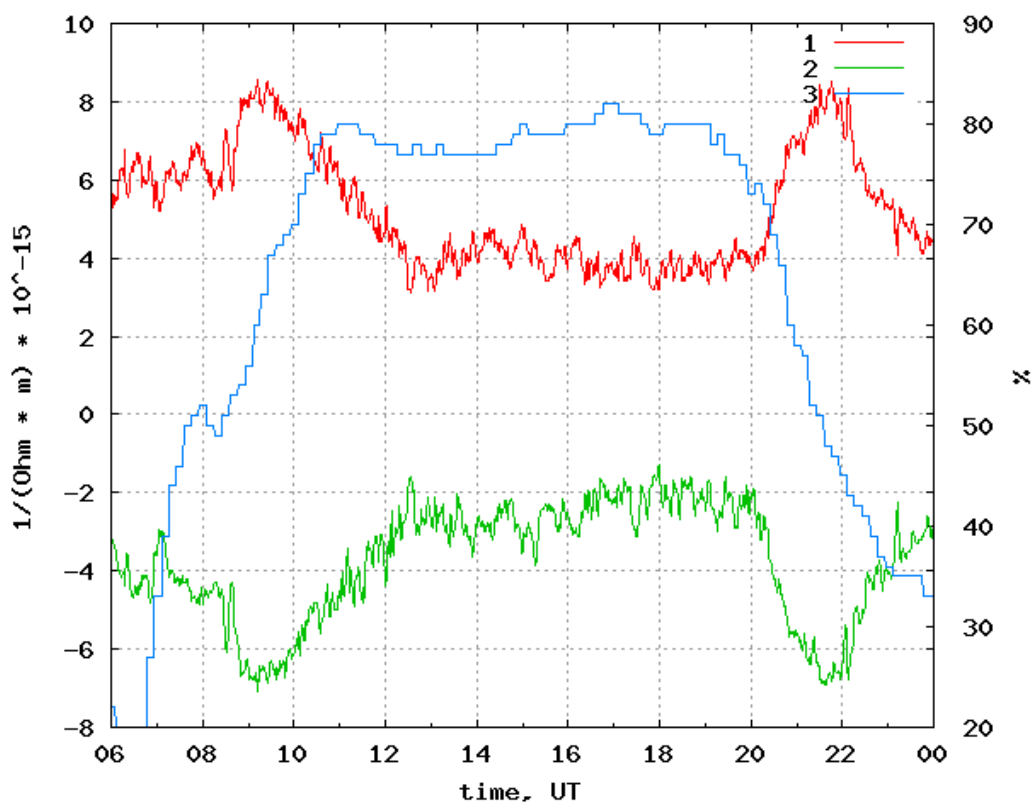


Рисунок 2.49 — Эффект тумана 31 мая 2010 г. 1 - электропроводность воздуха вызванная отрицательными, и 2 - положительными с множителем (-1) ионами, левая шкала, 3 - влажность воздуха, правая шкала.

В летне-осенний период в районе обсерватории наблюдается туман. Его эффект проявляется в падении электропроводности воздуха и, соответственно, повышении уровня электрического поля. В тумане проводимость уменьшается в результате присоединения лёгких ионов к частицам тумана, так что подвижность ионов уменьшается. Пример сильного тумана 31 мая 2010 г. приведён на рис. 2.49. О времени развития тумана можно судить по графику повышения влажности воздуха (рис. 2.49, кривая 3). В это время электропроводность воздуха вызванная отрицательными (рис. 2.49, кривая 1) и положительными ионами (рис. 2.49, кривая 2) бухтообразно уменьшилась.

Поведение электропроводности можно объяснить следующей формулой:

$$\lambda = e \Sigma (n_{i+} u_{i+} + n_{i-} u_{i-}), \quad (2.23)$$

где  $n$  – концентрация частиц,  $u$  – их подвижность. Молекулы воды присоединяются к заряженным ионам аэрозолей, что резко уменьшает их подвижность. Уменьшение подвижности приводит к уменьшению электропроводности.

## Сезонность

Сезонный режим эманации радона определяется величиной диффузии газа через почву. А на диффузию влияет глубина промерзания почвы в зимний период. О глубине и длительности промерзания почвы можно судить по высоте снежного покрова.

Измерения проводятся на ровной лесной поляне, на равнине. Расстояние до ближайших сопек не менее 10 км. Уровень снега в точке измерения достигает 270 см (рис. 2.45). Распределение среднемесячных значений напряженности поля и уровня снега в окрестности обсерватории «Паратунка» приведены на рис. 2.50. Снег в районе наблюдений лежит около 7 месяцев (с ноября по конец мая). Чем больше уровень снега и больше глубина промерзания почвы, тем меньше эманации радиоактивных газов из почвы. Чем меньше радиоактивность, тем меньше электропроводность. Соответственно увеличивается напряженность электрического поля.

Точка измерения электрического поля в летний период находится на высоте 3 метра. Коэффициент редукции, который приводит значение поля к уровню земли определяется специальной процедурой. Для этого вровень с землей устанавливается второй датчик и показания двух датчиков сравниваются в дни с хорошей погодой. Коэффициент редукции для обс. Паратунка равен 0.343. В зимний период уровень снега почти достигает уровня датчика. Поэтому коэффициент редукции за сезон должен изменяться примерно в диапазоне от 0.3 до 1. Однако он за весь период принят за константу 0.343. Что отражается в сезонном ходе.

Сезонный ход температуры влияет на подвижность ионов, что сказывается на электропроводность воздуха.

Отделить три фактора сезонности, фактор промерзания почвы, фактор изменения подвижности ионов и фактор высоты точки измерения, очень трудно.

## Годовой ход электрического поля

Наблюдение вариаций градиента потенциала электрического поля в условиях дней без осадков за 20 лет показало два интервала, где тренд сначала был положительный, затем отрицательный (рис. 2.51).

На рис. 2.52 приведен график значений  $M/\lg(R)$  для близлежащих землетрясений, где  $M$ —магнитуда,  $R$ —расстояние до обсерватории. Считается, что если эта величина больше 3, то точка наблюдений находится в зоне подготовки землетрясения. Наиболее значимыми по этому показателю были землетрясения: 31 октября 1998г. ( $\varphi = 52.95^\circ N$ ,  $\lambda = 158.26^\circ E$ ,  $M=5.5$ , 2.6 км от обсерватории) и 29 июля 2000г. ( $\varphi = 52.81^\circ N$ ,  $\lambda = 157.96^\circ E$ ,  $M=5.4$ , 26.5 км от обсерватории). Подготовка этих двух землетрясений сопровождалось положительным трендом электрического поля с угловым коэффициентом 0.14 и среднеквадратичным отклонением (СКО), равным 307 В/м. Можно предположить, что в это время изменился режим выхода радиоактивных газов. После июля 2000 г. тренд стал отрицательным, с угловым коэффициентом -0.16, СКО равным

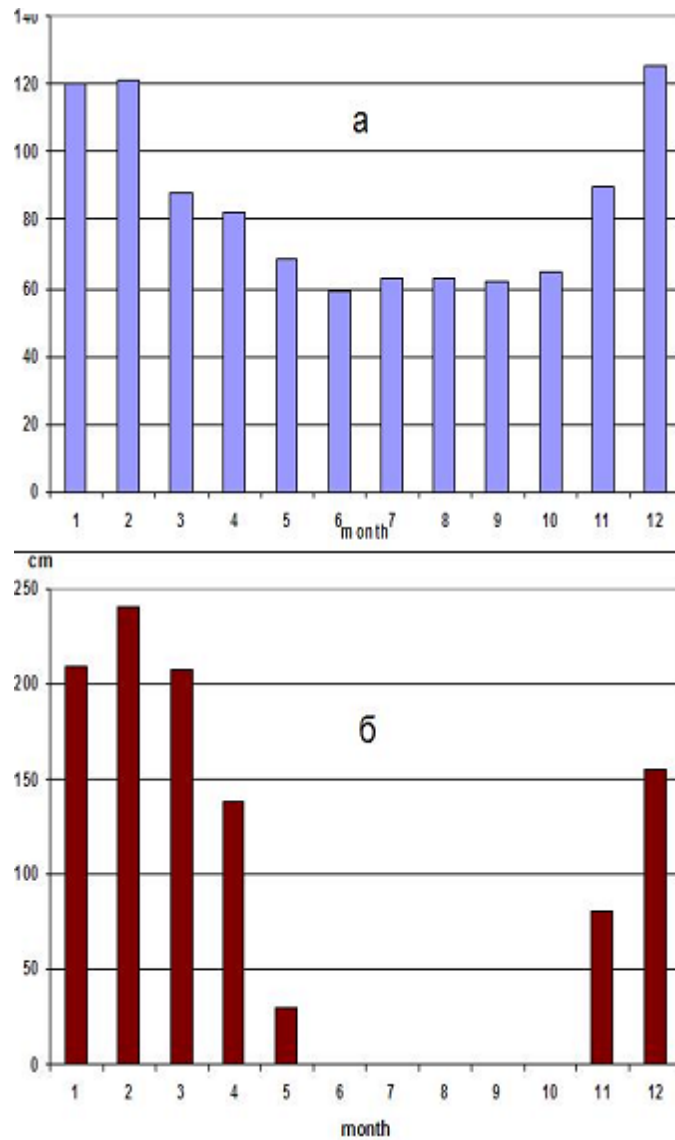


Рисунок 2.50 — Гистограммы распределения по месяцам средних значений напряженности электрического поля (1997 - 2009 гг) (а) и уровня снега (2008 - 2009 гг) (б) на обс. «Паратунка».

293 В/м.

### Обсуждение результатов

Подвижность легких ионов  $u_{1,2}$  зависит от давления  $P(z)$  и температуры воздуха  $T(z)$  и определяется выражением [143]:

$$u_{1,2} = u_{1,2}^0 \cdot \frac{P(0)}{P(z)} \cdot \frac{T(z)}{T(0)}, \quad (2.24)$$

где  $P(0) = 1013$  мбар, а  $T(0) = 273^\circ K$ .

В стационарных условиях концентрация ионов определяется уравнением баланса:

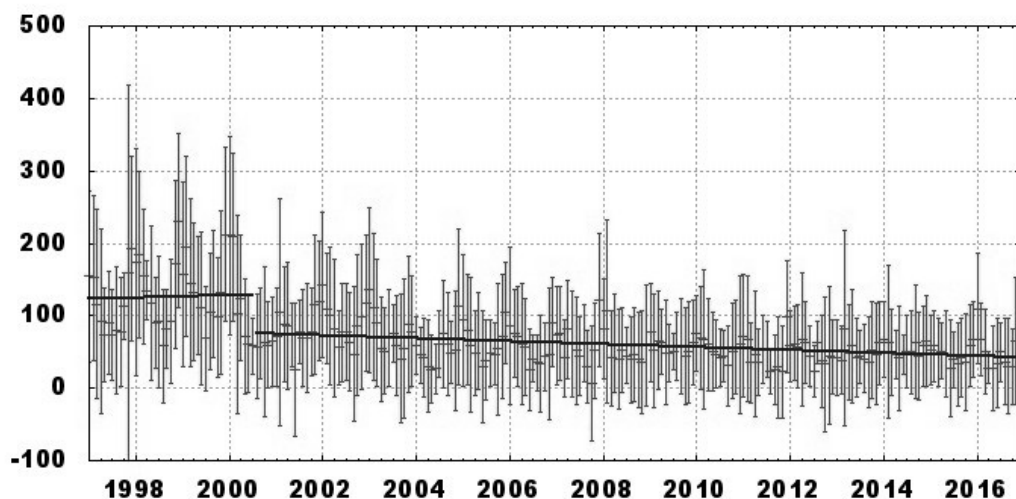


Рисунок 2.51 — Градиент потенциала электрического поля, среднеквадратичные отклонения и линии тренда

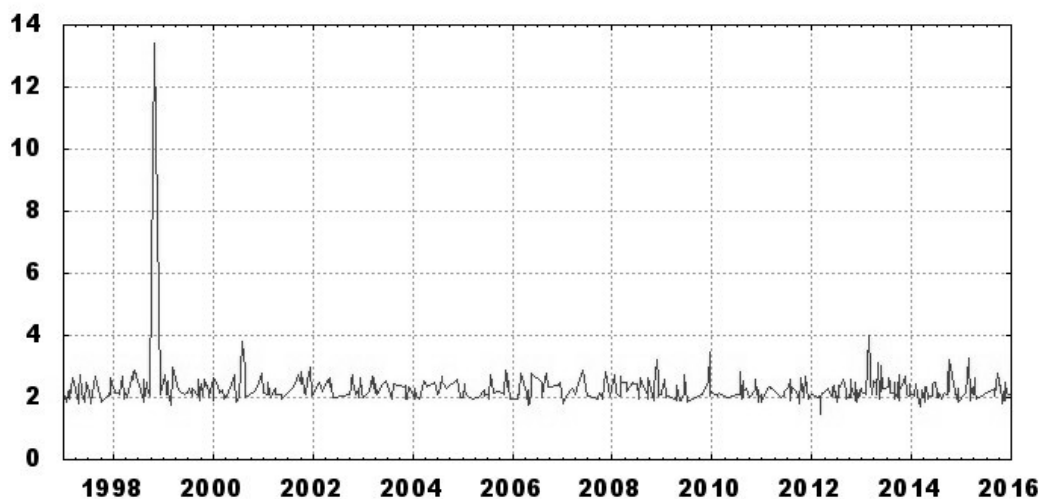


Рисунок 2.52 — График землетрясений  $M/\lg(R)$ , где  $M$ —магнитуда,  $R$ —расстояние до обсерватории

$$\frac{dn_{1,2}}{dt} = 0 = q - \alpha n_{1,2}^2 - \beta n_{1,2} N, \quad (2.25)$$

где  $q$  — интенсивность ионообразования,  $\alpha$  — коэффициент рекомбинации,  $\beta$  — коэффициент присоединения легких ионов к аэрозольным частицам,  $N$  — концентрация аэрозольных частиц.

В стационарных случаях, исключая влияние глобальной электрической цепи, конвективных и турбулентных процессов, можно считать связь напряженности электрического поля с электропроводностью воздуха как  $E \propto \lambda^{-1}$ . В свою очередь,  $\lambda$ , согласно уравнению ((2.23)), пропорционально концентрации ( $n$ ) и подвижности ионов ( $u$ ). Концентрация  $n \propto q^{1/2}$ , а подвижность при больших усреднениях пропорциональна температуре  $u \propto T$ . Таким образом, сезонный ход напряженности электрического поля определяется двумя процессами. Через подвижность



ионов напряженность поля связана с температурой воздуха  $E \propto T^{-1}$ . А через концентрацию ионов она связана с сезонным ходом эманации радиоактивных газов  $E \propto q^{-1/2}$ .

Камчатка является одним из самых активных геодинамических регионов. Годовой ход электрического поля может определяться годовым ходом эманации радиоактивных газов с одной стороны, с другой загрязненностью воздуха вулканическими выбросами.

Рассмотрим более детально уравнение ((2.25)). Например, для концентрации положительных ионов:

$$\frac{dn_+}{dt} = 0 = q - \alpha n_+ n_- - \beta n_+ N_- - \gamma n_+ N_0, \quad (2.26)$$

где  $N_-$  – концентрация отрицательно заряженных тяжелых ионов,  $N_0$  – концентрация нейтральных частиц,  $\alpha, \beta, \gamma$  – соответствующие коэффициенты рекомбинации. Аналогичные уравнения могут быть написаны для  $n_-$ ,  $N_-$ ,  $N_+$  и  $N_0$ . В стационарном состоянии и в неподвижном воздухе  $dn_+/dt = 0$ . Таким образом:

$$n_+ = q / (\alpha n_- + \beta N_- + \gamma N_0) \quad (2.27)$$

Можно учесть, что  $\beta N_- + \gamma N_0 \gg \alpha n_-$  и  $\beta \approx \gamma$ . Обозначим  $N_- + N_0 = N$ . Исходя из того, что приблизительно  $n_+ = n_-$  и  $u_+ = u_-$ , зависимость электропроводности от концентрации тяжёлых примесей оценивается как:

$$\lambda \sim 1/N \quad (2.28)$$

На Камчатке находятся 29 действующих вулканов. Годовой ход напряженности поля, кроме естественной радиоактивности, может диктоваться еще и примесью в воздухе вулканических выбросов  $E \propto N$ .

### Выводы по подразделу

По анализу влияния метеорологических и климатических параметров на электрическое поле Земли в приземной атмосфере на Камчатке можно сделать следующие выводы:

- а) Наибольшее влияние на вариации напряженности электрического поля имеют осадки. Для проведения экспедиционных и обсерваторских измерений необходимо их контролировать либо отдельным видом наблюдений, либо по форме и амплитуде сигнала.
- б) Сезонный ход электрического поля в условиях отсутствия осадков определяется тремя факторами: температурой воздуха, влияющей на подвижность ионов; ионизацией естественной радиоактивностью, влияющей на концентрацию ионов воздуха; изменением высоты точки измерения, обусловленной высотой снежного покрова.
- в) В вековом ходе электрического поля, измеренной в отсутствии осадков, за 20 лет наблюдений на обс. Паратунка обнаружено два тренда. С 1997 г. по июль 2000 г. тренд

был положительный, а затем, по январь 2017 г. отрицательный. На вековой ход электрического поля могут влиять естественная радиоактивность и примеси в воздухе от вулканических извержений.

#### **2.5.4 Результаты использования нового электрометра CS110 на обсерватории «Паратунка», Камчатка**

На Геофизической обсерватории «Паратунка» ИКИР ДВО РАН регулярные наблюдения за АЭП ведутся с 1996 г. [144] В качестве измерителя используется широко распространенный датчик напряженности электрического поля (электрометр, флюксметр) «Поле-2» [145], обеспечивающий получение достоверных и качественных результатов, в т.ч. благодаря имеющейся самокалибровке и эпизодическим сравнениям с другими электрометрами, например, ЭФ-4 или «Градиент-3» [146]. Однако, этот прибор является устаревшим, как конструктивно (по элементной базе и схемотехнике), так и физически, из-за износа механических узлов. В связи с этим, ИКИР в ноябре 2015 г. в рамках выполнения гранта РНФ приобрел современный цифровой электрометр CS110 (Campbell Scientific, Inc., США). Кроме модернизации приборной базы для мониторинга АЭП, ставилась задача сопоставления результатов измерений с помощью электрометра «Поле-2» с результатами электрометра CS110, который задает определенный международный стандарт в области наблюдений за АЭП (см, например, [147]).

#### **Аппаратура и условия эксплуатации**

Электрометр CS110 является распространенным прибором в международных исследованиях АЭП, в т.ч. для контроля за грозовой активностью. Измерения вертикального градиента потенциала АЭП  $E_z$  выполняются на том же методическом принципе, что и в датчике «Поле-2»: модуляция электростатического поля движущейся пластиной (field mill). Однако в отличие от «Поля-2» с вращающейся с большой скоростью пластины, в CS110 используется модулирующая пластина с возвратнопоступательным движением, что обеспечивается шаговым двигателем. Кроме того, измерительный элемент датчика CS110 ориентирован вниз, что предохраняет его обтюратор от осадков, создающих проблемы для «Поля-2» во время сильных снегопадов. Чувствительность CS110 в диапазоне  $\pm 2200$  В/м составляет 0.32 В/м, среднеквадратическое значение шума 0.42 В/м. Предусмотрена возможность автоматического переключения на расширенный диапазон  $\pm 22300$  В/м (с потерей чувствительности на порядок). Электрометр включает логгер CR1000 для управления, сбора данных и обмена с внешними устройствами, например, компьютером. Передача информации в компьютер происходит по каналу WiFi, синхронизация внутреннего таймера обеспечивается по PPS-сигналу встроенного приемника GPS, выполняется контроль (и регистрация) тока утечки, температуры и влажности датчика CS110, буферная память и питание от батареи обеспечивают автономные измерения в течение 7 сут. Кроме того, к логгеру могут быть подключены дополнительные внешние датчики, например, метеорологические: температуры, влажности и осадков.



Рисунок 2.53 — Электрометры на обсерватории «Паратунка». Левая панель: специальная опора с датчиком «Поле-2» в центре (впереди – рейка для измерения уровня снежного покрова), на заднем плане – технический павильон с электрометром CS110 на крыше. Средняя панель: электрометр CS110 на специальной опоре на крыше технического павильона, на заднем плане – опора с датчиком «Поле-2». Правая панель: опора и датчик «Поле-2», засыпанные снегом после циклона (23 марта 2016 г.).

Электрометр CS110 (датчик, бокс с логгером, GPS-приемником и системой бесперебойного питания), антенна GPS и датчик внешней температуры-влажности были закреплены на специальной стальной опоре с массивным основанием на крыше технического павильона (площадь примерно  $6 \times 6 \text{ м}^2$  с битумным покрытием, см. Рисунок 2.53. Датчик, опора и бокс с электроникой заземлены. Питание электрометра – от сети 220 В. Высота измерительного элемента датчика над крышей 1.2 м, высота крыши на уровне земли – 3.7 м. Примерно в 19 м к югу от CS110 находится датчик электрометра «Поле-2» на специальной каркасной опоре, высота обтюратора около 3 м.

Регистрирующий ноутбук со штатной программой LoggerNet расположен внутри павильона. Частота измерений 1 Гц. Выходной файл с данными включает время, значение градиента потенциала  $E_z$  (В/м), флаг статуса измерения, ток утечки (нА), температуру и влажность внутри датчика ( $^{\circ}\text{C}$ , %), напряжение батареи питания встроенного ИБП. В отдельный файл выводятся данные, полученные 10-минутным усреднением. Данные из буферной памяти логгера записываются в файлы по расписанию (ежечасно). Однако программа LoggerNet позволяет в текстовом и графическом виде отображать результаты текущих измерений в режиме онлайн.

## Результаты

Регулярные наблюдения с помощью CS110 были начаты в ноябре 2015 г., т.е. захватили зимний сезон со снегопадами и низкими температурами, наиболее проблемный для измерений АЭП. За весь рассмотренный период существенных сбоев аппаратуры или ПО не было, в т.ч. в периоды отключения электроэнергии. Начальная основная калибровка электрометра CS110 выполнена разработчиком и в штатном режиме эксплуатации не требуется. Однако, на момент подготовки настоящего доклада приведение результатов измерений к уровню земли не выполнялось, поскольку соответствующий редуцирующий коэффициент не был определен из-за снега.

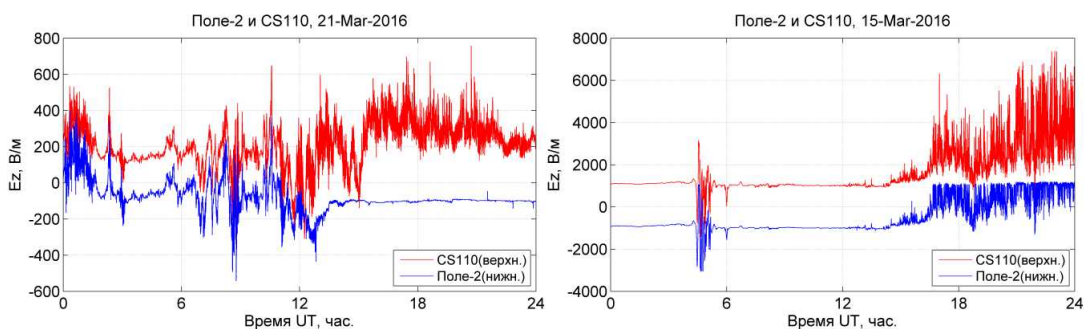


Рисунок 2.54 — Запись АЭП с помощью электрометров «Поле-2» и CS110 во время экстремальных погодных условий. Левая панель: во время сильного снегопада после 13UT датчик «Поле-2» был засыпан снегом. Правая панель: небольшой снег при штормовом ветре после 16UT приводит к уходу записи «Поле-2» вне допустимого уровня (запись CS110 смещена по ординате для лучшего представления).

Как отмечалось выше, циклоны в холодные сезоны сопровождаются обильными снегопадами с высотой выпавшего снега до 0.5-1.0 м. На Рисунке 2.53) (правая панель) представлено фото опоры «Поле-2» после циклона в марте 2016 г., на котором видно, что датчик полностью укрыт снегом. При этом его показания падают до нуля. В то же время измерения CS110 продолжают благодаря ориентированному вниз обтюратору (Рисунок 2.53), центральная панель). Вторым положительным моментом в измерениях с помощью CS110 является его увеличенный диапазон измерений, до 22 тыс. В/м, в то время как возможности «Поля-2» даже на грубом канале ограничены диапазоном около  $\pm 2000$  В/м (см. пример записи на Рисунке 2.54, правая панель).

Результаты измерений двумя электрометрами при условиях хорошей погоды (УХП) достаточно близки. В качестве примера на Рисунке 2.55 показаны вариации  $E_z$  за полные сутки 04.02.2016 г. и за один час 09.02.2016 г.

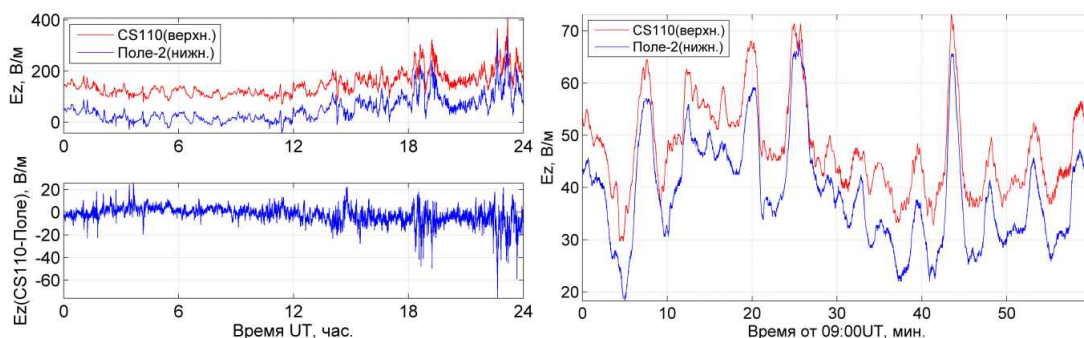


Рисунок 2.55 — Сравнение вариаций  $E_z$ , полученных с помощью электрометров «Поле-2» и CS110 при УХП. Левая панель: суточные записи за 04.02.2016 г. (вверху) и их разности (внизу). Правая панель: часовой фрагмент записи за 09.02.2016 г.

Поскольку коэффициент редукции к уровню земли для CS110 не был определен, то существуют регулярные масштабные различия в данных, которые в кривых на Рисунке 2.55 исключены подбором соответствующего множителя. Как видно по Рисунку 2.55, результаты

двух приборов достаточно близки. Колебания разностей достигают 10–20% при быстрых вариациях  $E_z$  и вызваны, вероятно, локальной динамикой АЭП из-за пространственного разнесения электрометров или их разной аппаратной инерционностью при отклике на резкие возмущения. Достаточно часто амплитудно-фазовые различия в записях на характерных временах в единицы-десятки секунд наблюдаются при небольшом ветре.

### **Выводы по подразделу**

Первые регулярные измерения градиента потенциала  $E_z$  с помощью нового электрометра-флюксметра CS110 выполнены на обсерватории «Паратунка» ИКИР ДВО РАН при достаточно экстремальных метеорологических условиях зимы-весны 2016 г. и без строгой метрологической основы. Тем не менее, электрометр показал себя как надежный и функциональный прибор, имеющий определенные преимущества по сравнению с штатным измерителем обсерватории «Поле-2», в основном при наблюдениях, когда погодные условия далеки от УХП. Результаты измерений с помощью CS110 и «Поля-2» показывают высокую согласованность при нормальных условиях, наблюдаемые различия могут быть объяснены особенностями локальной динамики АЭП в окрестности установки пространственно разнесенных приборов.

#### **2.5.5 Частотный и временной анализ эффекта восхода Солнца в электрическом поле приземного слоя атмосферы**

Над океанами и на открытых пространствах в полярных областях в условиях хорошей погоды одновременно наблюдаются подобные суточные вариации напряженности электрического поля (НЭП) в приземной атмосфере в зависимости от мирового времени. Это так называемая «унитарная вариация» (УТ-вариация) с максимумами в 18-19 UT (зимой) и 20-21 UT (летом), обусловленная суточными вариациями глобальной грозовой активности. Однако в измерениях электрических полей в приземной атмосфере на материковых станциях существенное влияние на суточные вариации оказывают местные метеорологические процессы, которые подавляют «унитарную вариацию». Для выделения различных эффектов в суточных вариациях элементов атмосферного электричества, наблюдения, как правило, проводят в условиях так называемой «хорошей погоды». Но даже в таких условиях наиболее ярким локальным эффектом в суточных вариациях НЭП имеет место так называемый «эффект восхода» Солнца, который проявляется в усилении напряженности поля, увеличении токов проводимости и величины пространственного заряда.

Известно, что солнечный терминатор (СТ) является эффективным источником волн в атмосфере Земли (см., например, обзор [148]). По определению, СТ – это переходная область, разделяющая атмосферу от полной тени до области, освещенной полным диском Солнца. В этой области в результате изменения солнечной радиации возникает горизонтальный градиент температуры и соответственно изменяются другие геофизические параметры (давление, плотность среды). Эта область имеет конечную ширину в пространстве в зависимости от широты,

высоты и геофизических условий, а по времени совпадает с периодами восхода и захода Солнца. В результате движения СТ со скоростью вращения Земли происходит генерация атмосферных волн на различных высотах в широком диапазоне периодов. Первоначально они были обнаружены различными радиофизическими методами преимущественно на ионосферных высотах в полосе периодов от нескольких минут до нескольких часов, которые относятся к диапазону акустико-гравитационных волн (АГВ) [148].

В данной работе обобщаются результаты исследований эффекта восхода Солнца в частотной и временной области по наблюдениям геофизических и метеорологических параметров на obs. «Паратунка» [149, 150, 151].

### **Методы измерений**

Наблюдения проводились на Камчатке в obs. «Паратунка» ИКИР ДВО РАН ( $\varphi = 52^{\circ}58,3'N$ ,  $\lambda = 158^{\circ}14,9'E$ ). Измерения напряженности электрического поля проводилось датчиком «Поле-2», разработанным в филиале Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейково – научно-исследовательским центром дистанционного зондирования атмосферы. «Поле-2» установлен на полигоне в 200 м от административного здания на высоте 3 м, площадка вокруг него расчищена от деревьев в радиусе 12 м. Регистрация проводится 14-битным АЦП с частотой дискретизации 1 с.

Контроль за метеорологическими параметрами проводится цифровыми метеостанциями WS-2000 и WS-2300. Данные поступают на станцию по радиоканалу на частоте 433 МГц. Один датчик температуры воздуха установлен на высоте 3 м на теневой стороне административного здания. Другой температурный датчик установлен на вышке на высоте 25 м. Частота опроса метеоданных составляет 10 мин.

Для комплексной обработки экспериментальных данных, кроме записей НЭП, были использованы также записи горизонтальной компоненты геомагнитного поля в обсерватории «Паратунка» (НР).

### **Основные результаты и обсуждение**

В условиях хорошей погоды на obs. «Паратунка» наблюдался типичный суточный ход НЭП, изображенный на рис. 2.56. Локальное время обсерватории отличается от мирового на 12 часов. Максимум суточного хода наблюдается в утренние часы местного времени. Иногда появляется вечерний локальный максимум, который по амплитуде гораздо меньше утреннего. Для выявления природы утреннего максимума были исследованы суточные хода НЭП и вертикального градиента температуры в условиях хорошей погоды за 2005–2009 гг. Для оценки действия конвективного генератора, наиболее ярко проявляющегося на восходе Солнца, в качестве меры интенсивности конвективного потока воздуха была выбрана разность температур на фиксированных высотах 3 и 25 м. Пример сопоставления суточных кривых НЭП с разностью

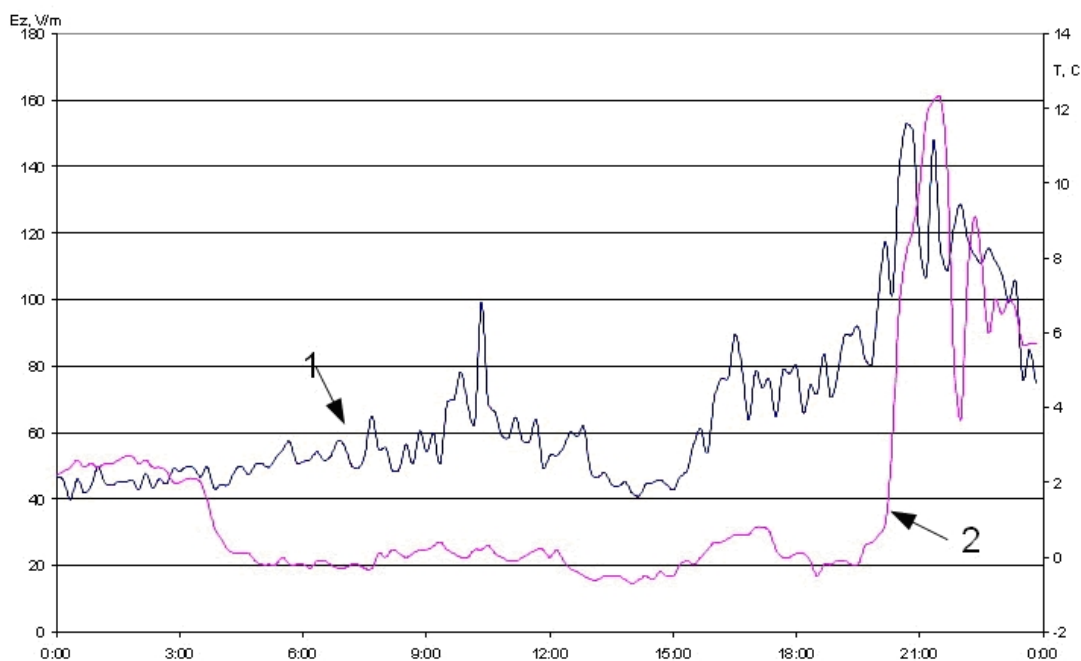


Рисунок 2.56 — Суточный ход напряженности электрического поля, левая шкала (1) и разность температур воздуха на высоте 25 м и 3 м, правая шкала (2), за 6 ноября 2007 г.

температур показан на рис. 2.56. Наиболее близко связь вариаций НЭП с разностью температур проявляется на восходе Солнца с коэффициентом корреляции  $\sim 0,6 \pm 0,1$ .

Для статистического исследования эффектов восхода выборочно были использованы суточные кривые НЭП в сентябре 1999 г. (13 дней), в октябре 2002 г. (5 дней), августе 2004 г. (6 дней), октябре 2005 г. (2 дня) и ноябре 2007 г. (3 дня). Начало эффекта в большинстве случаев совпадает по времени с моментом восхода, за исключением нескольких случаев, когда эффект наступал до восхода. Величина НЭП в максимуме эффекта превышает уровень до восхода в 2 - 4 раза; сдвиг максимума эффекта относительно момента восхода составляет величину от 0 до 4.5 ч, а длительность эффекта – от 2 до 7 ч. Практически во всех случаях эффект исчезает в местный полдень. Эффект усиления НЭП при заходе Солнца выделен существенно слабее по сравнению с эффектом восхода.

Исходный сигнал НЭП и НР использовался далее для спектральной обработки, а именно, для оценки авто- и взаимной спектральной плотности мощности (для краткости, спектров мощности) в полосе периодов внутренних гравитационных волн (ВГВ) 0,5–3 ч с помощью метода модифицированных периодограмм [125]. Модуль взаимного спектра характеризует вклад отдельных источников во взаимный процесс, а его аргумент позволяет определить запаздывание или опережение одного волнового процесса относительно другого. В относительных единицах связь двух волновых процессов характеризуется величиной квадрата функции когерентности  $\gamma^2$ . Пример предложенного метода обработки исходных записей НЭП и НР - компоненты для периода 12–24 UT, включающего момент восхода Солнца, показан на рис. 2.57.

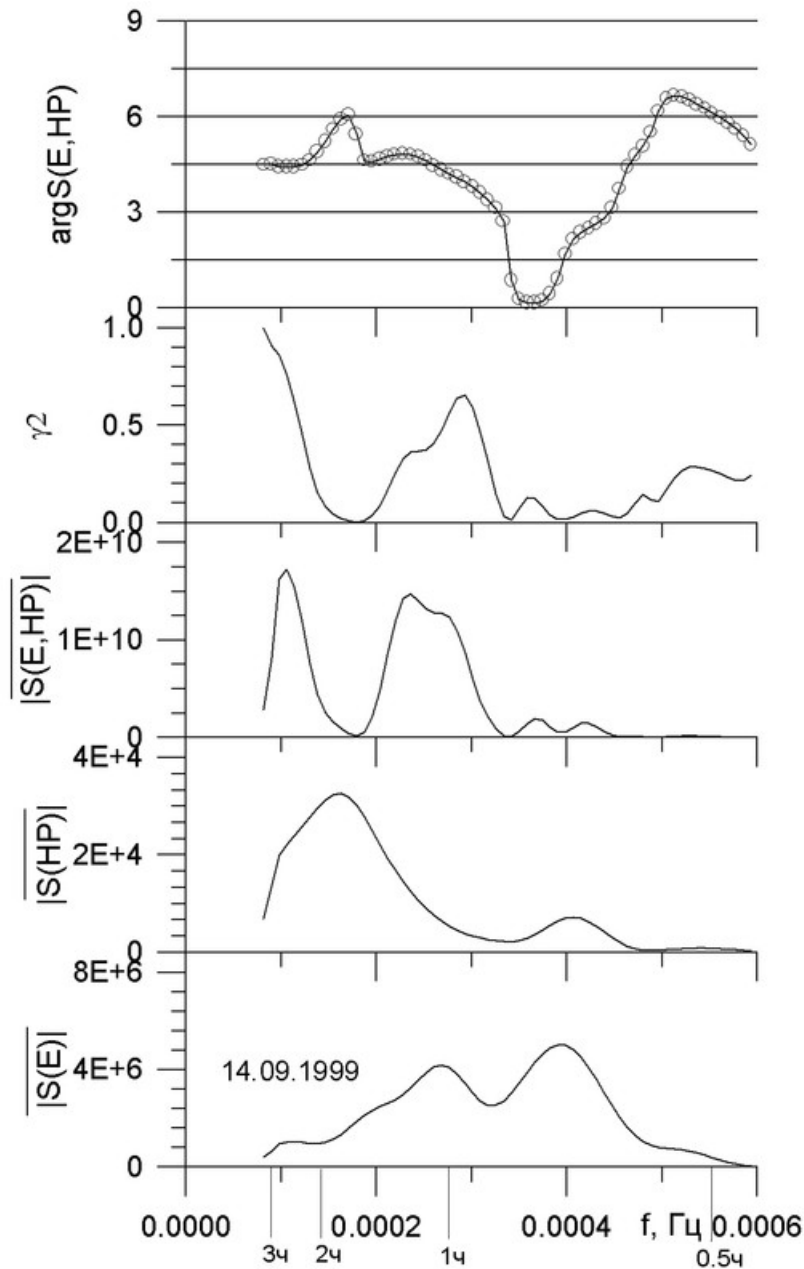


Рисунок 2.57 — Пример спектральной обработки напряженности электрического поля (E) и горизонтальной компоненты геомагнитного поля (HP),  $S(E)$  и  $S(HP)$  - автоспектры,  $|S(E,HP)|$  - модуль взаимного спектра,  $\gamma^2$  - функция когерентности,  $\arg S(E,HP)$  - аргумент взаимного спектра

Мощность ВГВ в авто-  $S(E)$ ,  $S(HP)$  и взаимных  $S(E,HP)$  спектрах сосредоточена преимущественно в полосе периодов 1,5–3 ч с выраженным максимумом на  $T \sim 2 - 2,5$  ч. Наличие этой полосы колебаний во взаимных спектрах  $S(E,HP)$  с коэффициентами когерентности, изменяющимися от 0,3 до 0,9, указывает на взаимосвязь процессов в нижней атмосфере и на высотах динамо-области, но источник этих волновых процессов, как следует из анализа кривых аргумента взаимных спектров, расположен выше динамо-области. Исключение составляют спектры мощности НЭП (нижняя кривая на Рисунке 2.57). Здесь, кроме полосы колебаний вблизи 1,5–2 ч, выделены более слабо выраженные колебания с максимумами на периодах  $T \sim 0,8$  и  $0,6$



ч, которые практически отсутствуют на взаимных спектрах  $S(E,HP)$ . Это указывает на то, что источник этих колебаний сосредоточен в приземной атмосфере, но энергии этих колебаний недостаточно для прохождения на высоты динамо-области ионосферы.

### Выводы по подразделу

Анализ эффекта восхода Солнца в суточных вариациях напряженности электрического поля в приземной атмосфере в условиях «хорошей погоды» в обс. «Паратунка» в 2005–2009 гг. показал следующее:

- а) Оцененные параметры эффекта: времена его начала и достижения максимума величины напряженности относительно времени восхода, а также отношение максимума к величине до восхода и длительность эффекта, согласуются с ранее опубликованными в литературе данными.
- б) Полученные результаты подтверждают физический механизм развития эффекта восхода Солнца, согласно которому аномальные вариации напряженности электрического поля вблизи восхода Солнца обусловлены процессами турбулентности и конвекции в приземной атмосфере при изменении температуры атмосферы.
- в) Интенсивность утреннего максимума суточного хода электрического поля в условиях «хорошей погоды» связана разностью температур на высотах 3 и 25 м. с коэффициентом корреляции порядка  $\sim 0,6 \pm 0,1$ .
- г) Вечерний максимум суточного хода электрического поля оказался слабо или совсем не связанным с разностью температур, что позволило предположить влияние тумана у поверхности земли на электропроводность и соответственно напряженность электрического поля.

На восходе Солнца в спектрах мощности напряженности квазистатического электрического поля в приземной атмосфере на Камчатке обнаружено следующее:

- а) Усиление интенсивности колебаний в полосе периодов 2-2,5 ч.
- б) Усиление колебаний в полосе периодов  $T < 1$  ч, интенсивность которых соизмерима с интенсивностью ВГВ накануне слабых землетрясений с магнитудой  $M < 6$ , недостаточна для прохождения на высоты динамо-области ионосферы.
- в) Вариации аргумента взаимных спектров напряженности электрического поля и вариаций горизонтальной компоненты геомагнитного поля позволили установить местоположение источников этих колебаний, а именно, в нижней атмосфере.
- г) Одним из возможных источников этих колебаний могут быть вихревые движения зарождающихся конвективных ячеек в пограничном слое атмосферы, переносящие объемные заряды вверх при увеличении температуры воздуха на восходе Солнца. Но возможны и другие источники этих колебаний.

## 2.5.6 Аномалии в электрических параметрах приземного слоя атмосферы перед землетрясениями

### Аномалии в ионосфере и в электрическом поле атмосферы

Анализ различных экспериментальных данных, полученных в зоне подготовки любого сильного землетрясения незадолго до сейсмического толчка, всегда представляет большой интерес. Такой анализ, прежде всего, необходим для создания наиболее полного физического «портрета» последовавшего сейсмического события и, в перспективе, для определения специфических черт, возникающих на завершающей фазе его подготовки.

Конечная цель подобного рода исследований – выделить совокупность таких аномалий в поведении разных измеряемых физических параметров, которые могли бы служить возможными временными индикаторами назревающего толчка (его возможными предвестниками) для использования в прогнозе других землетрясений. Однако выделение аномалий, предшествующих землетрясениям (АПЗ) с некоторым временным упреждением, еще не означает их обязательной причинной связи с подземными толчками, хотя они могут устойчиво коррелировать с сейсмическими событиями с каким-то характерным временем их упреждения (например, в зависимости от магнитуды землетрясения). В любом случае необходимо накапливать наблюдательный материал, который поможет ответить как на фундаментальные вопросы о возможной причинной связи АПЗ с последовавшим землетрясением, так и для решения практических вопросов прогноза, если некая совокупность АПЗ будет хорошо коррелировать с моментом толчка с подходящим временным упреждением.

В работе не обсуждается генезис проявления в атмосфере Земли сейсмогенных аномалий, предшествующих землетрясениям и обусловленных процессами подготовки землетрясений в области их очагов внутри Земли. Возможные физические механизмы связи возмущений в ионосфере, предшествующих землетрясениям (ВИПЗ), которые можно рассматривать как ионосферные предвестники землетрясений (ИПЗ) подробно рассмотрены, в частности, в монографиях [152], а аномалии в приземном атмосферном электричестве, предшествующие землетрясениям (АПАЭПЗ), являющиеся электрическими предвестниками землетрясения (ЭПЗ), детально разбираются в монографии [153], а также в работах [154, 155]. Важный физический аспект непосредственной связи сейсмогенных электрических аномалий в твердой Земле перед землетрясениями с соответствующими их проявлениями в атмосфере приземного слоя, обусловленный переносом положительно заряженных «дырок» (происходящим при сжатии в магматических породах), подробно описан в работах [156, 157]. Общий обзор предвестников землетрясений всех возможных типов и их физическая природа подробно обсуждаются в монографии [158].

Целью настоящей работы является выделение ВИПЗ и АПАЭПЗ и их сопоставительный анализ перед Камчатским землетрясением 30.01.2016 г. (географические координаты эпицентра  $\varphi_e = 54.01^\circ N$ ,  $\lambda_e = 158.01^\circ E$ , магнитуда  $M = 7.2$ , глубина гипоцентра  $h = 161$  км),

произошедшим в 03:25 UT на эпицентральной расстоянии  $R \cong 117$  км от комплексной геофизической обсерватории «Паратунка» (географические координаты  $\varphi = 52.97^\circ N$ ,  $\lambda = 158.25^\circ E$ ). Для этого были использованы данные проводившихся на ней пятнадцатиминутных измерений параметров ионосферы, десятиминутных измерений вертикальной компоненты ( $E_z$ ) приземного квазистатического атмосферного электрического поля (КАЭП) и соответствующих ему величин электропроводности приземного слоя воздуха ( $\lambda_+$  и  $\lambda_-$ ) в январе 2016 г.

Здесь необходимо отметить то обстоятельство, что рассматриваемое далее землетрясение принадлежит к классу землетрясений с промежуточной глубиной гипоцентра ( $60 \text{ км} \leq h \leq 300 \text{ км}$ ). Так как эпицентральная зона землетрясения обычно определяется как проекция очаговой зоны землетрясения на поверхность Земли, в которой наиболее сильно проявляются макросейсмические эффекты землетрясения, то размер области подготовки землетрясения на поверхности Земли, по крайней мере, не меньше этой зоны.

Согласно данным United States Geological Survey (USGS) для этого землетрясения характерный размер эпицентральной зоны составляет  $\sim 1000$  км, а обсерватория «Паратунка», расположенная в 117 км от эпицентра, находится очень близко к центру зоны подготовки землетрясения на поверхности Земли. Более того, оказывается (см. монографию [159]), что чем глубже расположен очаг землетрясения, тем большую территорию охватывают сейсмические проявления при равной энергии землетрясения, т. е. промежуточные землетрясения (глубины гипоцентров от 60 до 300 км) охватывают большие площади, чем коровые (глубины гипоцентров до 60 км) при одинаковых магнитудах. Кроме этого, если иметь в виду возможные проявления аномалий в ионосфере перед этим землетрясением, следует помнить, что в пионерской работе [160] были идентифицированы сейсмоионосферные возмущения в ионосфере за два часа до мощного Вранчского землетрясения 04.03.1977 г. по наблюдениям на радиотрассах, проходивших именно над его эпицентральной зоной. Указанное землетрясение имело магнитуду  $M = 7.2$ , а глубина гипоцентра была 120 км, т. е. это землетрясение также относилось к классу промежуточных.

### **Геофизическая и метеорологическая обстановки**

При анализе вариаций в ионосфере большую роль играет наличие или отсутствие в рассматриваемый период времени существенных геомагнитных возмущений, которые могут влиять на ионосферу (причем особенно сильно их влияние на область F ионосферы, проявляющееся глобально [161, 162], а исследование приземного атмосферного электричества может осложнять наличие осадков [163, 155]).

В работе детально рассмотрено поведение параметров ионосферы и характеристик приземного атмосферного электричества в трехдневном интервале с 28 по 30 января 2016 г., т. е. в период времени, включающий в себя два дня до землетрясения и тот день, когда произошел подземный толчок. Чтобы выделить возмущения исследуемых параметров, необходимо знать их фоновый уровень, поэтому для формирования фонового (реперного) уровня соответствующих

опорных медианных значений рассматриваемых параметров берутся более широкие интервалы времени. Конкретно, для приземного атмосферного электричества этот интервал составил 7 дней (с 25 по 31 января 2016 г.), а для расчета медианных ионосферных характеристик был добавлен еще один день, 2 февраля 2016 г., т. е. 8 дней. Такой выбор обусловлен следующими причинами.

Во-первых, с 25 по 31 января по мировому времени, согласно данным obs. «Паратунка», не наблюдалось осадков. Уровень шумов в сигнале КАЭП при наличии осадков на два порядка выше, чем в условиях «хорошей погоды», что могло бы затруднить выделение аномалий [163].

Во-вторых, согласно <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>, величина трехчасового Кр-индекса планетарной геомагнитной активности в этот же период не превышала уровня 2+ во все часы суток (что соответствует геомагнитно-спокойным условиям), за исключением последних трех часов 31 января.

Для увеличения длины выборки ионосферных данных до длины выборки данных по приземному атмосферному электричеству был дополнительно рассмотрен геомагнитно-спокойный день 2 февраля 2016 г., так как 31 января репрезентативность ионосферных данных была невысока (данные имеются только первые 3 часа начала суток и последние 3 часа конца суток). Предыдущий день 1 февраля 2016 г. не был включен в выборку, так как на интервале 00:00 – 00:06 UT наблюдались значения Кр-индекса 3- и 4- соответственно, т. е. геомагнитный уровень превышает спокойный фон в течение 6 ч.

### Метод обработки данных

Обработка данных проводилась единообразно (как для абсолютных, так и для относительных изменений) для всех рассматриваемых в работе временных рядов физических параметров по методике, близкой к описанной в работах [164, 165].

Процедура состояла в следующем. Сначала для выбранной совокупности дней для каждого момента времени суток вычислялась медиана  $Y_{med}(ti)$  для требуемого физического параметра  $Y(ti)$  (для ионосферных характеристик временной шаг составлял 15 мин, а для электрических параметров приземного слоя атмосферы – 10 мин). Затем рассматривались нужные абсолютные или относительные разности текущих значений рассматриваемых параметров и их медианных величин, привязанных к соответствующему временному отсчету  $ti$  на суточном интервале  $[\Delta Y(ti) = Y_{current}(ti) - Y_{med}(ti)$  и  $\Delta Y(ti)/Y_{med}(ti)]$  в трехдневном диапазоне 28–30.01.2016 г. (см. выше, п. 2).

В качестве меры разброса за счет случайных отклонений был выбран межквартильный диапазон (interquartile range)  $IQR$  – разность между верхним и нижним квартилями соответствующего параметра, вычисленный на указанном трехдневном интервале. Тогда «шумовые» полосы  $K_{\pm} = [\Delta Y(ti)]_{MED} \pm 1.5IQR$  или  $K_{\pm} = [\Delta Y(ti)/Y_{med}(ti)]_{MED} \pm 1.5IQR$  ограничат возможные вариации параметров, объясняемые случайными отклонениями с определенной степенью вероятности. Как следует из энциклопедии [Klotz and Johnson, 1983], в случае нормального

распределения «ошибки» значений  $\Delta Y(ti)$  (или  $\Delta Y(ti)/Y_{med}(ti)$ ), величина  $1.5IQR$  будет соответствовать примерно двум стандартным отклонениям. Значение  $\Delta Y(ti)$  (или  $\Delta Y(ti)/Y_{med}(ti)$ ) под воздействием разных случайных факторов должно колебаться в пределах указанных «шумовых» дорожек  $K \pm$  с вероятностью 95% или, с другой стороны, вероятность того, что выход значений за границы полосы  $K \pm$  обусловлен чисто случайными факторами, составляет всего 5%. Значения  $\Delta Y(ti)$  и  $\Delta Y(ti)/Y_{med}(ti)$ , выходящие за пределы соответствующей из обозначенных «шумовых» полос, относились нами к аномальным значениям  $Y_{current}(ti)$ , если длительность такого возмущения по времени составляла не менее получаса, поскольку они являются неслучайными с вероятностью 95%.

Здесь следует отметить, что успешная идентификация сейсмоионосферных аномалий в поведении критической частоты F2-слоя ионосферы на основе IQR как меры отклонения от фона, ранее была выполнена, в частности, в работе [166], с тем различием, что в качестве исходной меры отклонения от фона использовалась величина  $IQR/2$ . Таким образом, нами используется более жесткий критерий к отбору отклонений, которые можно отнести к возмущенным значениям рассматриваемых параметров.

Эффективность применяемой здесь методики для обнаружения сейсмоионосферных аномалий в эпигнозе только по ионосферным данным ранее была оценена в работе [167] в соответствии с одним из алгоритмов, описанным в статье [168].

При этом составляется соответствующая таблица сопряженности признаков (contingency table) для выбранного интервала наблюдений. Дни распределяются в матрице  $2 \times 2$  согласно своим характеристикам, а затем используется оценка Хансена-Койпера (Hanssen-Kuipers Score, True Skill Statistic, Pierce Skill Score, Rscore) [168]. Она представляет собой разность между вероятностью обнаружения истинной сейсмоионосферной аномалии, т. е. предваряющей землетрясение с заданным упреждением (в работе [167] интервал упреждения был определен как  $\leq 3$  сут), и вероятностью возникновения «ложной тревоги». Численные значения этой оценки могут принимать значения от -1 до 1, при этом последнее означает стопроцентную вероятность обнаружения истинной сейсмоионосферной аномалии при отсутствии «ложных тревог». Для обработанного ряда землетрясений в Камчатском регионе, в диапазоне магнитуд  $M = 4.6-6.0$ , в работе [167] была получена величина  $Rscore = 0.82$ , т. е. достаточно высокая. Необходимо подчеркнуть, что анализируемый ниже случай конкретного землетрясения стоит в одном ряду с ранее выделенными по той же методике в этом же регионе сейсмоионосферными аномалиями для менее мощных землетрясений, но только по ионосферным данным [167, 165, 169]. В отличие от этих работ здесь параллельно привлекаются также и независимые измерения электрических характеристик приземной атмосферы.

Далее в работе будут рассмотрены временные вариации следующих физических параметров:

$h'E_s$  – наименьшая действующая высота спорадического слоя E для обыкновенной волны;

$foE_s$  – предельная частота обыкновенной волны спорадического E-слоя ионосферы;

$fbEs$  – экранирующая частота обыкновенной волны спорадического E-слоя ионосферы;

$foF2$  – критическая частота обыкновенной волны F2-слоя ионосферы;

$\gamma$  – коэффициент униполярности в приземном слое атмосферы, определяемый как отношение абсолютной величины удельной электропроводности приземного слоя воздуха, обусловленной положительными ионами  $abs(\lambda_+)$ , к абсолютной величине удельной электропроводности приземного слоя воздуха за счет отрицательных ионов  $abs(\lambda_-)$  соответственно;

$Ez$  – вертикальная компонента приземного квазистатического атмосферного электрического поля (КАЭП);

$Jz$  – плотность вертикального тока проводимости в приземном слое воздуха, определяемая как произведение  $\lambda_\Sigma Ez$ , где  $\lambda_\Sigma = abs(\lambda_+) + abs(\lambda_-)$ .

## Результаты и обсуждение

На рис. 2.58 приведены вариации выбранных ионосферных параметров в течение трех дней по UT. Штриховая линия со стрелкой отмечает момент землетрясения, темные прямоугольники на оси абсцисс обозначают интервалы местного времени от 18:00 до 06:00 LT. Штрихпунктирные линии фиксируют полосы разбросов  $K\pm$ , а выходящие за них вариации (выделенные аномалии) даны темной заливкой. Части этих аномалий, не выходящие за границы разбросов, для удобства восприятия заштрихованы. Аномалии объединены в две группы (эллипсы ВИПЗ-I и ВИПЗ-II).

В группе ВИПЗ-I аномалии действующей высоты  $h'Es$  появляются на  $\sim 4$  ч раньше, чем в частотных характеристиках спорадического слоя Es, а аномалия в F2-слое возникает еще на 4 ч позже. Такое распределение временной задержки получится, если предположить, что в результате развития сейсмического процесса на заключительной фазе его подготовки (близко к моменту толчка), часть сейсмической энергии канализируется от земли в верхние слои атмосферы. Она сначала достигает высот спорадического слоя Es и только потом более высоко лежащего F2-слоя (при этом изменяются и их частотные характеристики), однако, конечно, ситуация может быть и более сложной. Здесь под сейсмической энергией понимается потенциальная энергия среды, накопленная в виде ее упругих напряжений, которая при землетрясении, главным образом, идет на разрушение материала среды, трение при подвижке и образование сейсмических волн. До магистрального разрыва малая (по сравнению с моментом главного удара) часть уже накопленной энергии частично выделяется в атмосферу, например в виде тепла, инфразвука и т. п. (см., в частности, работу [170]).

Первая аномалия группы ВИПЗ-I в  $h'Es$  появляется за  $\sim 26.5$  ч до землетрясения, а последние (в  $foEs$  и  $fbEs$ ) заканчиваются за  $\sim 13$  часов до него. Общая длительность аномалий в группе (от начала появления первой до исчезновения последней в этой группе) составляет  $\sim 13$  часов. Анализ группы аномалий ВИПЗ-I показывает, что сначала значительно возрастает действующая высота, с которой наблюдаются отражения, а затем (с задержкой порядка часов) резко возрастают частоты  $fbEs$  и  $foEs$  (а не только  $fbEs$ ), что свидетельствует о развитии

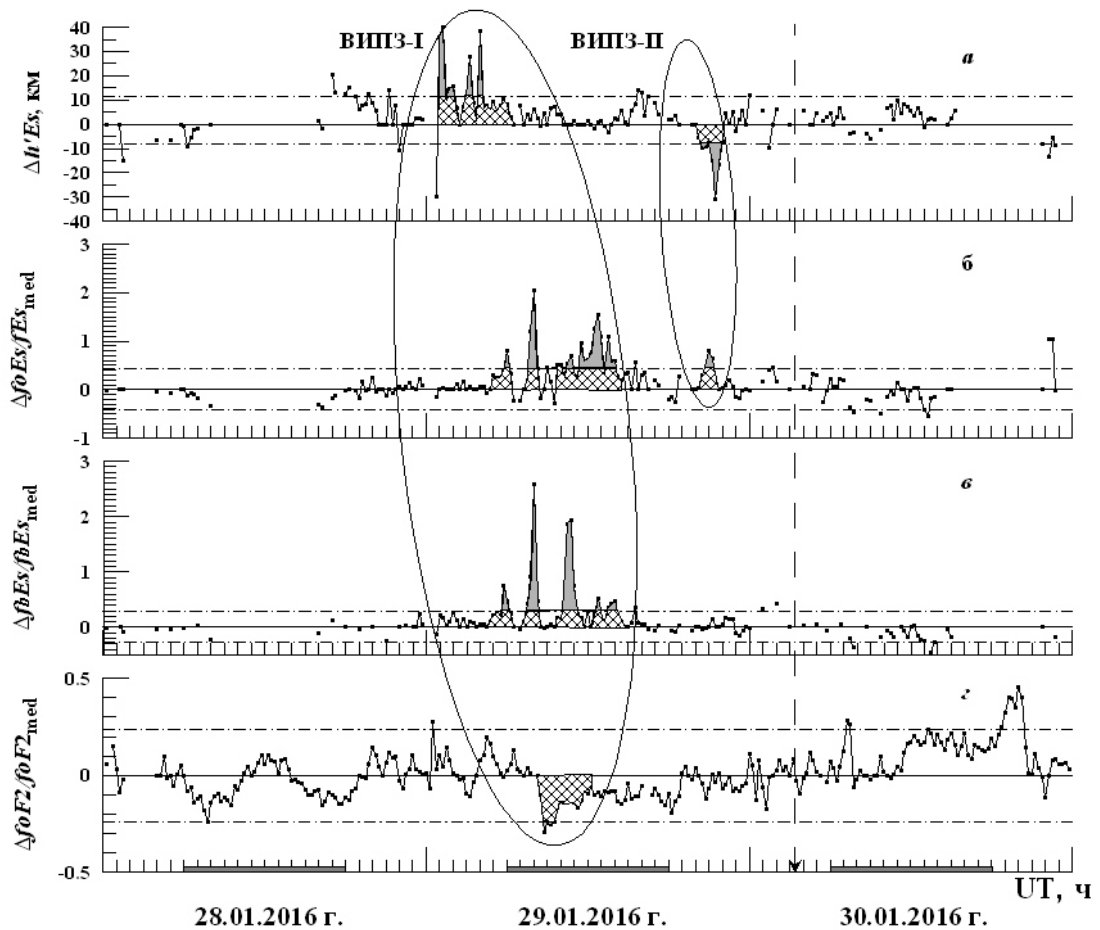


Рисунок 2.58 — Изменения параметров ионосферных слоев Es и F2 со временем (UT): а —  $\Delta h'Es$ ; б —  $\Delta foEs/foEs_{med}$ ; в —  $\Delta fbEs/fbEs_{med}$ ; г —  $\Delta foF2/foF2_{med}$ . Штриховая линия со стрелкой отмечает момент землетрясения, темные прямоугольники на оси абсцисс обозначают интервалы местного времени от 18:00 до 06:00 LT. Штрихпунктирные линии фиксируют полосы разбросов  $K\pm$ , а выходящие за них вариации (выделенные аномалии) даны темной заливкой. Части этих аномалий, не выходящие за границы разбросов, для удобства восприятия заштрихованы. Аномалии объединены в две группы (эллипсы ВИПЗ-I и ВИПЗ-II)

выраженной неоднородности структуры слоя в горизонтальных направлениях. При этом горизонтальные размеры отдельных крупных «облаков» с повышенной электронной концентрацией составляют несколько сотен километров, а электронная концентрация распределена неоднородным образом внутри каждого такого «облака» (см. монографию [171]). Таким образом, над станцией зондирования ионосферы появляются более плотные и более неоднородные «облака» плазмы внутри регулярного слоя E, собственно и составляющие спорадический слой Es.

Следует также отметить еще одно обстоятельство. Для группы аномалий ВИПЗ-I резкое начальное уменьшение высоты слоя  $h'Es$  коррелирует с одновременным «выбросом»  $foF2$  (нижняя панель), однако, так как длительность этого возмущения составляет менее получаса (всего одна точка), то по принятому ранее условию, этот «выброс» в  $foF2$ , совпадающий с резким понижением в  $h'Es$ , не попадает (формально) под определение аномалии.

Группа ВППЗ-II проявляется только в спорадическом слое Es практически синхронно (в h'Es и foEs) за  $\sim 6.4$  часа до толчка и длится  $\sim 1.5$  ч. Здесь корреляция возрастания foEs с уменьшением высоты слоя h'Es свидетельствует о том, что неоднородность отражающего слоя возрастает одновременно с его понижением, при этом нельзя однозначно говорить об увеличении плотности слоя, так как fbEs практически не изменяется.

На рис. 2.59 представлено поле корреляции значений  $(Ez; \lambda_{\Sigma})$  за период 28–30.01.2016 г., на котором показана кривая нелинейной регрессии (сплошная линия), соответствующая эмпирическому уравнению  $Ez = 7.07 \times 10^2 / \lambda_{\Sigma}^{0.857}$ , а стандартная ошибка регрессии дана штрихпунктирными линиями. Для этой кривой коэффициент корреляции  $\rho = 0.795$ . Квадрат коэффициента корреляции, или коэффициент детерминации, показывает долю вариации результативного признака, объясненную вариацией факторного признака. Чаще всего, давая интерпретацию коэффициента детерминации, его выражают в процентах, т. е.  $\rho^2 = 0.795^2 \cong 0.632$  и, следовательно, в 63.2% случаев изменения  $\lambda_{\Sigma}$  приводят к изменению Ez (63.2% всех точек, входящих в поле корреляции, лежит между верхней и нижней штрихпунктирными линиями). Остальные 36.8% изменений Ez объясняются факторами, не учтенными в такой однофакторной модели. Ниже эта «теоретическая» модель используется для построения прогнозируемых значений Ez по величине  $\lambda_{\Sigma}$  и соответствующих «теоретических» вариаций в приземном атмосферном электричестве для сравнения их с полученными в результате наблюдений.

Как показано далее на рис. 2.60, именно этими факторами, не обусловленными изменениями собственно проводимости, определяются, по-видимому, аномалии в приземном электричестве атмосферы, которые как раз и могут быть связаны с развитием сейсмического процесса. Следует подчеркнуть, что измерения проводимостей и величины электрического поля Ez на obs. «Паратунка» проводятся независимо друг от друга.

Рисунок 2.60 выполнен по аналогии с рис. 2.58, но для соответствующих электрических параметров приземного слоя атмосферы. Пунктирные линии на панелях б и в показывают вариации этих же параметров в соответствии с «теоретической» моделью (см. рис. 2.59). Для более высокой степени надежности выделения аномалий, все кривые на этом рисунке сглажены с шириной окна усреднения в 7 точек, что соответствует часовому усреднению. Такое сглаживание не применялось к ионосферным данным, так как их значения нередко отсутствуют в соответствующей точке суточного отсчета, особенно для спорадического слоя Es, тогда как для этих же моментов времени данные по электрическим характеристикам приземного слоя атмосферы имеются всегда и во всех точках отсчета. Как хорошо видно из рисунка 3, «теоретические» кривые относительных изменений поля и тока нигде не выходят за границы разбросов.

Аномалии на этом рисунке также объединены в две группы (эллипсы АПАЭПЗ-I и АПАЭПЗ-II), и отдельно показана существенная относительная аномалия  $\Delta Jz / Jz_{med}$  в начале суток 28.01.2016 г.

В группе АПАЭПЗ-I начало положительных аномалий в приращении коэффициента униполярности  $\Delta \gamma$  совпадает с началом отрицательных относительных приращений вертикального тока  $\Delta Jz / Jz_{med}$ , при этом не наблюдаются аномалии в относительных изменениях верти-



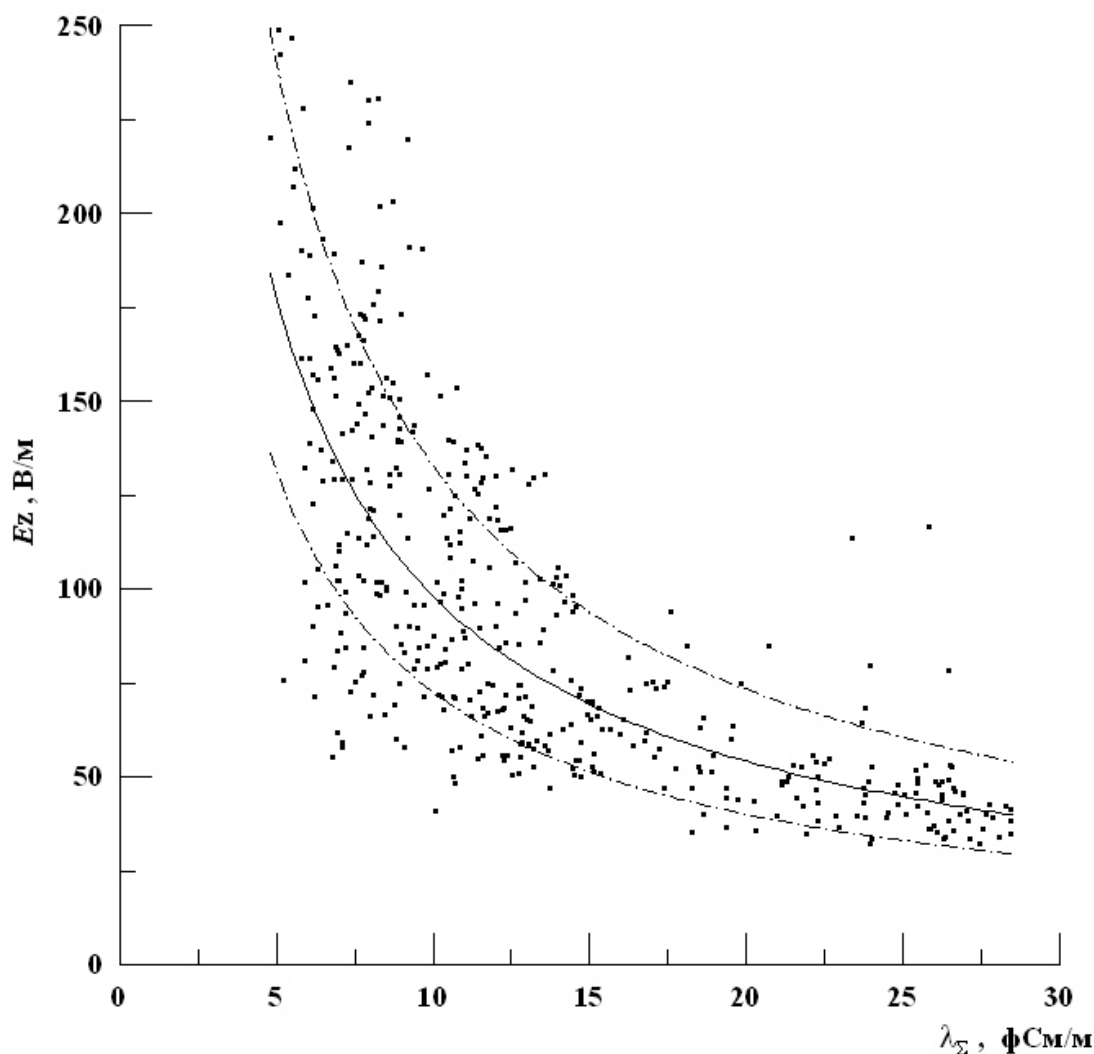


Рисунок 2.59 — Поле корреляции значений  $(Ez; \lambda_{\Sigma})$  за период 28–30.01.2016 г. (точки), кривая нелинейной регрессии, соответствующая эмпирическому уравнению  $Ez = 7.07 \times 10^2 / \lambda_{\Sigma}^{0.857}$  (сплошная линия) и стандартная ошибка регрессии (штрихпунктирные линии)

кальной компоненты КАЭП  $Ez$ . По времени группа АПАЭПЗ-I примерно соответствует группе ВИПЗ-I рис. 2.58.

В группе АПАЭПЗ-II развитие положительного относительного приращения вертикального тока  $\Delta Jz / Jz_{med}$  примерно на час запаздывает от такого же относительного приращения КАЭП  $\Delta Ez / Ez_{med}$ , причем в это время положительное абсолютное приращение коэффициента униполярности  $\Delta \gamma$  приближается к верхней границе своего разброса. По времени эллипс АПАЭПЗ-II соответствует эллипсу ВИПЗ-II рис. 2.58.

Отдельно выделена значительная аномалия в  $\Delta Jz / Jz_{med}$ , существующая с 01:00 по 03:00 UT 28.01.2016 г., которая не сопровождается аномалиями в других электрических параметрах приземного слоя воздуха, однако в  $\sim 01:30$  UT регистрируется отрицательный «выброс» приращения действующей высоты  $\Delta h'Es$  (см. рис. 2.58). К сожалению, ионосферные данные по слою  $E_s$  на этом интервале времени далее (вблизи этого момента времени) слишком фрагмен-

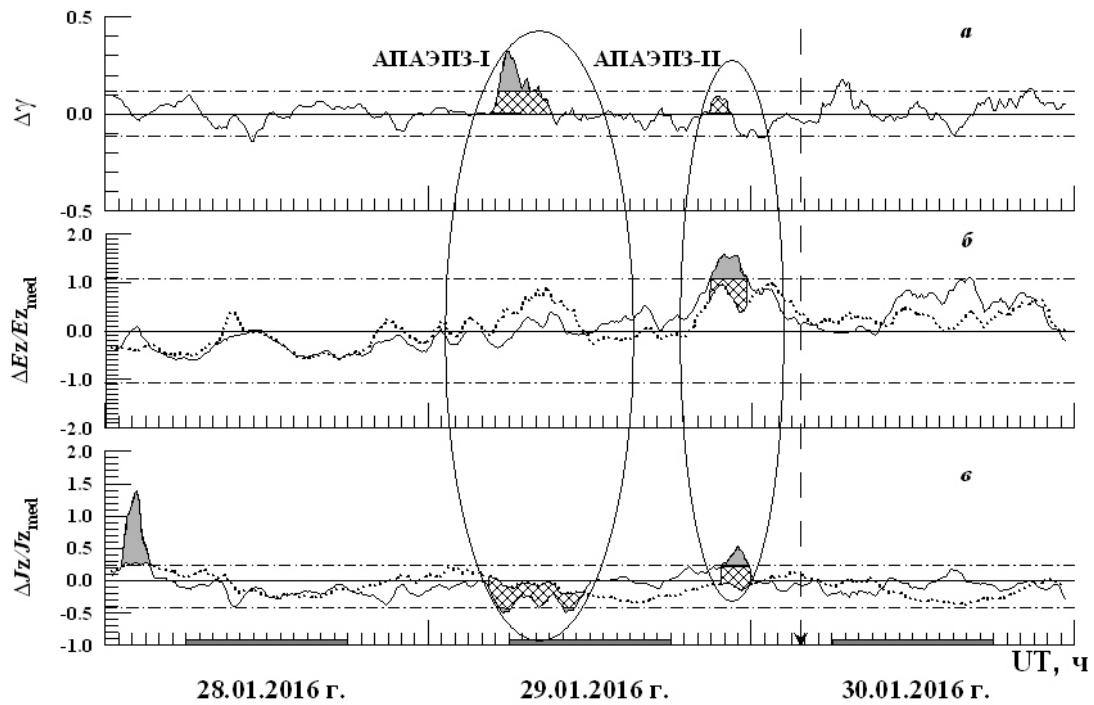


Рисунок 2.60 — То же, что и на рис. 2.58, но для электрических характеристик приземного слоя атмосферы: а –  $\Delta\gamma$ ; б –  $\Delta E_z/E_{z_{med}}$ ; в –  $\Delta J_z/J_{z_{med}}$ . Выделены две группы аномалий (эллипсы АПАЭПЗ-I и АПАЭПЗ-II) и отдельно – аномалия  $\Delta J_z/J_{z_{med}}$  в начале суток 28.01.2016 г. Пунктирные линии на панелях б и в показывают вариации этих же параметров в соответствии с «теоретической» моделью зависимости  $E_z = E_z(\lambda_\Sigma)$  (см. рис. 2.59)

тарны. Можно только отметить, что этот «выброс» приращения действующей высоты  $\Delta h' E_s$  в ионосфере возникает по времени несколько позже, чем возмущение в приземном электричестве, когда аномалия в  $\Delta J_z/J_{z_{med}}$  уже успела развиться.

Более детальное сопоставление рис. 2.60 с рис. 2.58 (путем совмещения их временных осей) обнаруживает следующее. Аномалии в группе ВИПЗ-II появляются практически синхронно с началом аномалии в КАЭП  $\Delta E_z/E_{z_{med}}$ , с незначительной задержкой. В группе ВИПЗ-I ситуация несколько сложнее. Аномальные изменения частотных параметров ионосферы, тесно связанные со структурой спорадического слоя  $E_s$ , также начинаются с задержкой (незначительной для  $\Delta f_o E_s/f_o E_{s_{med}}$ ,  $\Delta f_b E_s/f_b E_{s_{med}}$ , и около 4 часов для  $\Delta f_o F_2/f_o F_{2_{med}}$ ) после начала аномалий в группе АПАЭПЗ-I величин  $\Delta J_z/J_{z_{med}}$  и  $\Delta\gamma$ . Однако высотная его характеристика  $\Delta h' E_s$ , начинает свой аномальный ход раньше примерно за три часа до того, как значения  $\Delta J_z/J_{z_{med}}$  станут аномально низкими (оставаясь отрицательными). Тем не менее, из рис. 3 видно, что на протяжении этих трех часов величина  $\Delta J_z/J_{z_{med}}$  не только отрицательна, но и проходит существенно ниже «теоретической» кривой для  $\Delta J_z/J_{z_{med}}$ , т. е. несмотря на то, что возмущение  $\Delta J_z/J_{z_{med}}$  по своей величине еще не выходит за нижнюю границу своего разброса, высота ионосферного слоя  $E_s$  растет, прежде чем в нем начнутся существенные его структурные изменения, что конечно, требует какого-то времени.

Сопоставление рис. 2.58 и рис. 2.60 показывает хорошую корреляцию между аномалиями групп ВИПЗ-I и АПАЭПЗ-I, равно как и групп ВИПЗ-II и АПАЭПЗ-II, и, в основном, более раннее развитие аномалий в приземном электричестве по сравнению с развитием аномалий в ионосфере. Наблюдение такого совпадения во временном ходе аномалий в ионосфере и электричестве приземной атмосферы перед землетрясением 30.01.2016 г. свидетельствует в пользу гипотезы о том, что эти аномалии могут быть связаны с процессом подготовки землетрясения и являются ионосферными предвестниками землетрясения (ИПЗ) и электрическими предвестниками (ЭПЗ) этого землетрясения соответственно.

Здесь необходимо отметить, что выделенные в ионосфере группы аномалий ВИПЗ-I,-II наблюдались на очень спокойном геомагнитном фоне. Для иллюстрации этого на рис. 2.61 приведены временные вариации Vz-компоненты межпланетного магнитного поля (ММП) и Кр-индекса 29-30 января 2016 г., построенные по данным <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html> (штриховая линия со стрелкой отмечает момент землетрясения). Хорошо видно, что величина Кр-индекса во все часы суток не превышала уровня 1-, а величина Vz-компоненты ММП не опускалась ниже уровня -2.5 нТл. Кроме этого, сам факт появления хорошо выраженного спорадического слоя Es также является косвенным свидетельством спокойной геомагнитной обстановки, так как в зоне геомагнитных широт 30 – -50° наблюдается отрицательная корреляция вероятности появления Es с магнитной активностью (см. [172]), а геомагнитная широта obs. «Паратунка» составляет ~ 46°.

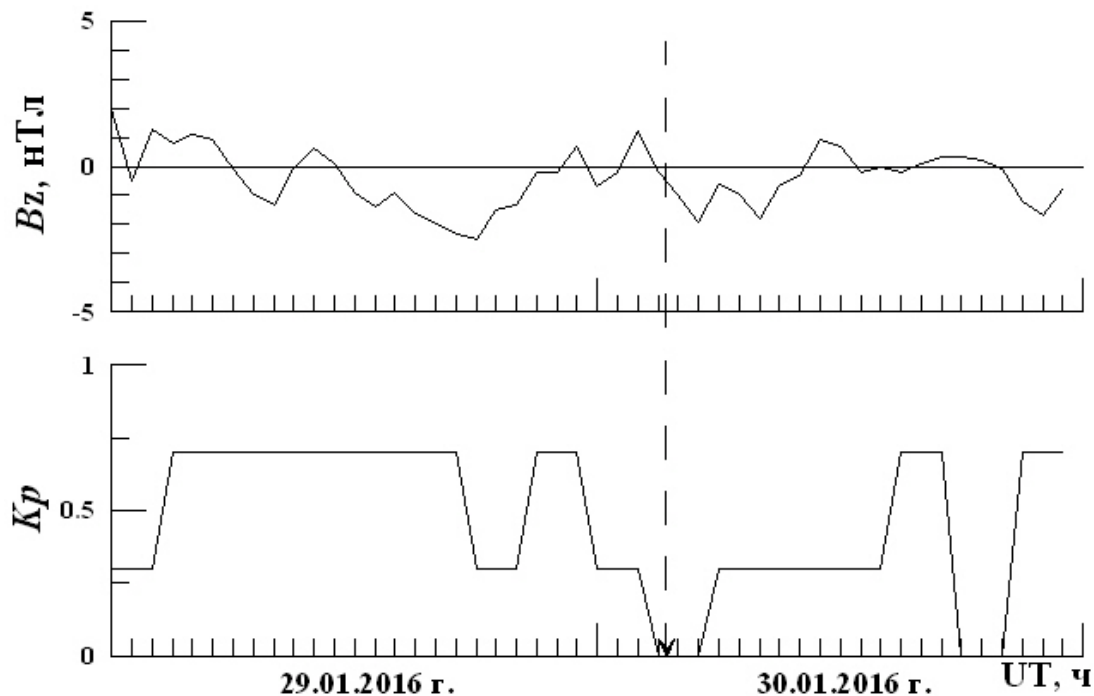


Рисунок 2.61 — Временные вариации Vz-компоненты межпланетного магнитного поля (верхняя панель) и Кр-индекса (нижняя панель) 29–30 января 2016 г. Штриховая линия со стрелкой отмечает момент землетрясения

Вообще говоря, анализ ионосферных возмущений всегда требует особой и тщательной проверки на их возможную связь с геомагнитными возмущениями. Так, в работе [173], направленной на изучение сейсмоионосферных аномалий по измерениям интегральной характеристики – полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере, показано, что при определенных условиях, отрицательные экскурсы Vz-компоненты ММП величиной  $-5 \dots -7$  нТл достаточны для того чтобы вызвать превышение медианного фонового уровня ПЭС в пределах 20–30%.

Однако, если даже переносить эти результаты на наш случай без учета того, что в нашем исследовании фигурируют локальные параметры ионосферы, можно увидеть что, с одной стороны минимальный уровень «отсечки» для определения аномалии в частотных параметрах, полученный нами, составляет  $\sim 23\%$  (для  $\Delta f_oF2/f_oF2_{med}$ , для других частотных параметров он только выше), а с другой стороны, интерполируя результат работы [173] до наблюдаемого в нашем случае предельного отрицательного значения Vz-компоненты ММП  $-2.5$  нТл, получим максимальную абсолютную величину возможного отклонения от фона  $\sim 7.5\%$ , которая может быть связана с этим отрицательным экскурсом Vz-компоненты ММП.

### **Выводы по подразделу**

Проведен сопоставительный анализ данных пятнадцатиминутных измерений вертикального зондирования ионосферы и десятиминутных измерений вертикальной компоненты ( $E_z$ ) приземного квазистатического атмосферного электрического поля (с соответствующими ему величинами электропроводности приземного слоя воздуха  $\lambda_+$  и  $\lambda_-$ ) на комплексной геофизической обсерватории «Паратунка» за период с 28.01.2016 г. по 30.01.2016 г. Цель состояла в обнаружении возможных аномалий, предшествующих землетрясению магнитудой  $M = 7.2$ , произошедшему 30.01.2016 г. в 03:25 UT с эпицентральной дистанцией 117 км от обсерватории.

Выделенные группы возмущений в ионосфере, предшествующие землетрясению (ВИПЗ-I,-II), как оказалось, хорошо коррелируют по времени с аномалиями в приземном атмосферном электричестве, предшествующими землетрясению (АПАЭПЗ-I,-II). С учетом ранее проведенных исследований по обнаружению ионосферных предвестников землетрясений для Камчатского региона, выполненных в работе [167], с высокой степенью вероятности можно считать, что выделенные аномалии в ионосфере были ионосферными предвестниками землетрясения (ИПЗ), а соответствующие им аномалии в приземном атмосферном электричестве были электрическими предвестниками землетрясения (ЭПЗ).

### **Аномалии в метеорологических параметрах и в электрическом поле атмосферы**

Впервые нестационарные аномалии уходящего от Земли потока инфракрасного (ИК) излучения были обнаружены на спутнике NOAA-AVHRR при пролете над Среднеазиатской сейсмически активной зоной [174, 175]. Оказалось, что за несколько дней до землетрясений (ЗТ) наблюдаются положительные аномалии ИК-излучения (преимущественно в ночное вре-

мя), а наиболее сильный эффект проявляется в предрассветные часы. Явление проявляется на больших пространственных вдоль разломов перед коровыми землетрясениями с магнитудой  $M > 4.5$ . Одновременные измерения температуры почвы и воздуха позволили сделать вывод, что источник уходящего ИК - излучения находится либо непосредственно на поверхности, либо под землей. Это явление вызвало большой интерес как дополнительный признак предстоящего ЗТ в совокупности с другими геофизическими аномалиями до него, но, возможно, и как главный фактор в изучении механизмов литосферно – ионосферного взаимодействия. Исследования этого эффекта проводились либо только по космическим снимкам потоков излучений, зарегистрированных на серии спутников (NASA), например, [176, 177, 178] либо с использованием одновременных записей на метеорологических спутниках GOES [179]; либо по измерениям температуры и дебита воды в бассейне реки [180]. Тепловые аномалии были обнаружены также в вариациях температуры атмосферы по данным метеорологических станций в течение несколько недель до сильных землетрясений в Мексике в период с 1973 по 2003 г. [181].

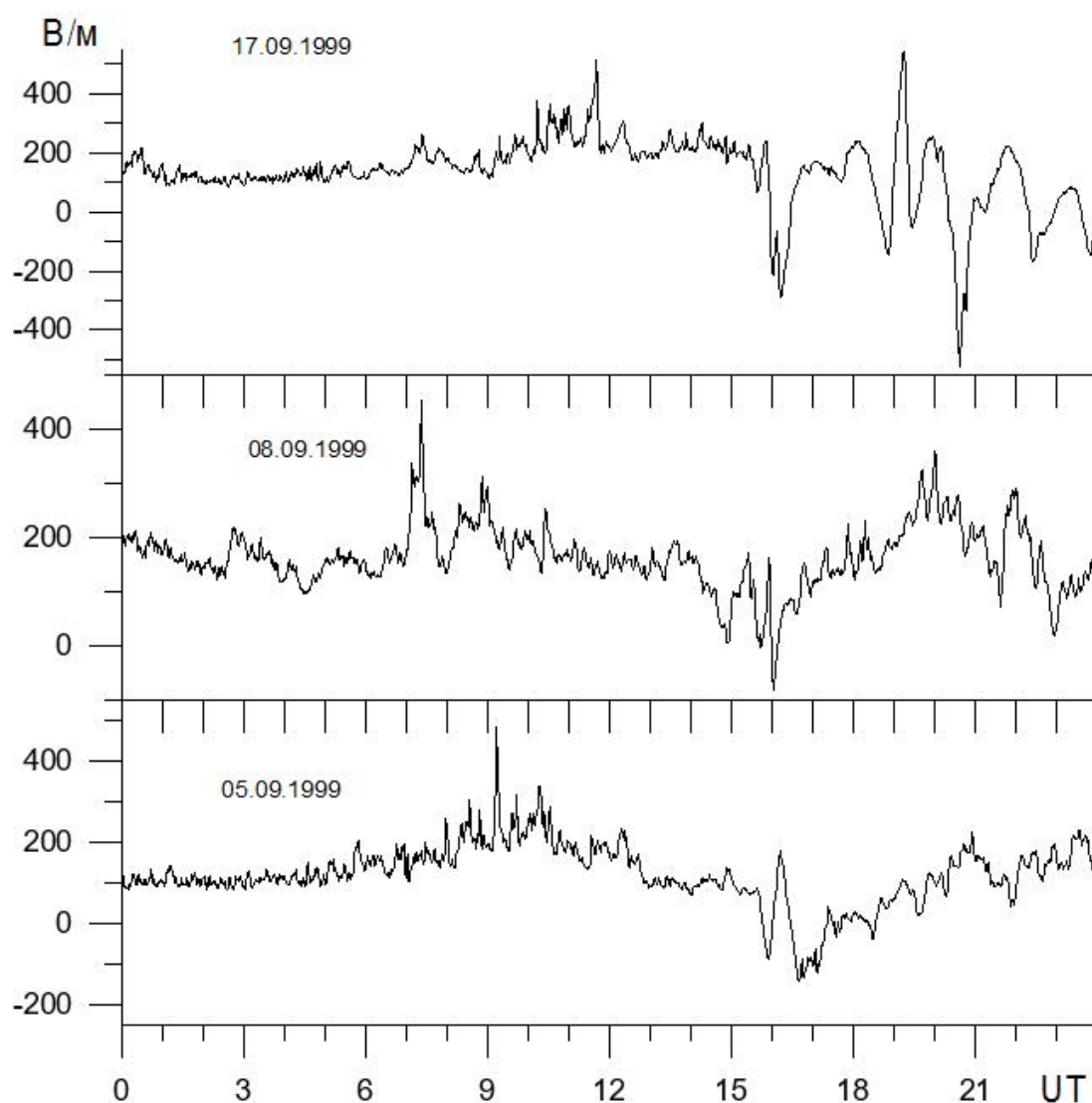


Рисунок 2.62 — Аномалия электрического поля первого типа накануне трех землетрясений (см. Таблицу 2.14)

Насколько известно, до настоящего времени отсутствуют одновременные исследования тепловых аномалий и квазистатического электрического поля в приземной атмосфере в сейсмически активных зонах накануне сильных землетрясений. Впервые аномалия электрического поля необычного вида была зарегистрирована на Камчатке перед ЗТ с магнитудой  $M = 7.0$  13 ноября 1993 г. [182]. Одновременно наблюдалось усиление естественного электромагнитного излучения на частоте  $f = 1.2$  кГц, в то время как на других частотах (5.4; 8.3 кГц) эффект отсутствовал (характерное явление для локальной грозовой активности [183]). Временная форма аномального электрического сигнала представляла собой колебания большой интенсивности, характерные для локальной грозовой активности [184, 183]. Этот аномальный электрический сигнал автор [182] отнес ко второму типу, в отличие от аномалии первого типа, показанной в качестве примера на рис. 2.62 накануне трех ЗТ (см. Таблицу 2.14). Как видно, сигналы этого типа представляют собой бухтообразное понижение интенсивности длительностью несколько часов (в некоторых случаях даже со сменой знака [185]) и наблюдаются преимущественно накануне относительно слабых ЗТ [186, 187, 188, 185, 189]. Традиционно аномалии электрического поля такого вида объясняют влиянием радона на электропроводность приземной атмосферы, поступающего в атмосферу Земли. В процессе активного образования трещин перед ЗТ концентрация его заметно возрастает. В свою очередь, интенсивность радиоактивных газов зависит и от метеорологических величин: температуры, относительной влажности и давления атмосферы, в вариациях которых в более ранних публикациях перед ЗТ были выделены предвестники [190]. Очевидно, что наличие аномалий электрического поля двух типов указывает на их различную природу, обусловленную сложным взаимодействием между электрическими и метеорологическими процессами в приземной атмосфере перед ЗТ.

Таблица 2.14 — Характеристики землетрясений

n	Дата	Время	$\varphi^\circ\text{N}$	$\lambda^\circ\text{E}$	h, км	M
1	06.09.1999	15:04:52.81	52.10	159.15	55	5.0
2	09.09.1999	14:02:01.59	47.51	154.33	33	5.6
3	18.09.1999	21:28:33.17	51.21	157.56	60	6.0
4	12.11.2006	14:42:24	55.164	165.295	37.4	5.0
5	15.11.2006	11:14:13.57	46.592	153.266	30.3	8.3
6	08.01.2007	16:23:38.00	54.297	159.170	136.5	4.6
7	11.01.2007	04:27:26.32	60.955	165.478	10.0	5.0
8	13.01.2007	04:23:21.16	46.243	154.524	10.0	8.1
9	13.01.2007	17:35:22.51	54.796	166.192	10.0	4.9
10	13.01.2007	17:37:06.31	46.913	156.276	10.0	6.0
11	22.01.2016	13:26:45	49.819	155.768	67.2	4.8
12	26.01.2016	05:05:18	51.207	157.446	72.2	4.8
13	28.01.2016	16:42:11	46.366	152.347	44.6	4.8

14	30.01.2016	00:16:39	48.529	153.465	152.9	5.2
15	30.01.2016	03:25:12	53.978	158.546	177.0	7.2
16	30.01.2016	03:57:02	53.605	158.802	172.4	4.5
17	30.01.2016	06:53:49	54.181	158.712	156.4	4.6
18	31.01.2016	04:25:58	46.824	150.543	146.2	4.6

В настоящей работе проанализированы суточные вариации электрических величин (электропроводность воздуха и напряженность квазистатического электрического поля) в совокупности с вариациями метеорологических величин (температура, относительная влажность, давление и скорость ветра) в приземной атмосфере Камчатки накануне сильных ЗТ.

### Исходные экспериментальные данные

Рассмотрены суточные вариации электрических и метеорологических величин в обл. «Паратунка» ДВО РАН накануне трех сильных землетрясений с магнитудой  $M > 7$ , произошедших на Камчатке в 2006, 2007 и 2016 гг. Напряженность квазистатического электрического поля ( $E_z$  – компонента, В/м) измерена прибором «Поле-2»; электропроводность атмосферы, обусловленная отдельно положительными ( $\sigma^+$ ) и отрицательными ( $\sigma^-$ ) ионами (либо фСм/м, либо в относительных единицах) – прибором «Электропроводность-2»; давление (P, гПа), температура (T, °C), влажность (H, %), скорость ветра (V, м/с) – цифровыми станциями WS-2000 и WS-2300. Все величины измерены с дискретностью по времени 10 мин.

На рис. 2.63 приведены записи суточных вариаций наблюдаемых величин перед землетрясением 15 ноября 2006 г.  $t = 11:14$  UTC;  $M = 8.3$ ;  $h = 30.3$  км; ( $46.614^\circ N, 153.23^\circ E$ ) в период с 7 по 15 ноября ( $R = 10^{0.43M} = 3707$  км;  $r \sim 800$  км, где R – радиус сейсмически активной зоны в коре Земли накануне ЗТ [191], r – расстояние от обсерватории до эпицентра). 7 ноября при скорости ветра менее 4 м/с, практически неизменном давлении, в отсутствии облачности (данные местной метеостанции) в приземной атмосфере сохранялись условия «хорошей погоды» [192]. В этих условиях наблюдались слабые суточные вариации величины  $E_z$  в пределах  $100 \pm 50$  В/м (на рисунке левая ось ординат); слабые вариации электропроводностей обоих знаков; регулярный суточный ход температуры с максимумом  $+5^\circ\text{C}$  в местный полдень (01.30 UT) и минимумом  $-3^\circ\text{C}$  перед восходом Солнца; регулярный суточный ход относительной влажности (в противофазе с температурой) от 40 до 70% соответственно. Эти условия в приземной атмосфере сохранялись и в предшествующие дни до 7 ноября.

Как видно на рисунке, в период с 7 ноября наблюдался положительный тренд температуры, связанный с включением дополнительного источника тепла, который действовал в течение десяти дней до 16 ноября, последовательно повышая среднюю температуру атмосферы от  $+1$  до  $+6^\circ\text{C}$ , вопреки отрицательному тренду в это время года [193]. Относительная влажность воздуха в нарушение регулярного суточного хода сохранялась практически неизменной и

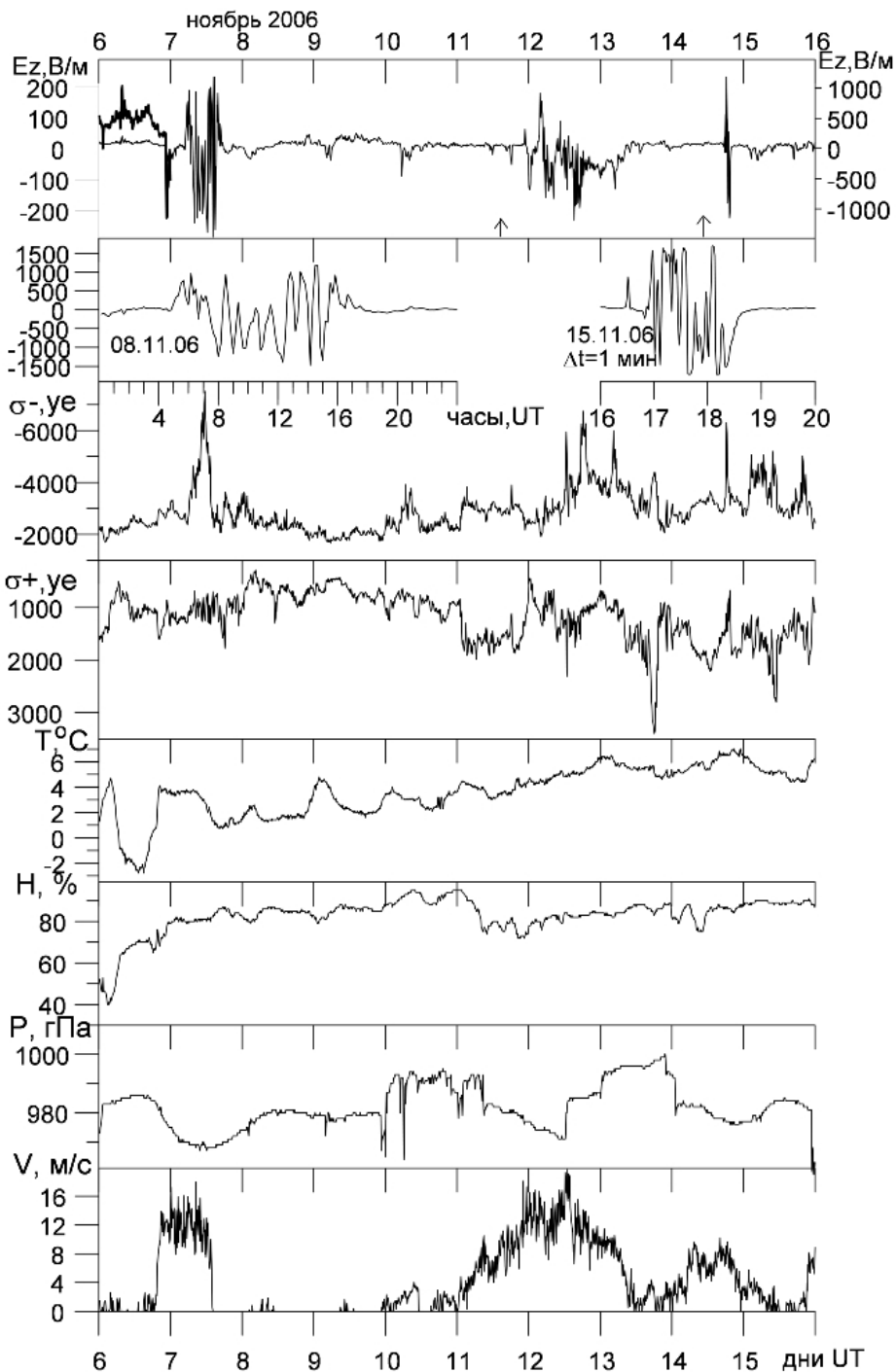


Рисунок 2.63 — Динамика суточных вариаций электрических ( $E_z$  - компоненты поля, электропроводности  $\sigma^+$  и  $\sigma^-$ ) и метеорологических (температуры  $T^{\circ}\text{C}$ , относительной влажности  $H, \%$ , давления атмосферы  $P$  и скорости ветра  $V$ ) величин перед землетрясением 15 ноября 2006 г. Стрелки на рисунке – моменты землетрясений (см. Таблицу 2.14)

очень высокой:  $\sim 90\%$  и выше. Одновременно, согласно данным [193], зарегистрированы обильные осадки. В некоторые дни (8, 13, 15 ноября) на графике температуры появились кратковре-



менные всплески  $\Delta T \sim 2^\circ\text{C}$ , которые сопровождалось появлением в вариациях электрического поля знакопеременных колебаний большой интенсивности:  $\pm 1000\text{ В/м}$  (правая ось ординат; на вставке более детально с шагом дискретизации  $\Delta t = 1$  мин показаны аномалии электрического поля второго типа 8 и 15 ноября) и значительным ростом электропроводности (особенно отрицательного знака), связанной с обильными осадками и в два-три раза превышающей значения в условиях «хорошей погоды». Одновременно наблюдалось резкое понижение атмосферного давления и усиление ветра до  $16\text{ м/с}$ , т.е. происходили метеорологические явления, характерные для условий локальной грозовой активности в приземной атмосфере. Эти процессы наблюдались до момента сильного ЗТ, указанного стрелкой на рисунке, и сохранились на следующий день после него. Далее источник дополнительного тепла как бы выключился, и во второй половине дня 16 ноября восстановились условия «хорошей погоды».

На рис. 2.64 приведены суточные вариации наблюдаемых величин при землетрясении 13 января 2007 г.:  $t = 04:23\text{ UTC}$ ;  $M = 8.1$ ; ( $46.48^\circ\text{N}$ ,  $154.07^\circ\text{E}$ ,  $h = 10\text{ км}$  ( $R = 3041\text{ км}$ ;  $r \sim 850\text{ км}$ ). В этом случае процессы в приземной атмосфере развивались так же, как и при землетрясении 15 ноября 2006 г. А именно: 3 и 4 января в атмосфере сохранялись условия «хорошей погоды» со слабым ветром; низким давлением; регулярным суточным ходом температуры от  $-15^\circ\text{C}$  до  $-27^\circ\text{C}$  и низкой относительной влажностью ( $\sim 40\%$ ); низкими значениями электропроводности и со слабо возмущенными вариациями электрического поля в пределах  $50\text{--}120\text{ В/м}$  (отдельный фрагмент на рисунке с левой осью ординат). 5 января включился дополнительный источник тепла, благодаря действию которого температура возросла до  $-10^\circ\text{C}$ . При этом при постоянстве давления и низкой относительной влажности в полтора-два раза увеличилась электропроводность и уменьшилась напряженность электрического поля ниже  $50\text{ В/м}$ . При дальнейшем росте температуры 7 января усилился ветер до  $20\text{ м/с}$ , возросла относительная влажность до  $90\%$ , и в электрическом поле возник отклик до величины  $\sim 1500\text{ В/м}$ , который сопровождался высокой температурой и высокой относительной влажностью (согласно данным местной метеослужбы, ливневыми осадками). Благодаря осадкам, несущим объемные заряды, электропроводность обоих знаков увеличилась более чем в два раза по сравнению с условиями «хорошей погоды» и испытывала заметные колебания в течение этого периода. Данные этого рисунка интересны тем, что при высокой температуре, но низкой влажности наблюдаются усиление электропроводности и соответственно ослабление электрического поля. Мощные всплески электрического поля грозовой природы происходили в условиях, когда температура аномально возросла (практически до нуля) при столь же аномально высокой относительной влажности ( $\sim 100\%$ ).

На рис. 2.65 показаны суточные вариации наблюдаемых величин при землетрясении 30 января 2016 г.  $t = 03:25:12\text{ UTC}$ ;  $M = 7.2$ ; ( $53.98^\circ\text{N}$ ,  $158.55^\circ\text{E}$ ),  $h = 172.4\text{ км}$  ( $R = 1247\text{ км}$ ;  $r = 500\text{ км}$ ). В отличие от предыдущих случаев, поведение рассматриваемых величин иное. В суточном ходе температуры отсутствует положительный тренд, но выделяются два периода повышенных значений: 20 и 25–27 января, когда среднесуточные значения возросли до  $-2^\circ\text{C}$  и до  $-6^\circ\text{C}$  соответственно при нерегулярных вариациях относительной влажности. В этот пе-

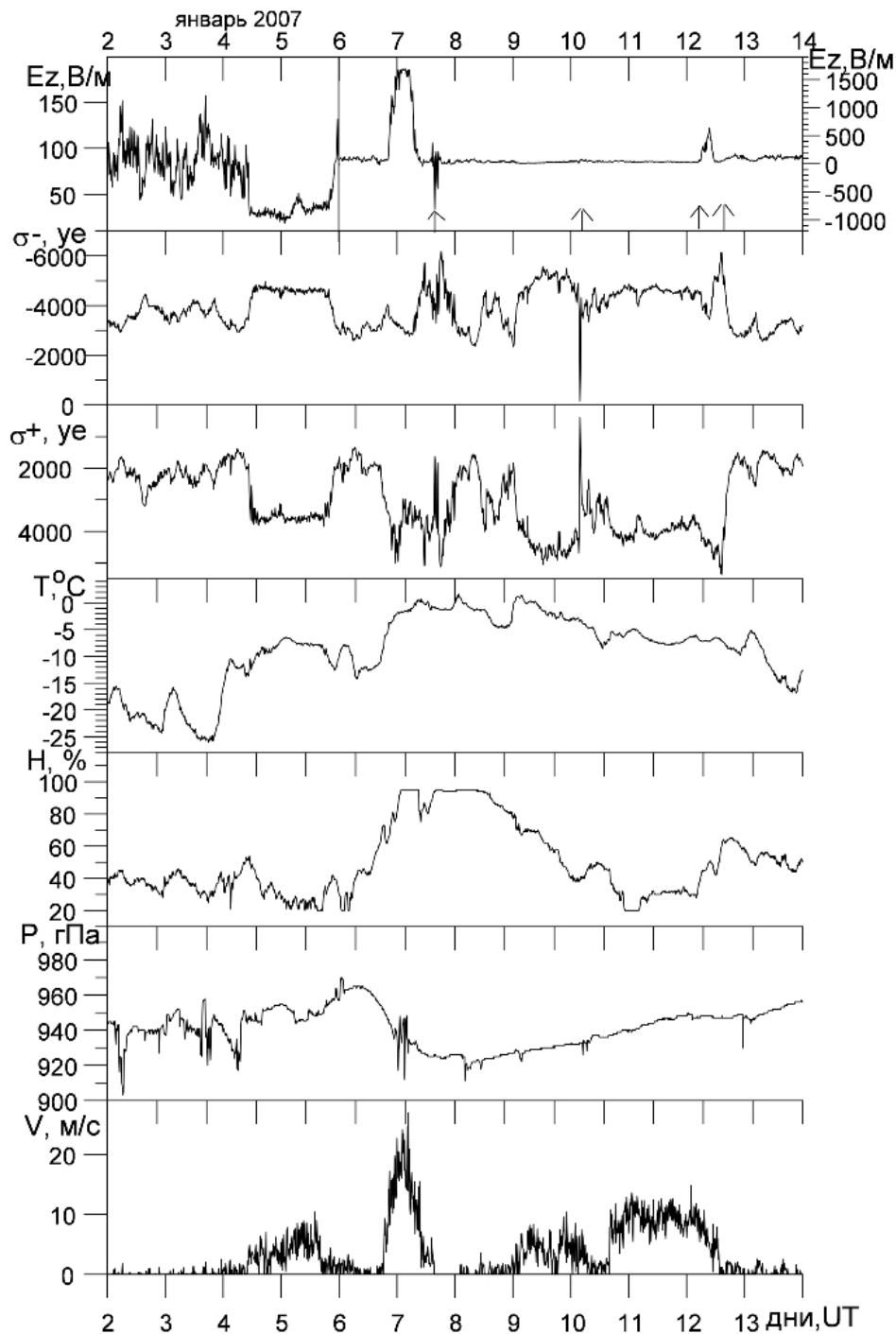


Рисунок 2.64 — То же, что и на рис. 2.63, но перед землетрясением 13 января 2007 г.

риод наблюдалось усиление ветра до 15 м/с. Согласно [193], в эти дни выпал обильный снег, в результате чего в несколько раз возросла электропроводность и в вариациях электрического поля наблюдались сильные всплески до 1000 В/м, характерные для таких метеорологических условий. Для сравнения, в условиях «хорошей погоды», когда скорость ветра была ниже 4 м/с 18 и 23-24 января, в вариациях температуры отмечался регулярный суточный ход, отсутствующий

щий в суточных вариациях относительной влажности, высокое атмосферное давление, низкая электропроводность и характерные слабые вариации электрического поля (левая ось ординат). По-видимому, в указанные выше дни действовал дополнительный источник тепла.

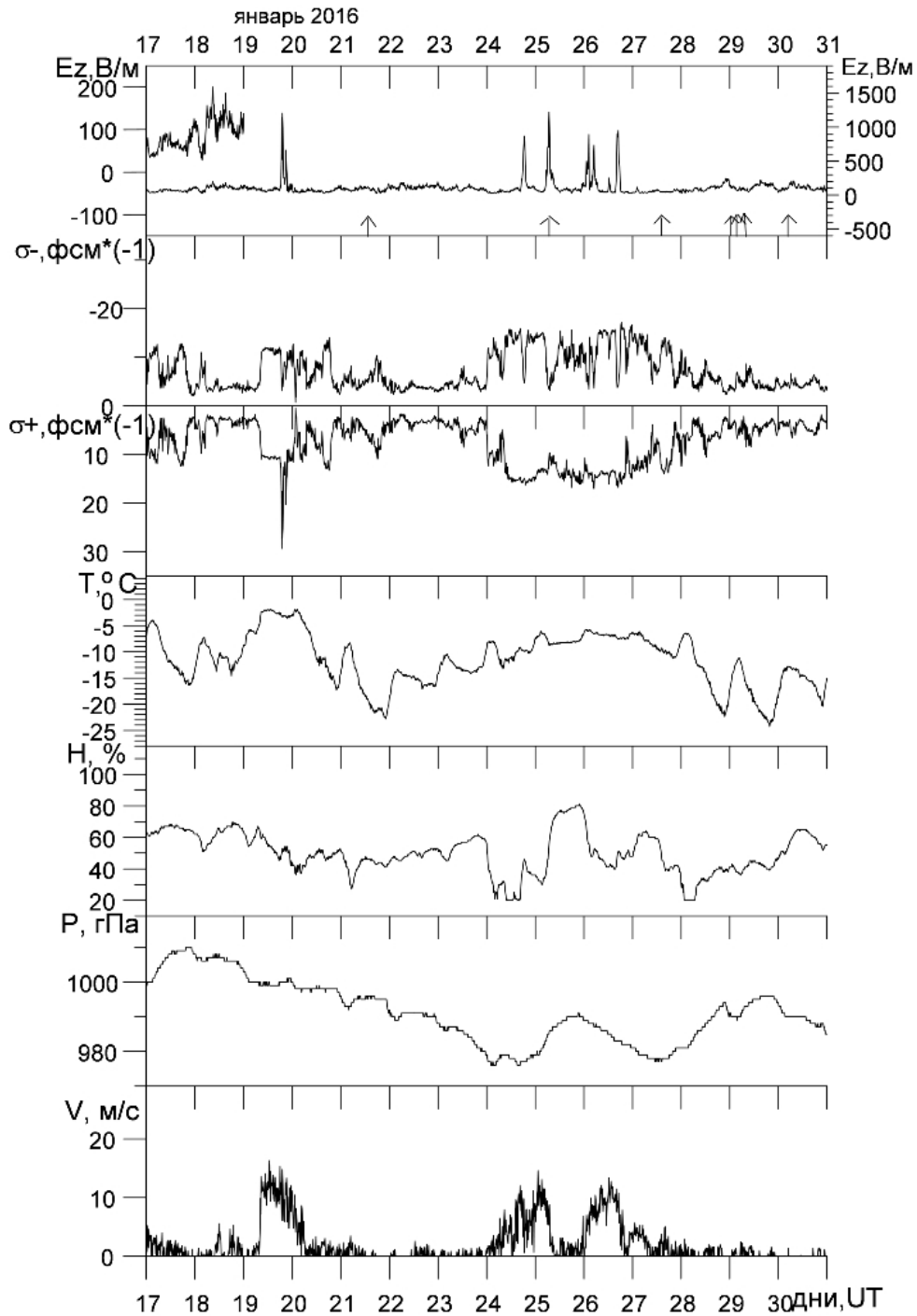


Рисунок 2.65 — То же, что и на рис. 2.63, но перед землетрясением 30 января 2016 г.

## Обсуждение результатов и выводы

Как следует из архивов метеослужбы [193], зимние грозы на Камчатке случаются в среднем один раз в пять лет. Это редкое метеорологическое явление сопровождается обильными осадками в виде ледяного дождя или ливневого снега. Именно такое явление (по данным местной метеослужбы) наблюдалось в периоды рассмотренных нами трех сильных ЗТ в ноябре 2006 г., январе 2007 г. и январе 2016 г. с магнитудами  $M = 8.3; 8.1; 7.2$  соответственно. Для возникновения грозовой активности в эти месяцы недостаточно тепла, поступающего от Солнца. Следовательно, для образования кучево-дождевых облаков, определяющих состояние грозовой активности в приземной атмосфере, необходим дополнительный источник теплового излучения. Проследим последовательно эффекты зимней грозы в суточных вариациях рассмотренных нами величин. Появилась аномалия электрического поля как знакопеременного, так и однополярного вида величины  $E \sim 1000 - 1500$  В/м, в десятки раз превышающей сигнал в условиях «хорошей погоды». Такой вид сигнала характерен в условиях грозовой активности в теплое время года. Процесс сопровождался шквальным ветром ( $V \sim 15 - 25$  м/с), обильным ливневым снегом, что отразилось в высокой относительной влажности ( $\sim 90 - 100\%$ ), сохраняющейся практически неизменной в течение нескольких дней. Обильный снегопад и высокая влажность привели дополнительно к образованию в приземной атмосфере объемных зарядов, вызвавших сильный рост и изменчивость электропроводности воздуха (величина ее возросла в несколько раз по сравнению с условиями «хорошей погоды»). Но самая заметная аномалия наблюдалась в суточных вариациях температуры воздуха, а именно: в нарушении регулярных суточных вариаций и вопреки регулярному отрицательному тренду. Ее величины в эти зимние месяцы в течение 6–7 суток последовательно возрастали от  $0^\circ\text{C}$  до  $+7^\circ\text{C}$ ; от  $-25^\circ\text{C}$  до  $0^\circ\text{C}$ ; от  $-25^\circ\text{C}$  до  $-5^\circ\text{C}$  соответственно. Можно предположить, что именно этот дополнительный источник теплового излучения вызвал наблюдаемые эффекты в суточных вариациях электрических и метеорологических величин в приземной атмосфере и определил природу аномального электрического сигнала второго типа. Источник этого излучения, как следует из одновременных измерений температуры в почве и на поверхности земли [174], располагается под поверхностью. Интенсивность его и продолжительность действия зависят от магнитуды и глубины землетрясения [194]. Наиболее эффективно его действие проявляется при сильных землетрясениях с магнитудой  $M > 7$ . Влияние этого источника должно проявляться и при более слабых ЗТ, под действием которого усиливается поток почвенного радона и отражается в увеличении электропроводности и возникновении аномального электрического сигнала первого типа [195]. Процесс усиления потоков радиоактивных газов был обнаружен также при сильном землетрясении [196], но его влияние, по-видимому, подавляется более сильными процессами образования кучево-дождевых облаков.

Как видно на рис. 2.62 – 2.65, источник аномального роста теплового излучения включается преимущественно в ночное местное время, ближе к восходу Солнца, т.е. во время отсутствия солнечного источника инфракрасного теплового излучения. Однако природа этой теп-

ловой аномалии и привязка к ночному времени до сих пор не ясна. Существует несколько возможных сценариев этого процесса (см., например, [197]), обсуждение которых выходит за рамки настоящей статьи.

Таким образом, анализ суточных вариаций электрических и метеорологических величин, измеренных одновременно перед сильными землетрясениями с детальностью в 10 мин, впервые позволил исследовать тонкие процессы в приземной атмосфере земли при аномалии температуры. Более того, при слабом потоке естественного теплового излучения в эти сезоны года наблюдаемую динамику электрических и метеорологических процессов, по-видимому, можно объяснить появлением дополнительного источника теплового излучения сейсмической природы. Для завершения картины этих процессов целесообразно в будущем проанализировать записи потоков радиоактивных газов, а также записи уходящего инфракрасного излучения при пролете спутников над Камчаткой во время рассмотренных нами землетрясений.

### **2.5.7 Аномалии в геофизических полях во время экстремальных солнечных событий**

Комплексный анализ эффектов космической погоды по наблюдениям на сети геофизических обсерваторий позволяет раскрыть последовательность и сложность процессов взаимодействия геосферных оболочек во время экстремальных солнечных событий. В данной работе рассматриваются солнечные события 2014 года.

Изучение характера вариаций магнитного поля Земли служит основой оценки свойств и состояния электромагнитных полей в околоземном пространстве. Вследствие воздействия солнечного ветра на магнитосферу Земли изменяются параметры магнитного и электрического полей, интенсивности токов и потоков высыпающихся частиц, возбуждаются разного рода волны [198]. Все эти величины используются для оценки силы магнитной бури, характеризующей воздействие Солнца на околоземное пространство.

Одной из важных задач изучения космической погоды является контроль состояния ионосферы и выделение аномалий [199, 200, 201, 202, 203, 204]. Ионосферные параметры заметно меняются с высотой, зависят от цикла солнечной активности, геомагнитных условий, географических координат и содержат характерные суточные и сезонные изменения [199, 200, 201, 202]. Ионосферные аномалии проявляются в виде значительного отклонения (роста или понижения) концентраций электронов по отношению к фоновому уровню. В большинстве случаев ионосферные возмущения происходят вследствие повышения солнечной и геомагнитной активности, а в сейсмоактивных областях они также могут наблюдаться в периоды повышенной сейсмической активности [199, 200, 201, 205, 206].

Наблюдаемые на поверхности Земли вариации космических лучей являются интегральным результатом различных солнечных, гелиосферных и атмосферных явлений и имеют сложную внутреннюю структуру [83, 207]. Их интенсивность зависит от метеорологических параметров, в частности от температуры и давления воздуха, состояния геомагнитного поля, электро-

магнитной обстановки в Солнечной системе и физических условий в Галактике [83, 207, 208]. В вариациях космических лучей находит отражение 11-летний цикл и 27-дневный солнечный период вращения [207]. Помимо перечисленного в вариациях присутствует суточный ход, обусловленный асимметрией формы магнитосферы, которая изменяется во времени при изменении параметров солнечного ветра [84]. В виду сложной структуры регистрируемых данных для исследований в данной работе применялись методы вейвлет-преобразования и нейронных сетей [30, 14].

Исследования влияния солнечной и геомагнитной активностей на квазистатическое электрическое поле и метеорологические величины в приземной атмосфере на высоких и средних широтах проводятся сравнительно давно. Этому вопросу посвящена довольно обширная литература [см., например, [209, 210]]. Анализ работ, выполненных в последнее время, приведен в работе [211], в которой показана противоречивость полученных результатов и предлагаемых механизмов наблюдаемых эффектов. Ранее нами были рассмотрены эффекты слабой [212] и экстремальной [211] геомагнитных бурь в вариациях градиента потенциала электрического поля (ГЭП). При малых магнитных бурях с плавным началом нет причинно-следственных связей между вариациями ГЭП и горизонтальной компоненты геомагнитного поля в условиях «хорошей погоды». При сильных магнитных бурях галактические космические лучи достигают нижней атмосферы и становятся определяющим фактором ионизации приземного воздуха. В работе [213] обнаружено увеличение электропроводности воздуха в течение двух суток накануне геомагнитной бури 29–30 октября 2003 в результате действия солнечных космических лучей и уменьшение ее во время Форбуш-понижения галактических космических лучей с соответствующим ростом ГЭП. Общий вывод этих работ был такой, что независимо, сильная буря или слабая, при плавном начале магнитной бури и без изменений в электропроводности воздуха не существует и существенных изменений в ГЭП. В данной работе представлены различные солнечные события 2014 года, в том числе и с внезапным началом магнитной бури. Представляло интерес рассмотреть реакции ГЭП на эти события.

### Система наблюдений

Геофизические обсерватории (ГО) и станции (ГС) ИКФИА ИКИР образуют сеть наблюдений в Северо-Восточной части Сибири и Дальнего Востока России (см. Таблица 2.15 и рис. 2.66). В Таблице геомагнитные координаты рассчитаны на момент 2014 г. по модели IGRF12 (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/igrf/gggm/index.html>), представлены виды измерений обсерваторий: М – геомагнитное поле, Е – атмосферное электричество, I – ионосфера, С – космические лучи, L – лидар; Inst – принадлежность: 1 – ИКФИА, 2 – ИКИР.

Таблица 2.15 – Геофизические обсерватории и станции ИКФИА и ИКИР

Obs/Station	IAGA	Географ.		Геомаг.		M	E	I	C	L	Inst.
		lat. (N)	long. (E)	lat. (N)	long. (E)						

Kotelny	KTN	76.00	137.90	66.98	198.39	+					1
Cape Schmidt	CPS	68.88	180.63	64.26	233.02	+			+		2
Chokurdakh	CHD	70.62	147.89	62.38	207.83	+					1
Tixie	TIK	71.60	128.80	62.19	194.34	+					1
Zyryanka	ZYK	65.75	150.78	57.86	212.18	+					1
Zhigansk	ZGN	66.80	123.40	57.19	191.58	+		+			1
Yakutsk	YAK	62.00	129.70	52.65	197.12	+		+			1
Magadan	MGD	60.05	150.73	52.25	214.18	+		+	+		2
Paratunka	PET	52.97	158.25	46.07	222.49	+	+	+		+	2
Khabarovsk	KHB	47.61	134.69	38.60	203.34	+		+			2

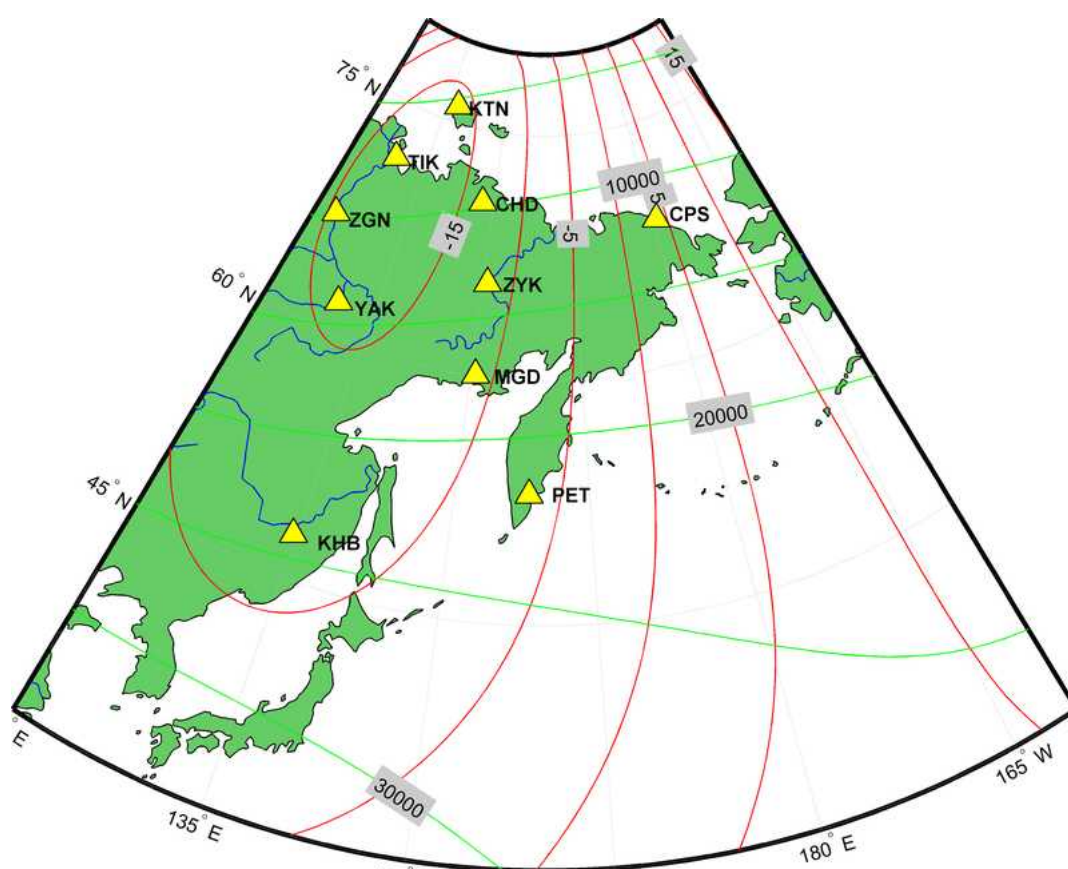


Рисунок 2.66 — Карта расположений обсерваторий ИКФИА И ИКИР. The isolines of magnetic declination and horizontal component were calculated using model WMM2015 (<http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/index.html>) and are shown.

### Методы исследования

а. Моделирование вариаций космических лучей и выделение аномальных изменений на основе совмещения кратномасштабных вейвлет-разложений и нейронных сетей

Для анализа вариаций космических лучей использовалась нейросетевая модель, предложенная в работах [30, 14]. Модель основана на совместном применении кратномасштабных разложений временного ряда и многослойных нейронных сетей прямой передачи сигнала. Описание модели приведено ниже.

На основе кратномасштабных вейвлет-разложений до уровня получено представление данных в виде [35, 36]:

$$f_0(t) = \sum_{j=-1}^{-m} f^d[2^j t] + f^a[2^{-m} t],$$

где  $f^d[2^j t], f^a[2^{-m} t] \in V_{-m}, W_j = \text{clos}_{L^2(R)}(2^{j/2}\Psi(2^j t - n) : n \in Z), \Psi$  - базисный вейвлет;  $V_j = \text{clos}_{L^2(R)}(2^{j/2}\phi(2^j t - n) : n \in Z), \phi$  - скэйлинг-функция,  $j$  - разрешение. Компонента ряда  $f^a[2^{-m} t] = \sum_k c_{-m,n} \phi_{-m,n}(t)$ , где  $c_{j,n} = \langle f, \phi_{j,n} \rangle$ , является сглаженной компонентой, компоненты  $f^d[2^{-m} t] = \sum_k c_{-m,n} \Psi_{-m,n}(t)$ , где  $d_{j,n} = \langle f, \Psi_{j,n} \rangle$ , являются разномасштабными детализирующими компонентами.

В работе использовались вейвлеты семейства Койфлеты, определенные путам минимизации погрешности аппроксимации [30].

Для полученных после разложения компонент выполнялась операция вейвлет-восстановления (отдельно для каждой компоненты):

$$f_0(t) = f_0^{a,(-m)}(t) + \sum_{j=-1}^{-m} f_0^{d,j}(t),$$

где  $f_0^{a,(-m)}(t) = \sum_n c_{0,n}^{(-m)} \phi_{0,n}(t), f_0^{d,j}(t) = \sum_n d_{0,n}^j \Psi_{0,n}(t)$ , верхние индексы  $(-m), j$  соответствуют разрешению компоненты до выполнения операции вейвлет-восстановления.

Далее, на основе нейронной сети, для сглаженной компоненты получено отображение

$$y : f_0^{a,(-m)} \rightarrow f_0^{*a,(-m)}$$

В котором, если  $\hat{f}_0^{a,(-m)}$  действительный выход сети, а  $f_0^{*a,(-m)}$  - желаемый, то  $f_0^{*a,(-m)} = f_0^{a,(-m)}$  - неизвестная функция, а  $\hat{f}_0^{a,(-m)}$  - ее аппроксимация, которую воспроизводит нейронная сеть.

Ошибка сети определяется как разность между желаемым  $f_0^{*a,(-m)} = f_0^{a,(-m)}$  и действительным  $\hat{f}_0^{a,(-m)}$  выходными значениями функции.

Алгоритм построения нейронной сети и выбора уровня разложения представлен в работах [Mandrikova et al., 2014, Mandrikova and Zalyaev, 2015]. Полученная на его основе и используемая в данной работе модель имеет вид:

$$c_{j,n+1}(t) = \phi_m^3 \left( \sum_i \omega_{mi}^3 \phi_i^2 \left( \sum_i \omega_{ii}^2 \phi_i^1 \left( \sum_n \omega_{ln}^1 c_{j,n}(t) \right) \right) \right),$$

где  $c_{j,n} = \langle y, \phi_{j,n} \rangle, \phi_{j,n}(t) = 2^{j/2} \phi(2^j t - 1)$  - скэйлинг-функция,  $\omega_{ln}^1$  - весовые коэффициенты нейрона  $l$  входного слоя сети,  $\omega_{ii}^2$  - весовые коэффициенты нейрона  $i$  скрытого слоя сети,  $\omega_{mi}^3$  - весовые коэффициенты нейрона  $m$  выходного слоя,  $\phi_i^1(z) = \phi_i^2(z) = \frac{2}{1+\exp(-2z)} - 1, \phi_i^3(z) = az + b$ .



Коэффициенты  $c_{j,n}$  – результат отображения исходной функции  $y$  в пространство масштаба  $j$ .

#### б. Выделение геомагнитных возмущений и оценка их интенсивности

В работе использовалось представление Н-компоненты геомагнитного поля, предложенное в работах [14, 30] и имеющее вид:

$$f_0 = \sum_n c_{-m,n} \phi_{-m,n}(t) + \sum_{j \in I} \sum_n d_{j,n} \Psi_{j,n}(t) + \sum_{j \notin I} \sum_n d_{j,n} \Psi_{j,n}(t) = f_{trend}(t) + f_{возмущ}(t) = e(t),$$

где компонента модели  $f_{возмущ}(t) = \sum_n c_{-6,n} \phi_{-6,n}(t)$  описывает невозмущенный уровень горизонтальной составляющей магнитного поля Земли в спокойные периоды, а компонента  $f_{возмущ}(t) = \sum_{j \in I} g_j(t)$ , где  $g_j(t) = \sum_n d_{j,n} \Psi_{j,n}(t)$  описывает геомагнитные возмущения. Компонента  $e(t) = \sum_{j \notin I} \sum_n d_{j,n} \Psi_{j,n}(t)$  является шумовой,  $I$  – набор индексов. В качестве меры магнитной возмущенности компоненты  $g_i(t)$  на масштабе  $j$  использовалась величина  $A_j = \max_n (|d_{j,n}|)$  [14, 30]. Определение набора индексов определялось на основе критерия:

$$j \in I, \text{ если } m(A_j^\nu) > m(A_j^\kappa) + \varepsilon,$$

где  $m$  – выборочное среднее,  $\nu$  – индекс возмущенной вариации поля,  $\kappa$  – индекс спокойной вариации поля,  $\varepsilon$  – некоторое положительное число.

Учитывая эквивалентность дискретных и непрерывных вейвлет-преобразований [35, 36], определяемых как

$$W_{\Psi} f_{b,a} := |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi \left( \frac{t-b}{a} \right) dt, f \in L^2(R), a, b \in R, a \neq 0,$$

в соответствии с введенной выше мерой магнитной возмущенности коэффициента, интенсивность геомагнитных возмущений в момент времени  $t = b$  на анализируемом масштабе оценивалась на основе величины:

$$e_{a,b} = |W_{\Psi} f_{b,a}|$$

Тогда интенсивность возмущений поля в момент времени  $t = b$

$$E_b = \sum_a e_{a,b}$$

в. Выделение аномалий в ионосфере и оценка их параметров на основе непрерывного вейвлет-преобразования

Убывание амплитуды коэффициентов  $|W_{\Psi} f_{b,a}|$  в зависимости от масштаба  $a$  связано с равномерной и точечной гладкостью Липшица функции  $f$  [72, 35]. Когда масштаб  $a$  убывает, амплитуды коэффициентов  $|W_{\Psi} f_{b,a}|$  имеют быстрое убывание до нуля в областях, где функция

$f$  не имеет локальных особенностей [72, 214]. Основываясь на этом свойстве вейвлет-преобразования, для выделения аномальных особенностей в параметрах критической частоты ионосферы использовалась пороговая функция:

$$P_{T_0}(W_{\Psi}f_{b,a}) = \begin{cases} W_{\Psi}f_{b,a}, & \text{если } |W_{\Psi}f_{b,a} - W_{\Psi}f_{b,a}^{med}| \geq T_a \\ 0, & \text{если } |W_{\Psi}f_{b,a} - W_{\Psi}f_{b,a}^{med}| < T_a \end{cases},$$

где порог  $T_a = U * St_a$  – определяет наличие аномалии на масштабе  $a$  вблизи точки  $\xi$ , содержащейся в носителе  $\Psi_{b,a}$ ,  $U$  – коэффициент порога,  $St_a = \sqrt{\frac{1}{\Phi-1} \sum_{k=1}^{\Phi} (W_{\Psi}f_{b,a} - \overline{W_{\Psi}f_{b,a}})^2}$ ,  $\overline{W_{\Psi}f_{b,a}}$  и  $W_{\Psi}f_{b,a}^{med}$  – среднее значение и медиана, определяемые отдельно для каждого часа в скользящем временном окне длины  $\Phi$ .

Для оценки коэффициента порога в работе использовался апостериорный риск [91]. Определение состояния ионосферы выполнялось по данным ионограмм, которые также сопоставлялись с геомагнитными данными (использовался К индекс). С учетом солнечного цикла, оценка порогов для периодов лет с высокой и низкой солнечной активностью выполнялась отдельно.

Если вейвлет  $\Psi$  имеет компактный носитель, равный  $[-\Omega, \Omega]$ , то множество пар точек  $(b, a)$  таких, что точка  $\xi$  содержится в носителе  $\Psi_{b,a}$ , определяют конус влияния точки  $\xi$ . Так как носитель  $\Psi_{b,a}$  на масштабе  $a$  равен  $[b - \Omega a, b + \Omega a]$ , то конус влияния точки  $\xi$  на масштабе  $a$  определяется неравенством

$$|b - \xi| \leq \Omega a$$

Следовательно временная длительность аномалии на масштабе  $a$  определяется конусом влияния точки  $\xi$  и равна

$$H_a = 2\Omega a$$

Интенсивность аномалии в момент времени  $t = b$  оценивалась как

$$I_b = \sum_a |P_{T_0}(W_{\Psi}f_{b,a})|$$

### События 27-30 августа 2014

Геомагнитная буря с постепенным началом зарегистрирована на станциях «Паратунка» (PET) и «Магадан» (MGD) 27 августа 2014 года в период с 09:45 по 10:15 UT. Скорость солнечного ветра с 27 по 29 августа увеличилась от 300 до 480 км/сек, из-за прихода ускоренного потока от выброса корональной массы (СМЕ от 25 августа) и от рекуррентной корональной дыры (<http://ipg.geospace.ru/space-weather-review-20-08-2014.html>). Результаты моделирования вариаций космических лучей показывают, что накануне бури 26 августа наблюдались незначительные локальные колебания относительно их характерного уровня, и ошибка нейронной сети имела локальные возрастания. Геомагнитные возмущения на obs. PET наибольшей интенсивности достигли 27 августа с 10:00 по 10:30 UT и с 18:00 по 19:00 UT (рис. 2 d). По результатам обработки ионосферных параметров 25 августа в дневное время по LT в период выброса

корональной массы в районе Камчатки наблюдалось повышение концентрации электронов и сформировалась положительная ионосферная аномалия, длительностью около 4-5 часов (показана на рис. 2.67 h красным цветом). В период геомагнитной бури 28 августа в ионосфере электронная концентрация существенно понизилась, о чем свидетельствует сформировавшаяся в это время крупномасштабная отрицательная аномалия длительностью около суток, которая достигла наибольшей интенсивности в ночное время по LT (показана на рис. 2.67 h синим цветом).

Во время геомагнитного возмущения 28-30 августа 2014 г. по погодным условиям лидарное зондирование атмосферы на длине волны 532 нм проводилось 29 и 30 августа. По данным obs. PET в эти дни зарегистрировано появление ночных Es корпускулярного типа. На рисунках 2.68a, 2.68b приведены результаты наблюдений за 30 августа. Точками на рисунке 2.68a изображены значения foEs. Для удобства отображения их на одном графике с foF2 все значения foEs увеличены на 3 МГц.

Наблюдается возрастание ночных значений foF2 в интервалах 11:15 – 13:15 и 13:45 – 14:15 UT и возрастание значений суммарного лидарного сигнала от областей 150-200 и 200-300 км в те же промежутки времени. Ночные Es корпускулярного типа появлялись на высотах 100-114 км. Суммарные сигналы от слоев 150-200 и 200-300 км имеют коэффициент корреляции между собой равный 0.78.

Коррелированное поведение лидарных сигналов от разных слоев не характерно для высот более 100 км. Такое поведение лидарных сигналов может быть объяснено резонансным рассеянием на возбужденных ионах атома азота в области 150-300 км во время высыпаний электронов в ионосферу [215].

Электрическое поле приземной атмосферы 27 и 28 августа имело типичный суточный ход в условиях хорошей погоды на obs. PET [149]. Этот ход имеет два максимума в течении суток (рис. 2.71). Главный максимум происходит во время восхода Солнца и обусловлен утренним конвективным генератором, второй происходит в вечернее время и связан с локальным понижением электропроводности воздуха. Локальное время обсерватории смещено на 12 часов относительно мирового времени, поэтому главный максимум происходит в конце суток по UTC. 29 августа суточный ход нарушается, несмотря условия хорошей погоды и глубокий минимум совпадает с главной фазой магнитной бури.

### **События 12-13 сентября 2014**

Геомагнитная буря с постепенным началом 11 сентября 2014 года была зарегистрирована на obs. PET и MGD в 23:30. За пол часа до начала бури, в 23:02 UT, из-за ускоренного потока от коронального выброса (CME 9 сентября от вспышки M4.5/1N) скорость солнечного ветра резко увеличилась с  $v=350$  км/сек до 480 км/сек (<http://ipg.geospace.ru/space-weather-review-10-09-2014.1>). На следующие сутки 12 сентября в 15:27 UT из-за ускоренного потока от коронального выброса (CME 10 сентября от вспышки X1.6/2B) скорость солнечного ветра увеличилась до 670 км/сек,

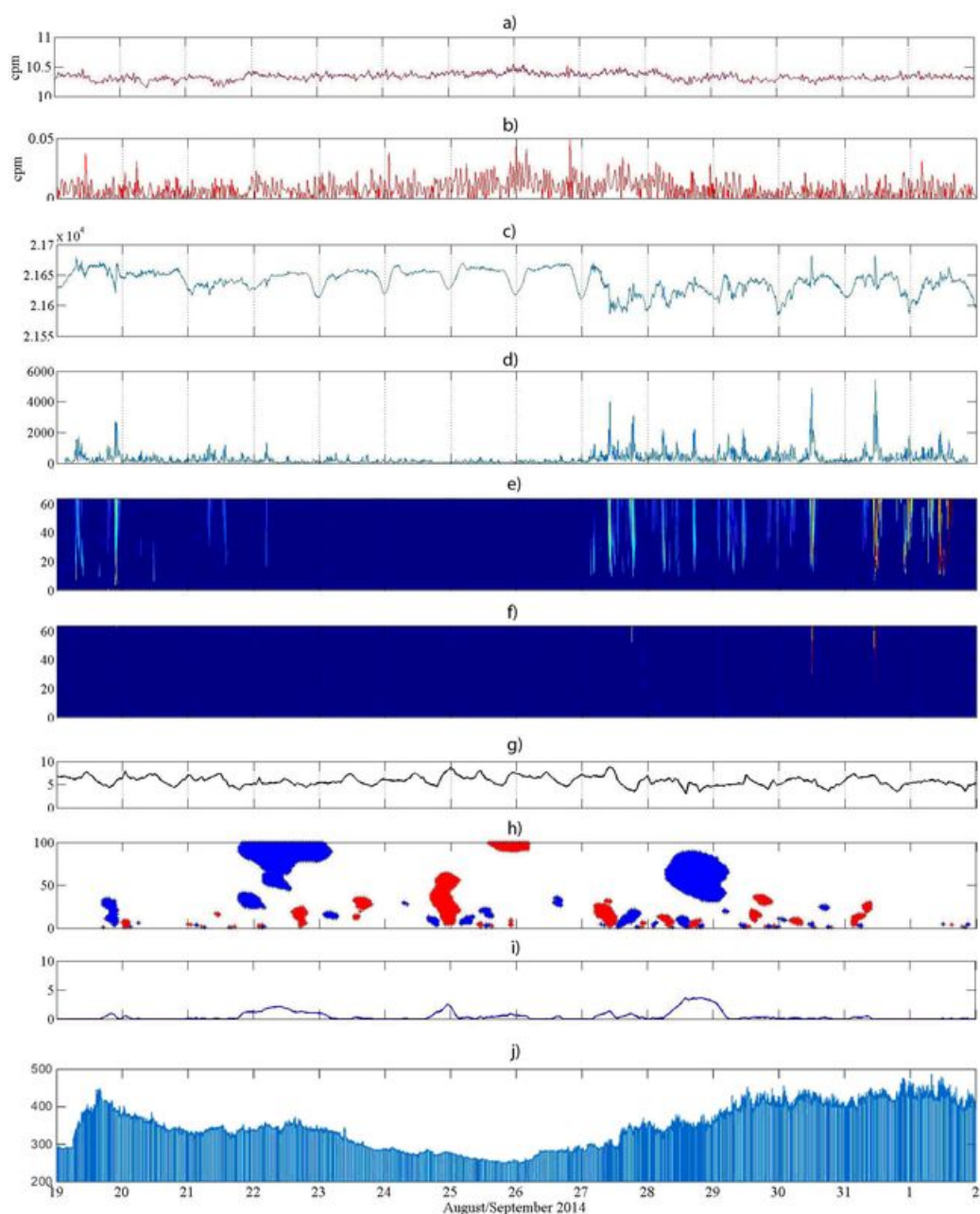


Рисунок 2.67 — Результаты обработки данных за период 19.08 – 01.09 2014г. а) – компонента а5 сигнала нейтронного монитора и её аппроксимация нейронной сетью, obs. MGD; б) – ошибка нейронной сети; в) – Н- компонента магнитного поля Земли, obs. PET; д) – оценка интенсивности геомагнитных возмущений; е) – выделение периодов слабых и сильных геомагнитных возмущений; ф) – выделение периодов сильных геомагнитных возмущений; г) – данные foF2, obs. PET; h) – выделенные аномалии, коэффициент порога  $U = 2.5$ , длина скользящего временного окна  $\Phi = 336$  часов; и) – оценка интенсивности аномалий; j) – скорость солнечного ветра.

затем к концу суток стала  $v=800$  км/сек (<http://ipg.geospace.ru/space-weather-review-10-09-2014.html>). По результатам обработки геомагнитных данных станции Паратунка (Камчатский край) накануне магнитной бури 11 сентября в период с 03:15 по 03:40 наблюдалось локальное повышение геомагнитной активности, максимальные возрастания геомагнитных возмущений в анализиру-

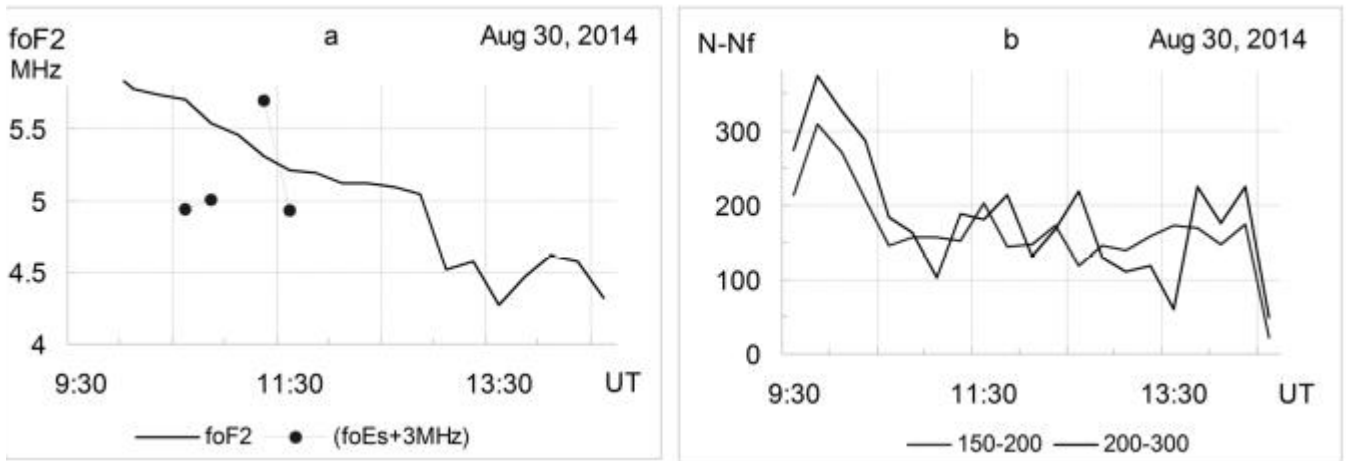


Рисунок 2.68 — Критическая частота слоя F2 ионосферы (а) и лидарный сигнал от слоев 150-200 и 200-300 км (b) во время геомагнитного возмущения 30 августа 2014 года.

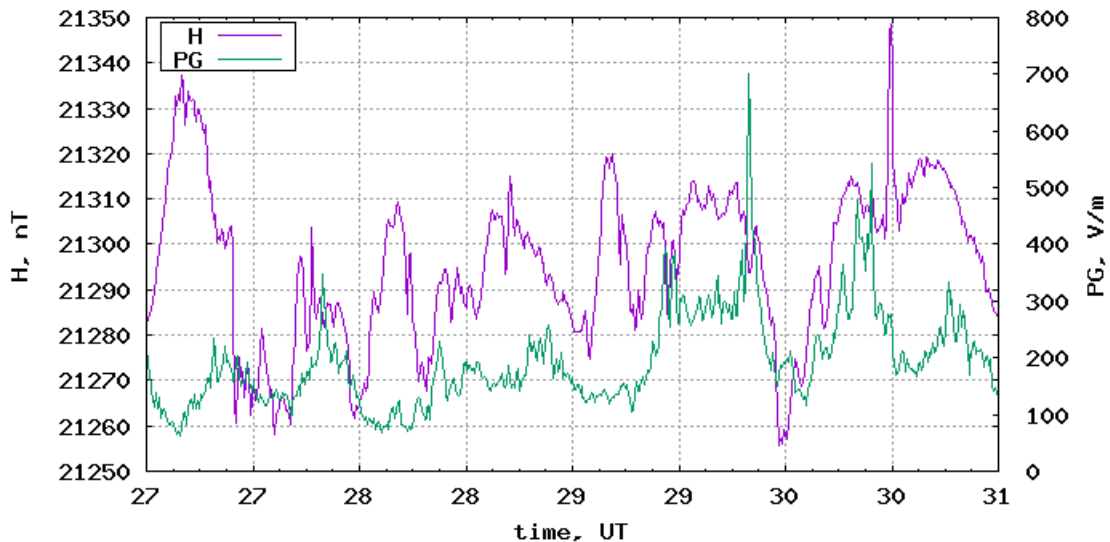


Рисунок 2.69 — Вариации H-компоненты магнитного поля (левая шкала) и градиента потенциала электрического поля (правая шкала) в приземной атмосфере 27-30 августа 2014 года, obs. PET.

еюм районе наблюдались 12 сентября 2014 года в периоды с 15:45 по 16:50 и с 20:30 по 23:30 UT. В период бури вследствие понижения электронной концентрации в ионосфере возникла крупномасштабная отрицательная аномалия длительности около полутора суток (показана на рис. 2.70 j синим цветом). Анализ вариаций космических показывает, что после локального возрастания скорости солнечного ветра произошло понижение их уровня и возникли два коротких Форбуш эффекта, каждый длительностью около суток.

Ускоренные потоки от выбросов корональной массы происходили 15, 17 и 18 и 19 сентября (<http://ipg.geospace.ru/space-weather-review-10-09-2014.html>), вследствие чего в середине суток 19 сентября скорость солнечного ветра возросла с 350 до 560 км/сек и оставалась высокой до 22 сентября. Во время выбросов корональной массы (15, 17 и 18 сентября) в ионосфере происходили колебания электронной концентрации, о чем свидетельствуют мелкомасштабные

аномалии, сформировавшиеся в этот период (рисунок 10.11 j,k.). На obs. РЕТ 19 сентября 2014 в 05:30 зафиксировано возрастание интенсивности геомагнитных возмущений (рис. 2.70 f,g,h). По данным космических лучей в период повышения скорости солнечного ветра 20 сентября возник длительный Форбуш эффект, имеющий более выраженный характер на станции CAPS (рис. 2.70 a,b,c,d).

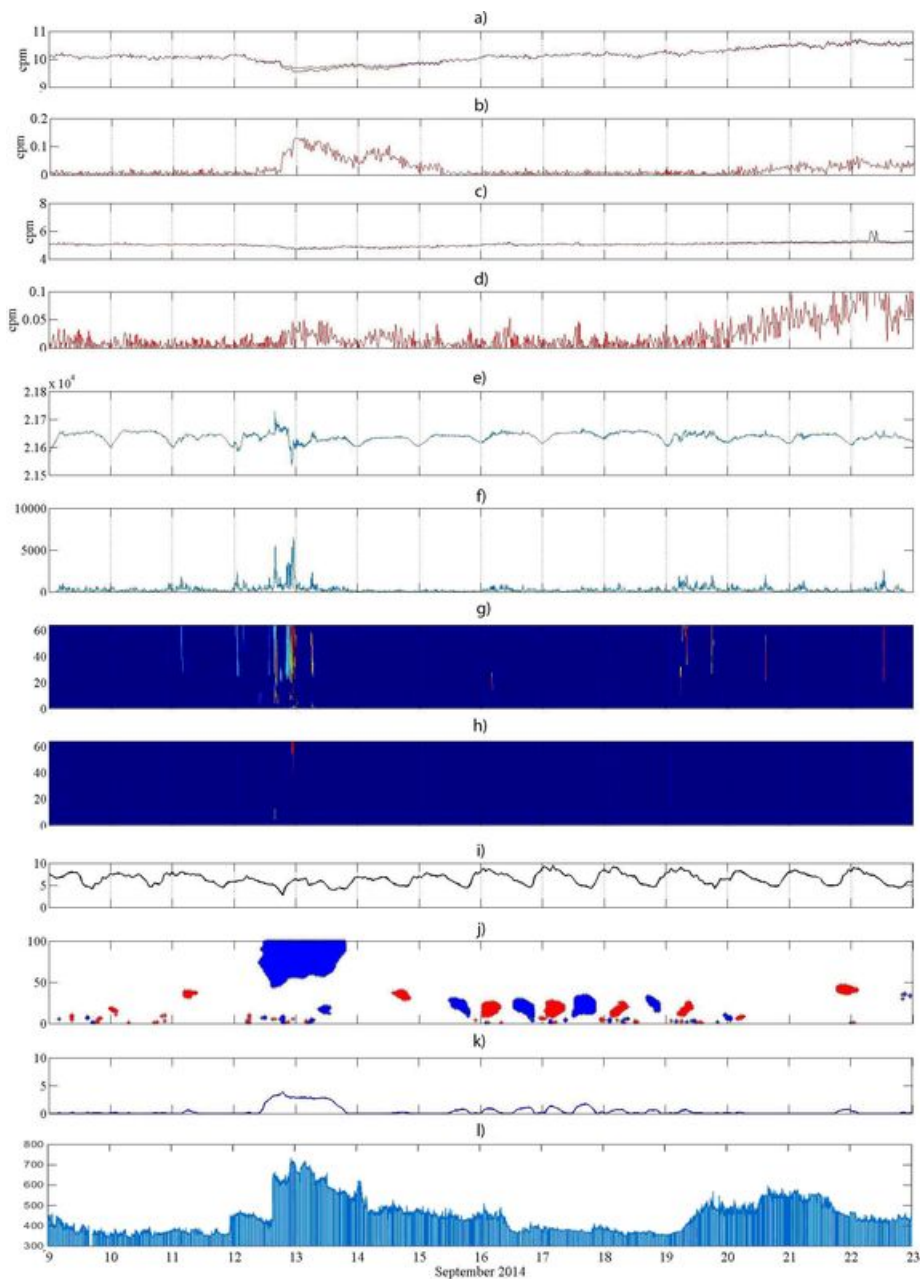


Рисунок 2.70 — Результаты обработки данных за период 09.09 – 22.09 2014 г.

Во время бури 12-13 сентября лидарные наблюдения проводились 12 сентября. В эту ночь фаза Луны была 88%, высота кульминации 44 градуса. Отмечен высокий уровень фоновго сигнала и заметные вариации значений foF2. В таких условиях лидарных сигналов от области верхней атмосферы не выявлено. По данным ионосферных наблюдений obs. РЕТ слой Es корпускулярного типа с частотами 1.5-2.5 МГц наблюдался на высотах 100-130 км в оба дня, что

подтверждает наличие высыпаний электронов с энергиями сотни эВ-единицы кэВ в атмосферу Камчатки. 13 сентября лидарные наблюдения не проводились по погодным условиям.

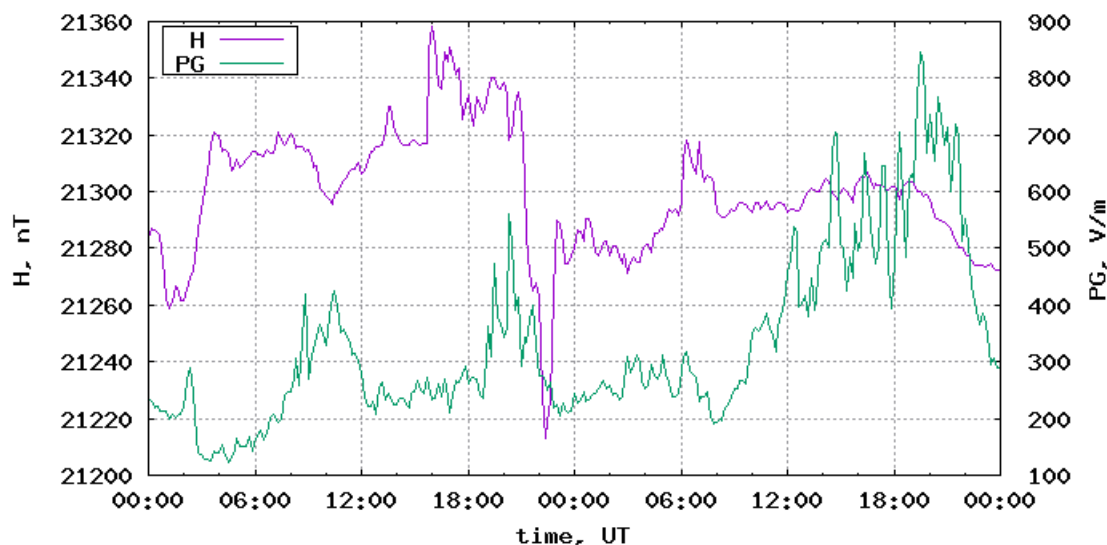


Рисунок 2.71 — Вариации Н-компоненты магнитного поля (левая шкала) и градиента потенциала электрического поля (правая шкала) в приземной атмосфере 12-13 сентября 2014 года, obs. PET.

Электрическое поле приземной атмосферы 12 сентября имело типичный суточный ход в условиях хорошей погоды. 13 сентября погода была пасмурной, суточный ход был нарушен. Существенных изменений в электрическом поле с наступлением магнитной бури замечено не было (рисунок 10.12).

#### События 4-5 ноября 2014

Магнитная буря на obs. PET и MGD была зарегистрирована 4 ноября 2014 г. в 10:10 UT. Скорость солнечного ветра с 31 октября по 1 ноября увеличилась с 300 км/сек до 550 км/сек из-за пересечения секторной границы ММП, активизации коронального волокна в SE-квадранте диска Солнца и выбросов корональной массы (<http://ipg.geospace.ru/space-weather-review-29-10-2014.1>). За сутки до начала магнитной бури, 3 ноября, на станции «Паратунка» (Камчатский край) наблюдалось незначительное повышение концентрации электронов в ионосфере и сформировалась положительная аномалия, длительностью около полутора суток (показана на рис. 2.72d красным цветом). На следующие сутки 4 ноября под влиянием ускоренных потоков от корональной дыры и выброса корональной массы (CME 1 ноября) скорость солнечного ветра увеличилась с 400 до 490 км/сек (<http://ipg.geospace.ru/space-weather-review-29-10-2014.html>). В этот период в районе Камчатки существенно возросли геомагнитные возмущения и достигли наибольшей интенсивности в период с 11:00 по 15:00 UT (рис. 2.72 h). Через несколько часов в ионосфере существенно понизилась электронная концентрация и положительная аномалия сменилась отрицательной, достигшей высокой интенсивности в период основной фазы геомагнитной бури преимущественно в дневное время по LT (показана на рис. 2.72 d синим

цветом). Результаты моделирования вариаций космических лучей показывают о локальных колебаниях их уровня и возникновении последовательности коротких Форбуш эффектов, которые возникли в моменты формирования положительной ионосферной аномалии 3 ноября и достигли наибольшей интенсивности в периоды существенного возрастания геомагнитной активности и формирования отрицательной крупномасштабной аномалии в ионосфере. Кратковременное восстановление уровня космических лучей произошло только 9 ноября, на следующие сутки 10 ноября одновременно с возрастанием геомагнитной активности вновь произошло понижение их уровня.

Во время геомагнитного возмущения 1-4 ноября лидарные наблюдения не проводились по погодным условиям.

В ночное время 1-2 ноября слои Es с частотой 2-2.5 МГц, в том числе и однозначно корпускулярного типа, появлялись на высотах около 100 км.

3 ноября ночные Es появлялись в промежутках 6:30 -7:00 UT и 13:00-15:00 UT на высотах около 100 км. В связи с плохим качеством ионограмм однозначно определить тип слоев невозможно.

4 ноября с 7:15 до 9:30 и с 14:00 до 16:00 UT на высотах 100-120 км наблюдались Es с частотой 2-2.5 МГц, тип слоев корпускулярный, и можно говорить о наличии высыпаний электронов в атмосферу в ранние ночные и предутренние часы.

Электрическое поле приземной атмосферы с 1 по 6 ноября было обусловлено плохой погодой с обильными осадками (рисунок 10.14).

### **События 23 декабря 2014**

Магнитная буря зафиксирована на obs. PET 23 декабря в 11:25 UT. Резкие возрастания скорости солнечного ветра происходили с конца суток 21 ноября до середины суток 23 ноября, которые сопровождалась слабыми возмущениями геомагнитного поля. По данным космических лучей obs. MGD в конце суток 21 декабря сформировался длительный Форбуш эффект, наибольшие отклонения вариаций относительно характерного уровня наблюдались в период геомагнитной бури 23 и 24 декабря. В этот же период времени в районе Якутска существенно понизилась электронная концентрация в ионосфере и сформировалась крупномасштабная отрицательная аномалия длительностью около суток, которая наибольшей интенсивности достигла преимущественно в дневное время LT (показана на рис. 2.74g синим цветом).

23 декабря на obs. PET соблюдались условия хорошей погоды. Электрическое поле приземной атмосферы накануне магнитной бури имело пониженный фон. После внезапного начала магнитной бури начался затухающий колебательный процесс с периодом  $\sim 1$  час (рис. 2.75). Каких-либо значительных изменений в электропроводности приземного воздуха не возникало. Подобная реакция ГЭП на магнитную бурю с внезапным началом наблюдалась 5 апреля 2010г [216].



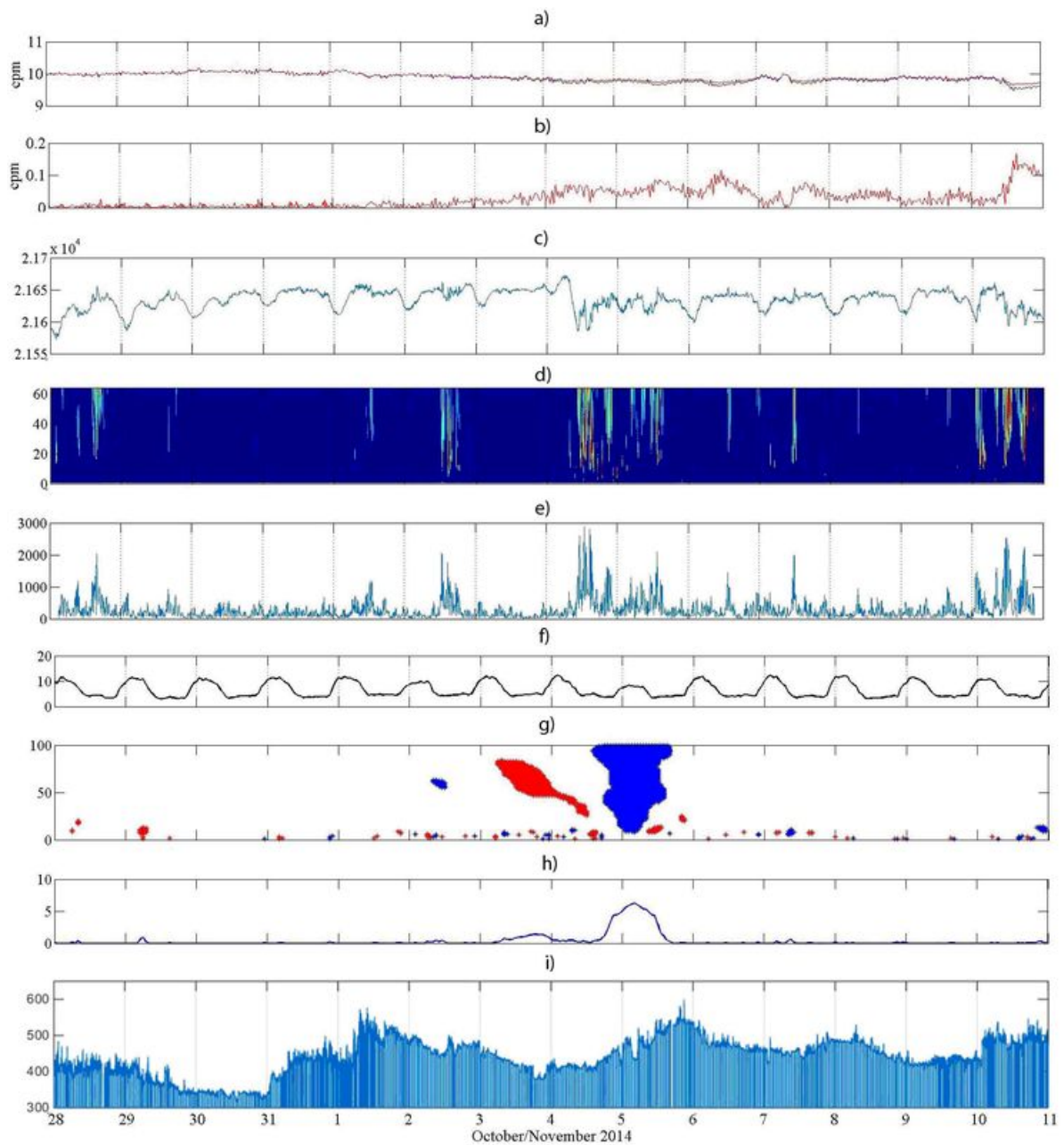


Рисунок 2.72 — Результаты обработки данных за период 28.10 – 10.11 2014г. а) – компонента а<sub>5</sub> сигнала нейтронного монитора и её аппроксимация нейронной сетью, obs. MGD; б) – ошибка нейронной сети; в) – Н- компонента магнитного поля Земли, obs. PET; г) – оценка интенсивности геомагнитных возмущений; д) – выделение периодов слабых и сильных геомагнитных возмущений; е) – выделение периодов сильных геомагнитных возмущений; ж) – данные foF2, obs. PET; з) – выделенные аномалии, коэффициент порога  $U = 2.5$ , длина скользящего временного окна  $\Phi = 336$  часов; и) – оценка интенсивности аномалий; я) – скорость солнечного ветра.

### Обсуждение результатов

Геомагнитные возмущения наибольшей интенсивности происходили в периоды существенного возрастания скорости солнечного ветра. Во время анализируемых событий в ионосфере

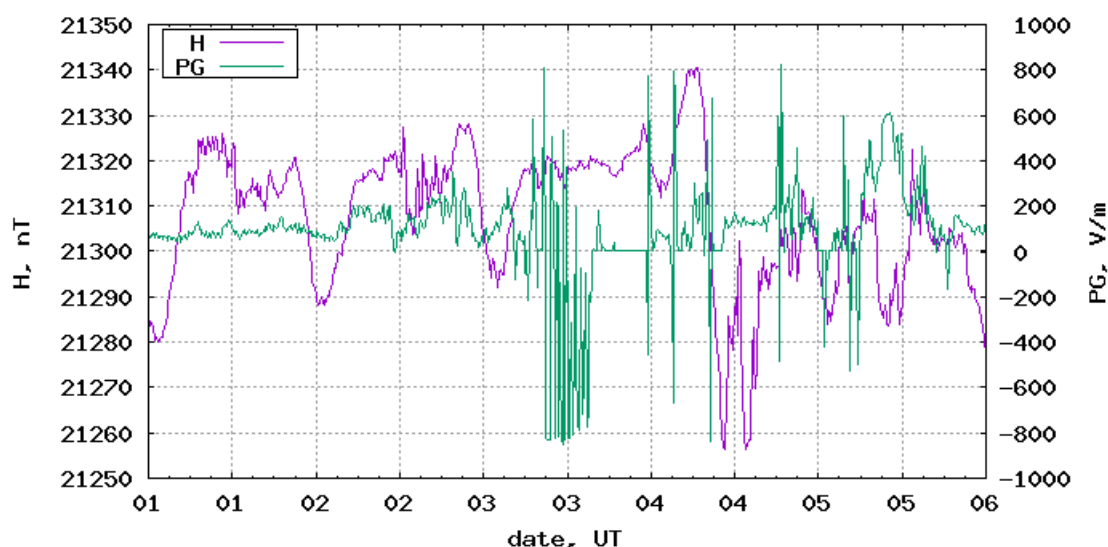


Рисунок 2.73 — Вариации H-компоненты магнитного поля (левая шкала) и градиента потенциала электрического поля (правая шкала) в приземной атмосфере 1-5 ноября 2014 года, obs. PÉT.

ре существенно понижалась электронная концентрация и формировались крупномасштабные отрицательные аномалии. Зафиксированы локальные колебания уровня вариаций космических лучей (короткие и более длительные Форбуш эффекты), которые достигали наибольшей интенсивности в периоды существенного возрастания геомагнитной активности и формирования крупномасштабных отрицательных аномалий в ионосфере. Подобные эффекты наблюдались в периоды событий 5 сентября 2012г. [14]. До моментов начала геомагнитных бурь 4 ноября 2014 г. и 27 августа 2014 года на фоне спокойного и слабовозмущенного геомагнитного поля выделены периоды аномального повышения (относительно фона) концентрации электронов в ионосфере, имеющие длительность от несколько часов до полутора суток. В работах [202, 203] подобные предбуревые повышения наблюдались на многих ионосферных станциях в различных широтных и долготных зонах. Вопросы, связанные с механизмом и источником такого эффекта, в настоящее время пока остаются открытыми.

Представляет интерес влияние магнитной бури 23 декабря 2014 на ГЭП. Внезапное начало магнитной бури вызвали большие осцилляции в ГЭП периодом  $\sim 1$  час на среднеширотной обсерватории Паратунка с быстрым затуханием. Авторы [217] предполагают три механизма, посредством которых большая солнечная буря может повлиять на атмосферное электричество.

Первый – это ионизация солнечными космическими лучами до уровня земной поверхности.

Второй – когда солнечная вспышка производит низкоэнергичные частицы, которые входят в атмосферу, но не достигают поверхности земли. В этих условиях, глобальная электрическая цепь будет усиливаться за счет уменьшения сопротивления воздуха в верхних слоях атмосферы, что позволяет увеличить ток проводимости между ионосферой и поверхностью земли, что, в свою очередь, повышает ГЭП.

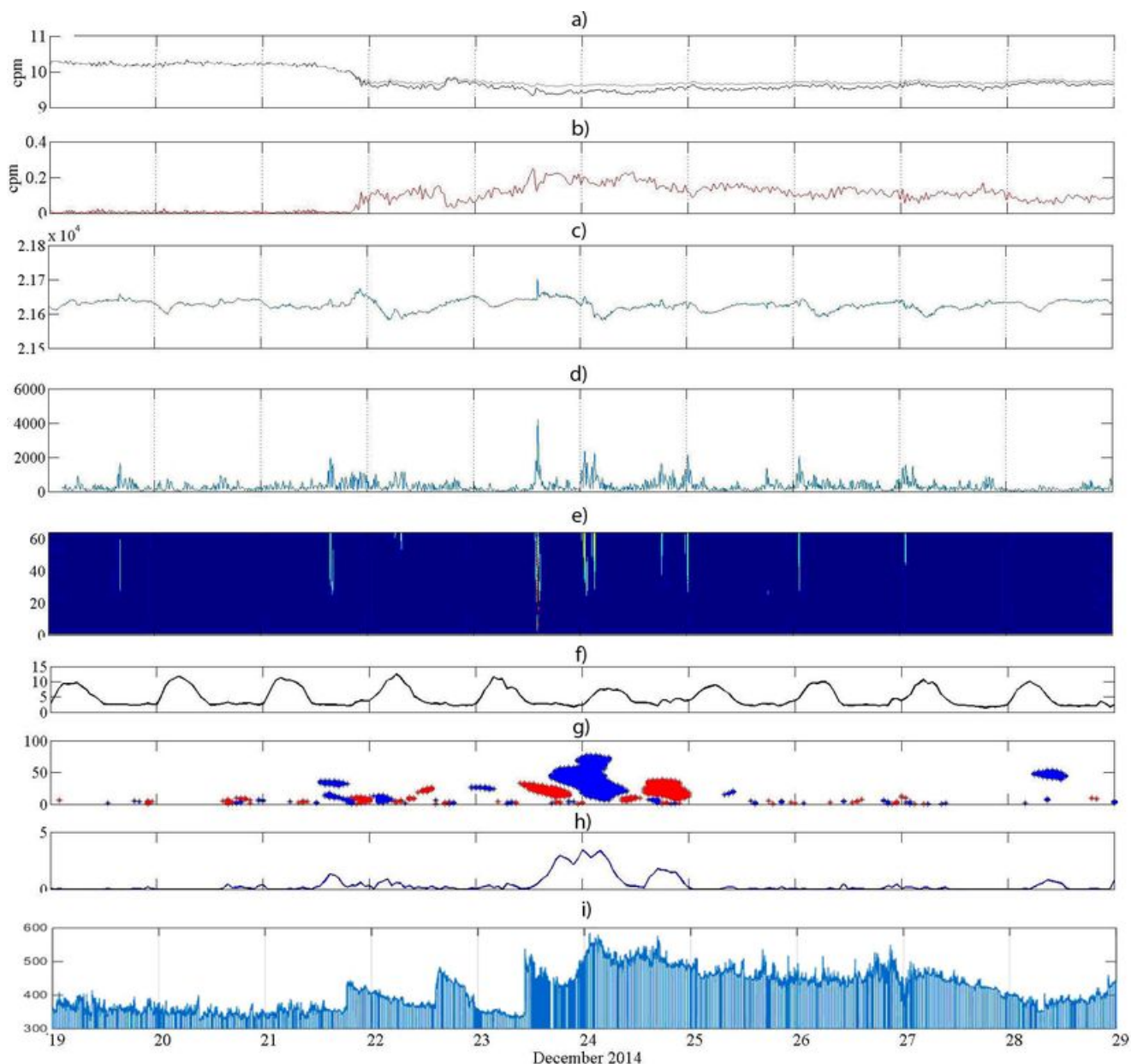


Рисунок 2.74 — Результаты обработки данных за период 19.12 – 28.12 2014г. а) – компонента а $\beta$  сигнала нейтронного монитора и её аппроксимация нейронной сетью, обс. MGD; б) – ошибка нейронной сети; в) – Н- компонента магнитного поля Земли, обс. РЕТ; д) – оценка интенсивности геомагнитных возмущений; е) – выделение периодов слабых геомагнитных возмущений; ф) – данные foF2, обс. YAK; г) – данные foF2, обс. РЕТ; з) – выделенные аномалии, коэффициент порога  $U = 2.5$ , длина скользящего временного окна  $\Phi = 168$  часов; и) – оценка интенсивности аномалий; ж) – скорость солнечного ветра.

Третий механизм происходит через повышение грозовой активности солнечными энергичными частицами, которые бы привести к увеличению тока в глобальной цепи. Ионизация космическими лучами в данный момент не происходило, поскольку в электропроводности воздуха существенных изменений небыло. Третий механизм вызвал бы глобальный эффект на других станциях, чего не наблюдалось. Второй механизм является вполне возможным претен-

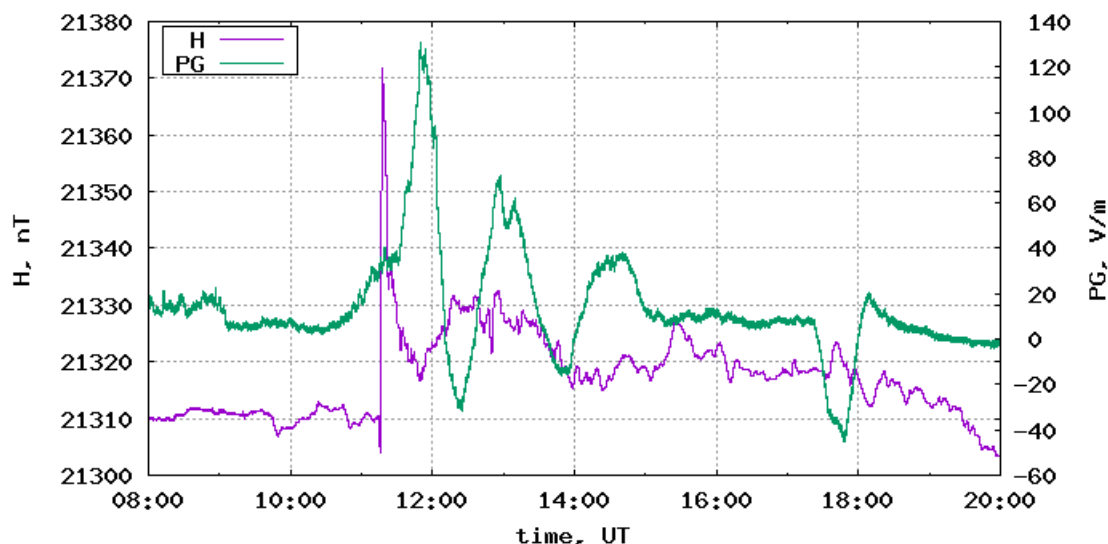


Рисунок 2.75 — Вариации H-компоненты магнитного поля (левая шкала) и градиента потенциала электрического поля (правая шкала) в приземной атмосфере 23 декабря 2014 года, obs. PЕТ.

дентом. Однако возможны и другие причины объяснения данного эффекта. Обращает на себя внимание тот факт, что большие осцилляции в ГЭП вызваны не столько большой интенсивностью магнитной бури, сколько резким фронтом её начала. Напротив, большие бури с плавным началом никак не отразились в ГЭП приземного слоя атмосферы, что отмечалось в работе [211]. Подобный эффект проявил себя во время бури 5 апреля 2010. Тогда во время внезапного начала магнитной бури был большой всплеск ГЭП. Поскольку этот процесс скорее всего имеет быстрозатухающий характер, то осцилляции себя не проявили [216].

### Выводы по подразделу

Анализ космической погоды по событиям 2014 года, выполненный по наблюдениям в северо-восточном регионе России, выявил следующие эффекты:

- а) во время солнечных вспышек были обнаружены мелкомасштабные ионосферные аномалии, в основном положительные, имеющие различную интенсивность;
- б) геомагнитные возмущения с наибольшей интенсивностью происходили в периоды значительного увеличения скорости солнечного ветра;
- в) во время главных фаз геомагнитных бурь в ионосфере электронная плотность значительно уменьшилась и были сформированы большие отрицательные аномалии;
- г) были выделены крупномасштабные положительные аномалии в ионосфере, возникающие перед началом геомагнитных бурь и имеющие продолжительность день и более;
- д) были выделены локальные колебания вариаций космических лучей (Форбуш-эффекты), которые достигли наибольшей интенсивности в периоды значительного увеличения

геомагнитной активности и с появлением крупномасштабных негативных ионосферных аномалий;

- е) внезапное начало магнитной бури привело к возбуждению колебательных процессов в атмосферном электричестве.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Yu.I. Yermolaev, M.Yu. Yermolaev Solar and Interplanetary Sources of Geomagnetic Storms: Space Weather Aspects // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. – 2010. – Vol. 46(7). – P. 799-819.
- 2 Будько Н. И., Зайцев А. Н., Карпачев А. Т., Козлов А. Н., Филиппов Б. П. – под ред. А. Н. Зайцева, *Космическая среда вокруг нас, ТРОВАНТ, Троицк*. – 2006. – 232 с.
- 3 Soloviev A. et al. *Data Science Journal*. – 2013. – Vol. 12. doi:10.2481/dsj.WDS-019
- 4 Nayar S.R.P., Radhika V.N. and Seena P.T. Investigation of substorms during geomagnetic storms using wavelet Techniques. In: *Proceedings of the ILWS Workshop Goa, India, February 19-24*. – 2006
- 5 Hafez A.G., Ghamry E., Yayama H. and Yumoto K. Systematic examination of the geomagnetic storm sudden commencement using multi resolution analysis. *Advances in Space Research*. – 2013. – Vol. 51. – P. 39-49.
- 6 Xu Z., et al. An assessment study of the wavelet-based index of magnetic storm activity (WISA) and its comparison to the Dst index. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* – 2008. – Vol. 70. – P.1579-1588.
- 7 Jach A. et al. Wavelet-based index of magnetic storm activity. *J. Geophys. Res.* – 2006 – 111. doi:10.1029/2006ja011635.
- 8 Zaourar N., Hamoudi M., Manda M., Balasis G., Holschneider M. Wavelet-based multiscale analysis of geomagnetic disturbance // *Earth Planets Space*. – 2013. – Vol. 65(12). – P. 1525-1540.
- 9 Macpherson K.P., Conway A.J., Brown J.C. Prediction of solar and geomagnetic activity data using neural networks // *J. Geophys. Res.* – 2001. – Vol. 100. – P. 735-744.
- 10 Н.М. Ротанова, Т.Н. Бондарь, В.В. Иванов Вейвлет-анализ вековых геомагнитных вариаций // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 2004. – Т. 44 – No2 – С.276-282.
- 11 Woolley JW, Agarwarl PK, Baker J Modeling and prediction of chaotic systems with artificial neural networks. *Int J Numer Methods Fluids*. – 2010. – No. 63, doi:10.1002/flid.2117
- 12 Rybk J, Antalov A, Storini M The wavelet analysis of the solar and cosmic-ray data. *Space Sci Rev* 97:359-362. 2001
- 13 Paschalis P, Sarlanis C, Mavromichalaki H Artificial neural network approach of cosmic ray primary data processing. *Sol Phys*. – 2013. – 182(1). – P. 303-318
- 14 Mandrikova O.V., Solovev I.S., Zalyaev T.L. Methods of analysis of geomagnetic field variations and cosmic ray data // *Earth Planet Space*. – 2014. – Vol. 66. – No 1. doi:10.1186/s40623-014-0148-0.
- 15 Golovkov V.P., Papitashvili V.O., Papitashvili N.E. Automated calculation of the K indices using the method of natural orthogonal components, *Geomagn. Aeron.* – 1989. – Vol. 29. – P. 667-670.

- 16 Menvielle M., Papitashvili N., Hakkinen L., Sucksdorff C. Computer production of K indices: review and comparison of methods // *Geophys. J. Int.* – 1995. – Vol. 123. – P. 866-886.
- 17 O. V. Mandrikova, S. E. Smirnov, and I. S. Soloviev Method for Determining the Geomagnetic Activity Index Based on Wavelet Packets. *Geomagnetism and Aeronomy.* – 2012. – Vol. 52. – No. 1 – P. 111-120.
- 18 Nowozynski K., Ernst T., Jankowski J. Adaptive smoothing method for computer derivation of K-indices // *Geophys. J. Int.* – 1991. – Vol. 104. – P. 85-93.
- 19 Krasnoperov R. I., Soloviev A. A. Analytical geoinformation system for integrated geological-geophysical research in the territory of Russia // *GornyiZhurnal.* – 2015. –Vol.10. – P.89-93. doi: 10.17580/gzh.2015.10.16.
- 20 Bogoutdinov, S.R., Gvishiani, A.D., Agayan, S.M., Solovyev, A.A., Kihn, E. Recognition of Disturbances with Specified Morphology in Time Series. Part 1: Spikes on Magnetograms of the Worldwide INTERMAGNET Network. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth.* – 2010. – Vol. 46 (11). – P. 1004-1016.
- 21 Sidorov R.V., Soloviev A.A., BogoutdinovSh.R. Application of the SP algorithm to the INTERMAGNET magnetograms of the disturbed geomagnetic field // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth.* – 2012. – Vol.48(5). – P.410-414.
- 22 Uwamahoro, J. McKinnell, L.A.; Habarulema, J.B. Estimating the geoeffectiveness of halo CMEs from associated solar and IP parameters using neural networks // *Annales Geophysicae.* – 2012. – Vol. 30. – P. 963-972.
- 23 Mahrous A., Radi A., Youssef M., Faheem A., Ahmed S., Gopalswamy N. Prediction of the interplanetary Coronal Mass Ejection and it's associated shock by using neural network // 38th COSPAR Scientific Assembly in Bremen, Germany. – 2010. D23-0052-10.
- 24 G. Pallochia, E. Amata, G. Consolini, M. F. Marcucci, and I. Bertello Geomagnetic Dst index forecast based on IMF data only. *AnnalesGeophysicae.* – 2006 – Vol. 24. – P. 989-999. [www.ann-geophys.net/24/989/2006/](http://www.ann-geophys.net/24/989/2006/)
- 25 A.S. Smirnova, S.D. Snegirev, O.A. Sheyner Sun ultraviolet radiation as a possible cause of preflare long-period oscillations of geomagnetic field horizontal component. // *Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod.* – 2013. – 6 (1). – P. 88-93
- 26 Мандрикова О.В., Жижикина Е.А. Автоматический способ оценки состояния геомагнитного поля // *Компьютерная оптика.* – 2015. – Т. 39. – 3. – С. 420-428.
- 27 Мандрикова О.В., Жижикина Е.А. Нейросетевая система по оценке возмущенности геомагнитного поля // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки.* – 2016. – 3(14). – С. 34-39.
- 28 Mandrikova O.V., Zhizhikina E.A. A neural network system for estimation of the geomagnetic field disturbance // *Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений: 7 международная конференция, с.Паратунка, Камчатский край, 29 августа - 2 сентября 2016 г. : сб. тез. докл. Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН, 2016. – С. 154-155.*

- 29 Mandrikova O.V., Zhizhikina E.A. Automatic method for estimation of geomagnetic field state // Computer Optics. Number Special. – 2015 – Vol.39 – No.3. – P. 420-428
- 30 Mandrikova OV, Solovjev I, Geppenerc V, Taha A-KR, Klionskiy D. Analysis of the Earth's magnetic field variations on the basis of a wavelet-based approach. Digit Signal Process. – 2013. – Vol. 23. – P. 329-339.
- 31 Mandrikova O., Solovev I., Khomutov S., Arora K., Manjula L., Chandrasekhar P. Method of analysis of geomagnetic data based on wavelet transform and threshold functions // Proceedings of the International conference Information Technology and Nanotechnology. Session Image Processing, Geoinformation Technology and Information Security. CEUR Workshop Proceedings.– 2017. – Vol-1901. – P. 180-186
- 32 Mandrikova O.V., Solovev I.S., Khomutov S.Yu., Baishev D.G., Chandrasekhar P. Analysis of magnetic data of ground station network during strong magnetic storms // Solar-Terrestrial Relations and Physics of Earthquakes Precursors. E3S Web of Conferences. – 2017. – Vol. 20. – 02008. DOI: 10.1051/e3sconf/20172002008
- 33 Solovev I.S. Interactive system for geomagnetic data analysis // Solar-Terrestrial Relations and Physics of Earthquakes Precursors. E3S Web of Conferences. – 2017. – Vol. 20. – 02015. DOI: 10.1051/e3sconf/20172002015
- 34 O. V. Mandrikova, S. E. Smirnov, and I. S. Solovev Method for Determining the Geomagnetic Activity Index Based on Wavelet Packets. Geomagnetism and Aeronomy. – 2012. – Vol. 52 – No. 1 – P. 111-120.
- 35 Chui C.K. An introduction in wavelets. Academic Press, New York.1992.
- 36 Daubechies I. Ten Lectures on Wavelets. CBMS-NSF Lecture Notes nr. 61, SIAM, Philadelphia.1992.
- 37 Хайкин С. Нейронные сети: полный курс // Издательский дом Вильямс. М. – 2006. –1104 с.
- 38 Sheiner O.A., Fridman V.M. The features of microwave solar radiation observed in the stage of formation and initial propagation of geoeffective coronal mass ejections // Radiophysics and Quantum Electronics. – 2012. – Т. 54. – No. 10. – С. 655-666.
- 39 Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУ НУ РВХ ВСНЦ СО РАМН. –2006. –480 с.
- 40 Благовещенский Д.В., Калишин А.С. Механизм возрастания критической частоты ионосферы до начала суббури // Геомагнетизм и аэрномия. –2009. –Т. 49. –No 3. –С. 213-223.
- 41 Baishev D.G., Moiseyev A.V., Boroyev R.N., Kobyakova S.E., Stepanov A.E., Mandrikova O.V., Solovev I.S., Khomutov S.Yu., Polozov Yu.A., Yoshikawa A., Yumoto K. Magnetic and ionospheric observations in the Far Eastern region of Russia during the magnetic storm of 5 April 2010 // Sun and Geosphere. –2015. –Vol. 10. –No.2. –Pp.133-140.
- 42 Danilov A.D. Ionospheric F-region response to geomagnetic disturbances // Advances in Space Research. –2013. –Vol. 52. –No. 3. –Pp. 343-366.



- 43 Mandrikova O.V., Fetisova N.V., Polozov Y.A., Solovev I.S., Kupriyanov M.S. Method for modeling of the components of ionospheric parameter time variations and detection of anomalies in the ionosphere coupling of the high and mid latitude ionosphere and its relation to geospace dynamics // *Earth, Planets and Space*. –2015. –Vol. 67. –No 1. –Pp. 131-146. DOI: 10.1186/s40623-015-0301-4
- 44 Mandrikova O.V., Fetisova (Glushkova) N.V., Al-Kasasbeh R.T., Klionskiy D.M., Geppener V.V., Ilyash M.Y. Ionospheric parameter modelling and anomaly discovery by combining the wavelet transform with autoregressive models // *Annals of Geophysics*. –2015. –Vol. 58. doi:10.4401/ag-6729.
- 45 Mandrikova O.V., Polozov Yu.A., Solovev I.S., Fetisova (Glushkova) N.V., Zalyaev T.L., Kupriyanov M.S., Dmitriev A.V. Methods of analysis of geophysical data during increased solar activity // *Pattern recognition and image analysis*. –2016. –Vol. 26. –No. 2. –Pp. 406-418. DOI: 10.1134/S1054661816020103
- 46 Nakamura M., Maruyama T., Shidama Y. Using a neural network to make operational forecasts of ionospheric variations and storms at Kokubunji, Japan // *Earth, Planets and Space*. –2007. –Vol. 59. –Pp. 1231-1239.
- 47 Watthanasangmechai K., Supnithi P., Lerkvaranyu S., Tsugawa T., Nagatsuma T., Maruyama T. TEC prediction with neural network for equatorial latitude station in Thailand // *Earth, Planets and Space*. –2012. –Vol. 64. –Pp. 473-483.
- 48 Klimenko M.V., Klimenko V.V., Zakharenkova I.E., Karpov I.V. Modeling of local disturbance formation in the ionosphere electron concentration before strong earthquakes // *Earth Planet Space*. –2012. –Vol. 64. –Pp. 441-450. doi:10.5047/eps.2011.07.004
- 49 Maruyama T., Tsugawa T., Kato H., Saito A., Otsuka Y., Nishioka M. Ionospheric multiple stratifications and irregularities induced by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake // *Earth, Planets and Space*. –2011. –Vol. 63. –Pp. 869-873.
- 50 Bilitza D., Reinisch B.W. International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters // *Advances in space research*. –2008. –Vol. 42. –Pp. 599-609.
- 51 Oyekola O.S., Fagundes P.R. Equatorial F2-layer variations: Comparison between F2 peak parameters at Ouagadougou with the IRI-2007 model // *Earth, Planets and Space*. –2012. –Vol. 64. –Pp. 553-566.
- 52 Zhao X., Ning B., Liu L., Song G. A prediction model of short-term ionospheric foF2 based on AdaBoost // *Advances in Space Research*. –2014. –Vol. 53. –Pp. 387-394. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.12.001>.
- 53 Afraimovich E., Perevalova N., Plotnikov A., Uralov A. The shock-acoustic waves generated by the earthquakes // *Ann. Geophys*. –2001. –Vol. 19. –Pp. 395-409. DOI: 10.5194/angeo-19-395-2001.

- 54 Mikhailov A., Morena B., Miro G., Marin D. A method for foF2 monitoring over Spain using the El Arenosillo digisonde current observations // *Annals of Geophysics*. –1999. –Vol. 42. DOI:10.4401/ag-3748.
- 55 Мандрикова О.В., Полозов Ю.А. Метод выделения аномальных особенностей в данных критической частоты ионосферы на основе совмещения вейвлет-преобразования и нейронных сетей / *Цифровая обработка сигналов*. –Москва: РНТОРЭС. –2012. –№2. –С. 29-35.
- 56 Mandrikova O.V., Polozov Yu.A., Bogdanov V.V., Zhizhikina E.A. Method of detection of abnormal features in ionosphere critical frequency data on the basis of wavelet transformation and neural networks combination // *A Journal of Software Engineering and Applications* –2012. –Vol. 5. –№. 12B. –Pp. 181-187. DOI:10.4236/jsea.2012.512b035.
- 57 Kato H., Takiguchi Y., Fukayama D., Shimizu Y., Maruyama T., Ishii M. Development of automatic scaling software of ionospheric parameters // *Journal of the National Institute of Information and Communications Technology*. –2009. –Vol. 56. –Pp. 465-474.
- 58 Box G., Jenkins G. *Time series analysis: Forecasting and control*. San Francisco: Holden-Day. –1970. –406 p.
- 59 Ботова М.Г., Романовская Ю.В., Намгаладзе А.А. Вариации ионосферы: сопоставление результатов моделирования с данными наблюдений // *Вестник МГТУ*. –2014. –Т. 17. –№.2. –С. 385-393.
- 60 Соломенцев Д.В., Хаттатов Б.В., Титов А.А. Трехмерная ассимиляционная модель ионосферы для европейского региона // *Геомагнетизм и аэрономия*. –2013. –Т. 53. –№.1. –С. 78-90.
- 61 Мандрикова О. В., Полозов Ю. А., Соловьев И. С, Фетисова Н. В. Анализ ионосферных параметров в периоды солнечных событий и геомагнитных бурь // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*. –2016. –№. 4(15). –С. 49-55. DOI: 10.18454/2079-6641-2016-15-4-49-55.
- 62 Mandrikova O., Polozov Yu., Solovev I., Fetisova N. Analysis of ionospheric parameters during Solar events and geomagnetic storms / *Solar-Terrestrial Relations and Physics of Earthquakes Precursors* // *E3S Web of Conferences*. –2016. –Vol. 11. DOI: <http://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/20161100012>.
- 63 Mandrikova O., Polozov Yu., Geppener V. Method of ionospheric data analysis based on a combination of wavelet transform and neural networks // *Procedia Engineering*. –Vol. 201. –Pp. 756-766. DOI. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.622>.
- 64 Мандрикова О.В., Полозов Ю.А., Фетисова Н.В. Анализ ионосферных параметров в программной системе Aurora // *Вестник КамчатГТУ*. –2017. –Т. 41. –С. 15-25.
- 65 Мандрикова О.В., Полозов Ю.А., Соловьев И.С., Фетисова (Глушкова) Н.В., Заляев Т.Л., Будилова (Жижикина) Е.А., Сороковых С.В., Зылев А.О. Методы анализа геофизических данных в задачах космической погоды // *История науки и техники, изд. Научтехлитиздат*. –С. 113-121.

- 66 Yu. Polozov, N. Fetisova Analysis of ionospheric parameters by the software system Aurora // Solar-Terrestrial Relations and Physics of Earthquakes Precursors. E3S Web of Conferences. –2017. –Vol. 20. –01009. DOI: 10.1051/e3sconf/20172001009.
- 67 Mandrikova O. V., Glushkova N. V., Polozov Yu. A. Simulation and analysis of time variations in ionospheric parameters on the basis of wavelet transform and multicomponent models // Pattern Recognition and Image Analysis. –2015. –Vol. 25. –No. 3. –Pp. 470-480.
- 68 Мандрикова О.В., Фетисова (Глушкова) Н.В., Полозов Ю.А. Моделирование временного хода параметров ионосферы и выделение аномалий // Информационные технологии. –2016. –Т. 22. –No. 1. С. 21-31.
- 69 Mandrikova O.V., Fetisova N.V., Polozov Yu.A. Ionospheric parameter analysis and discovery of anomaly during ionospheric storms // Proceedings of the 11th Intl School and Conference Problems of Geocosmos (Oct 03-07, 2016, St.Petersburg, Russia). 2017. Pp. 262-269.
- 70 Мандрикова О.В., Заляев Т.Л., Полозов Ю.А., Соловьев И.С. Моделирование и анализ вариаций космических лучей в периоды повышенной солнечной и геомагнитной активности // Машинное обучение и анализ данных. –2016. –Т. 2. –No. 1. –С. 89-103.
- 71 O. Manrikova, Yu. Polozov, T. Zalyaev Joint analysis of the ionospheric parameters and cosmic ray data during periods of magnetic storms 2015 // Solar-Terrestrial Relations and Physics of Earthquakes Precursors. E3S Web of Conferences. –2017. –Vol. 20. –01007. DOI: 10.1051/e3sconf/20172001007.
- 72 Mallat S. A wavelet tour of signal processing. London : Academic Press. –1999. – 671 p.
- 73 Shi H., Zhang D., Liu Y., Hao Y. Analysis of the ionospheric variability based on wavelet decomposition // Science China Technological Sciences. –2015. –Vol. 58. –Pp. 174-180. DOI: 10.1007/s11431-014-5709-8.
- 74 Нейроматематика: учеб. пособие для вузов // Агеев А.Д., [и др.]; общая ред А.И. Галушкина. –М.:ИПРЖР. –2002. –448 с.
- 75 Смирнов С. Э. , Бычков В. В., Мандрикова О. В., Соловьев И. С., Полозов Ю. А., Заляев Т. Л., Хомутов С. Ю., Поддельский И. Н., Думбрава З. Ф., Баишев Д. Г. Анализ явлений космической погоды в 2014 году по наблюдениям в северо-восточном регионе России // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. –2016. –No 1(12). –С. 66-84. DOI: 10.18454/2079-6641-2016-12-1-66-84.
- 76 Kane R. P. Ionospheric foF2 anomalies during some intense geomagnetic storms // Annales Geophysicae. –2005. –Vol. 23. –Pp. 2487-2499. DOI:10.5194/angeo-23-2487-2005.
- 77 Liu L., Wan W., Zhang M.-L., Zhao B. Case study on total electron content enhancements at low latitudes during low geomagnetic activities before the storms // Annales Geophysicae. –2008. –Vol. 26. –No. 4. –Pp. 893-903.
- 78 Nogueira P.A.B., Abdu M.A., Batista I.S., de Siqueira P.M. Equatorial ionization anomaly and thermospheric meridional winds during two major storms over Brazilian low latitudes // Journal

of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. –2011. –Vol. 73. –Pp. 1535-1543.

- 79 Ruffolo D., Transport and acceleration of energetic charged particles near an oblique shock, *Astrophys. J.*, 515, 787-800, 1999
- 80 Belov, A. V., Bieber, J. W., Eroshenko, E. A., Evenson, P., Pyle, R., and Yanke, V. G.: Cosmic ray anisotropy before and during the passage of major solar wind disturbances, *Adv. Space Res.*, 31, N4, pp 919924, 2003.
- 81 Зеленый Л.М., Веселовский И.С., Бреус Т.К. и др; общ. ред. Зеленый Л.М., Веселовский И. С. . Плазменная гелиогеофизика. В 2 т. Т.2. / М. : Физматлит. – 2008 – 560 с.
- 82 Крымский Г.Ф., Кузьмин А.И., Кривошапкин П.А., Самсонов И.С., Скрипин Г.В., Транский И.А., Чирков Н.П. Космические лучи и солнечный ветер. Новосибирск: Наука, 1981. 224 с.
- 83 Топтыгин И.Н. Космические лучи в межпланетных магнитных полях. / М.: Наука, 301 с. 1983.
- 84 Kata J., Somogyi A.- Some problems of investigating periodicities of cosmic rays *Acta Physica Academiae Scientiarum Hungaricae*, T.27, pp, 523-548. 1969.
- 85 Vecchio A., Laurenza M., Storini M. and Carbone V New Insights on Cosmic Ray Modulation through a Joint Use of Nonstationary Data-Processing Methods. *Advances in Astronomy* 2012. doi:10.1155/2012/834247. 2012
- 86 Мандрикова О.В., Заляев Т.Л. Моделирование вариаций космических лучей на основе совмещения кратномасштабных вейвлет-разложений и нейронных сетей переменной структуры // *Цифровая обработка сигналов.*– 2015. – No. 1 – С. 11-16.
- 87 Козлов В.И. Оценка скейлинговых свойств динамики флуктуаций космических лучей в цикле солнечной активности // *Геомагнетизм и аэрономия.* – 1999 – Т. 39. – No 1. – С. 100-104.
- 88 Козлов В.И., Марков В.В. Вейвлет-образ тонкой структуры 11-летнего цикла по исследованию флуктуаций космических лучей в 20-23 циклах // *Геомагнетизм и аэрономия.* – 2007 – No. 1 – С. 47-55. 2007.
- 89 Козлов В.И., Марков В.В. Вейвлет-образ гелиосферной бури в космических лучах // *Геомагнетизм и аэрономия.* – 2007 – Т. 47. – No.1. – С.56-65.
- 90 Козлов В. И., Козлов В. В. Новый индекс солнечной активности – индекс мерцаний космических лучей // *ГЕОМАГНЕТИЗМ И АЭРОНОМИЯ.* – 2008 – Т. 48. – No 4. – С. 1-9.
- 91 Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Изд. 2-е. / М.: Сов.радио, 392 с, 1975.
- 92 О. В. Мандрикова, Т.Л. Заляев. Моделирование и анализ вариаций космических лучей в период гелиосферных возмущений // *Сборник тезисов докладов X-ой Международной научно-технической конференции по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2017).* Т.1 - СПб, – 2017. – С. 239-242

- 93 Мандрикова О.В., Заляев Т.Л. Моделирование вариаций космических лучей и выделение аномалий на основе совмещения вейвлет-преобразования с нейронными сетями // Машинное обучение и анализ данных. – 2014 – Т. 1. No. 9. – С. 1154 - 1167.
- 94 Mandrikova O.V., Zalyaev T.L Modeling And Analysis Of Cosmic Ray Variations During Periods Of Heliospheric Disturbances //11th International Conference "Problems Of Geocosmos Book Of Abstracts, 77-78, St. Petersburg, Petrodvorets, October 3-7. 2016
- 95 O.V. Mandrikova, T.L. Zalyaev Modeling and analysis of the cosmic rays variations during periods of heliospheric disturbances on the basis of wavelet transform and neural networks// Proceedings of the International work-conference on time series analysis( ITISE 2017), September 18-20, Granada Spain
- 96 Заляев Т.Л. Алгоритм выделения аномалий в вариациях космических лучей в периоды гелиосферных возмущений// Известия ЛЭТИ 10 с 25-32, 2015.
- 97 Мандрикова О.В., Заляев Т.Л. Методы выделения и анализа тонких особенностей в вариациях космических лучей - Международная конференция"Мягкие вычисления и измерения"SCM -2016, Санкт-Петербург, 22-27 мая, 2016
- 98 Munakata K., J. W. Bieber, S. Yasue, C. Kato, M. Koyama, S. Akahane, K. Fujimoto, Z. Fujii, J. E. Humble, and M. L. Duldig, Precursors of geomagnetic storms observed by muon detector network, J. Geophys. Res.. 2000. No.105. – P. 27457-27468,
- 99 Dorman L.I., Iucci N. and Villaresi G., 1993. Space dangerous phenomena and their possible prediction by cosmic rays. Proc. 23-th Intern. Cosmic Ray Conf, Calgary,4, 699702.
- 100 Dorman L.I. (2003) Cosmic Rays and Space Weather The Early Universe and the Cosmic Microwave Background: Theory and Observations Volume 130 of the series NATO Science Series pp 517-557
- 101 Papaioannou A., Mavromichalaki H., Eroshenko E., Belov A., Oleneva V. "The burst of solar and geomagnetic activity in August-September 2005"Annales Geophysicae.–2009. – 27. P 1019-1026.
- 102 Мороз Ю.Ф., Смирнов С.Э., Назарова З.А. О возможной природе изменений векового хода геомагнитного поля на Камчатке // Материалы региональной научной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвящённой Дню вулканолога, 29–30 марта 2016 г. – Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН.–2016.– С. 257-261
- 103 Мороз Ю.Ф., Смирнов С.Э. Аномальные изменения вертикального геомагнитного поля на Камчатке // Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений: VII международная конференция, с.Паратунка, Камчатский край, 29 августа - 2 сентября 2016 г.: сб. тез. докл. – Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН. – 2016. – С. 54-55
- 104 Moroz Yu.F., Smirnov S.E. Features of behavior of the secular variation of the vertical geomagnetic field in Kamchatka // 11th International Conference and school «Problems of Geocosmos», October 3-7, 2016 – St. Petersburg, Book of Abstracts.– p.228

- 105 Moroz Y., Smirnov S., Nazarova Z. Anomalous changes of vertical geomagnetic field in Kamchatka // E3S Web Conference. – 2016. – Vol. 11. – 00022.
- 106 Мороз Ю.Ф., Смирнов С.Э. О динамике электропроводности геологической среды в зоне субдукции на Камчатке // Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений: VII международная конференция, с.Паратунка, Камчатский край, 29 августа – 2 сентября 2016 г.: сб. тез. докл. – Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН. – 2016. – С. 64-65
- 107 Мороз Ю.Ф., Смирнов С.Э. О динамике электропроводности геологической среды в зоне субдукции на Камчатке // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. – 2016. – №3(14). – С. 79-84.
- 108 Moroz Yu.F., Smirnov S.E. The results of monitoring the electrical conductivity of the lithosphere in subduction zone of Kamchatka // 11th International Conference and school «Problems of Geocosmos», October 3-7, 2016, St. Petersburg, Book of Abstracts, p.229
- 109 Смирнов С.Э. 20 лет обсерваторских наблюдений электрического поля на Камчатке // История науки и техники. – 2017. – №8. – С. 28-35
- 110 Smirnov S. Variations of atmospheric electric field and meteorological parameters in Kamchatka in 1997-2016 // E3S Web Conference. – 2017. – Vol. 20. – 01012.
- 111 Бабаханов И.Ю., Бутин С.В., Смирнов С.Э., Хомутов С.Ю. Первые результаты наблюдения атмосферного электрического поля с помощью электрометра CS110 на обсерватории «Паратунка», Камчатка // Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений: VII международная конференция, с.Паратунка, Камчатский край, 29 августа - 2 сентября 2016 г.: сб. тез. докл. – Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН. – 2016. – С. 69–71
- 112 Хомутов С.Ю., Смирнов С.Э., Бутин С.В., Бабаханов И.Ю. Первые результаты наблюдения атмосферного электрического поля с помощью электрометра CS110 на обсерватории «Паратунка», Камчатка // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. – 2016. – №3(14). – С. 98–102.
- 113 Khomutov S., Smirnov S., Butin S. and Babakhanov I. First results of atmospheric electricity measurements by CS110 electric field meter at Paratunka observatory, Kamchatka // E3S Web Conference. – 2016. – Vol. 11. – 00008
- 114 Смирнов С.Э. Частотный и временной анализ эффекта восхода Солнца в электрическом поле приземного слоя атмосферы // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. – 2016. – №4(15). – С. 86-91.
- 115 Бычков В.В., Корсунова Л.П., Смирнов С.Э., Хегай В.В. Аномалии в ионосфере и электричестве приземного слоя атмосферы перед камчатским землетрясением 30.01.2016 г. по данным обсерватории "Паратунка" // Геомагнетизм и аэрономия. – 2017. – Т. 57. – №4. – С. 532-540
- 116 Смирнов С.Э., Михайлова Г.А., Михайлов Ю.М., Капустина О.В. Эффекты сильных землетрясений в вариациях электрических и метеорологических величин в приземной атмосфере на Камчатке // Геомагнетизм и аэрономия. – 2017. – Т. 57.– №5. – С. 656-663

- 117 Смирнов С.Э., Бычков В.В., Мандрикова О.В., Соловьев И.С., Полозов Ю.А., Заляев Т.Л., Хомутов С.Ю., Баишев Д.Г., Поддельский И.Н., Думбрава З.Ф. Анализ явлений космической погоды в 2014 году по наблюдениям в северо-восточном регионе России // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. – 2016. – №1(12). – С. 66-84.
- 118 Паркинсон У. Введение в геомагнетизм – М.: Мир. – 1986. – 528с.
- 119 Яновский Б. М. Земной магнетизм. – Л.: Изд-во ЛГУ. – 1978. – 591с.
- 120 Брагинский С.И. 0 спектре колебаний гидромагнитного динамо Земли // Геомагнетизм и аэрономия. – 1970. – Vol. 10. – №2 – С. 221–233
- 121 Currie R. G. Geomagnetic spectrum of internal origin and lower mantle // J.Geophys.Res. – 1968. – Vol. 73 – N 8 – С. 2779–2786
- 122 Чеброва А. Ю. и др. Воздействие Охотоморского землетрясения 24 мая 2013 г. (M=8.3) // Вулканология и сейсмология. – 2015. – №4. – С. 3-22
- 123 Жао Д., Пираино Ф., Лиу Л. Структура и динамика мантии под Восточной Россией и прилегающими регионами // Геология и геофизика. – 2010. Vol. 51. – №9. – С. 1188–1203
- 124 Huang J., Zhao D. High-resolution mantle topography of China and surrounding regions // I. Phys. Planet. Inter. – 2006.–Vol. 73–N 8.–pp. 1–15
- 125 Отани Э., Чжао Д. Роль воды в глубинных процессах в верхней мантии и переходном слое: дегидратация стагнирующих субдукционных плит и её значение для «большого мантийного клина» // Геология и геофизика. – 2009. – Vol. 50. – №12. – С. 1385-1392
- 126 Ротанова Н. М., Пушков А. Н. Глубинная электропроводность Земли – М.: Наука. – 1982. – 148с.
- 127 Семёнов В. Ю. Оценка электропроводности мантии под континентами северного полушария // Изв.АН СССР, Физика Земли. – 1989. –№3. – С. 60–67
- 128 Гордиенко В. В., Логинов И. М. О глобальной астеносфере // Физика Земли. – 2011. – №2. – С. 35-42
- 129 Ваньян Л. Л. Электромагнитные зондирования. – М.: Научный мир. – 1997. – 219с.
- 130 Shankland T. I., Waff H. S. Conductivity in fluid-bearing rocks // J. Geophys. Res. – 1977.–Vol. 82.–N 8–pp.5409–5417
- 131 Федотов С. А., Соломатин А. В., Чернышов С. Д. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на IX 2011-VIII 2016 гг.; вероятное место, время и развитие следующего сильнейшего землетрясения Камчатки с  $M \geq 7,7$  // Вулканология и сейсмология. – 2012. – №2. – С. 3–26
- 132 Карта полезных ископаемых Камчатской области. Масштаб 1 : 500000/ Под ред. Литвинова А.Ф., Патоки М.Г., Марковского Б.А. – СПб.: ВСЕГЕИ. – 1999. – Л. XIII.
- 133 Мороз Ю. Ф. О методике поисков краткосрочных предвестников сильных землетрясений в низкочастотном теллурическом поле Камчатки // Физика Земли. – 1994. – №9. – С. 88–90

- 134 Мороз Ю.Ф., Бахтиаров, В.Ф., Гаврилов, В.А., Левин, В.Е., Попруженко С.В. О мониторинге электротеллурического поля с целью прогноза сильных землетрясений на Камчатке // Вулканология и сейсмология. – 1995. – №4-5. – С. 139–149
- 135 Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. – М.: Научный мир. – 2009. – 680с.
- 136 Larsen I.C., Mackie R.L., Manzella A. et. al. Robust smooth magnetotelluric transfer functions // Geophysical Journal International. – 1996. – Vol. 124. – pp 801–819
- 137 Мороз Ю.Ф. Электропроводность земной коры и верхней мантии Камчатки. – М.: Наука. – 1991. – 181с.
- 138 Мороз Ю.Ф., Нурмухамедов А.Г. Магнитотеллурическое зондирование Петропавловского геодинамического полигона на Камчатке // Вулканология и сейсмология. – 1998 – №2 С. 77–84
- 139 Ваньян Л.Л. Электромагнитные зондирования. – М.: Научный мир. – 1997. – 219с.
- 140 Смирнов Я.Б., Сугробов В.М. Земной тепловой поток в Курило-Камчатской и Алеутской провинциях. I. Тепловой поток и тектоника // Вулканология и сейсмология. – 1979. – №1. – С. 59–73
- 141 Mackie K.L., Smith J.T., Madden T.R. Three-dimensional electromagnetic modeling using finite difference equations: the magnetotelluric example // Radio Science. – 1994. – Vol. 29 – pp 923–935
- 142 Кондратюк В.И. Климат Петропавловска-Камчатского. - Л.: Гидрометеиздат. – 1983. – 150 с.
- 143 Брикар Дж. Влияние радиоактивности и загрязнений на элементы атмосферного электричества // Проблемы электричества атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат. – 1969. – С.68–105.
- 144 Buzevich A.V., Smirnov S.E. Specialized Hardware-Software Complex of Geophysical Observatory «Paratunka» // 23 General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics. – Abstract volume. – 2003. – B81.
- 145 Датчик напряженности электрического поля «Поле-2». Техническое описание и инструкция по эксплуатации, Главная геофизическая обсерватория им. А.И.Воейкова. – Ленинград. – 1991. – 35 с.
- 146 Акбашев Р.Р., Фирстов П.П., Хомутов С.Ю., Ефимов В.А. Измерения электрического поля атмосферы: результаты сверки электростатических флюксометров «ЭФ-4» и «Поле-2» // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России, Труды Пятой научно-техн. конф. (Петропавловск-Камчатский. 27 сентября – 3 октября 2015 г.), ред. В.Н. Чебров. – ГС РАН, Обнинск. – 2015. – С. 197–201;
- 147 Magina F.C., Naccarato K.P., Pinto O., Alonso L.H., Campos D., Borsoi D., Mello A., Simomura C., Ferro M.A.S., Yamasaki J., Pimentel D.R.M. Atmospheric electric field mill



- deployment in southeastern of Brazil // XV International Conference on Atmospheric Electricity (15-20 June 2014. – Norman, Oklahoma, . – 2014. – pp. 1–11.
- 148 Сомсиков В.М. Волны в атмосфере, обусловленные солнечным терминатором (обзор). // Геомагнетизм и аэрономия. – 1991. – Т.31. – №1. – С. 1–12.
- 149 Смирнов С.Э. Влияние конвективного генератора на суточный ход напряженности электрического поля в приземной атмосфере на Камчатке // Геомагнетизм и аэрономия. – 2013. – Т.53. – №4. – С. 546–552.
- 150 Смирнов С.Э., Михайлова Г.А., Капустина О.В. К вопросу о природе эффекта восхода Солнца в суточных вариациях электрического поля атмосферы на Камчатке: I. Временные вариации электрического поля // Геомагнетизм и аэрономия. – 2012. – Т.52. – №4. – С. 535–540.
- 151 Михайлова Г.А., Капустина О.В., Смирнов С.Э. К вопросу о природе эффекта восхода Солнца в суточных вариациях электрического поля атмосферы на Камчатке. II. Частотные вариации электрического поля // Геомагнетизм и аэрономия. – 2013. – Т.53. – №2. – С. 247–255
- 152 Липеровский В.А., Похотелов О.А., Шалимов С.Л. Ионосферные предвестники землетрясений. – М.: Наука. – 1992. – 303 с.
- 153 Электромагнитные предвестники землетрясений / Под ред. М. А. Садовского. - М.: Наука. – 1982. - 89 с.
- 154 Руленко О.П. Оперативные предвестники землетрясений в электричестве приземной атмосферы // Вулканология и сейсмология. - 2000. – №4. – С. 57–68.
- 155 Руленко О. П. Новая методика выявления и изучения предвестника землетрясений в электричестве приземной атмосферы // Вестник КРАУНЦ. Науки о земле. – 2008. – №2. – Вып. №12. – С. 42–47.
- 156 St-Laurent F., Derr J. S., Freund F. T. Earthquake lights and the stress-activation of positive hole charge carriers in rocks // Phys. Chem. Earth. –2006. – Parts A/B/C. – V. 31. – Iss. 4–9. pp. 305–312.
- 157 Freund F. T., Takeuchi A., Lau B.W. S. Electric currents streaming out of stressed igneous rocs – a step towards understanding pre-earthquake low frequency EM emissions // Phys. Chem. Earth. – 2006. – Parts A/B/C. – V. 31. Iss. 4–9. – pp. 389–396.
- 158 Сидорин А. Я. Предвестники землетрясений. – М.: Наука. – 1992. – 192 с.
- 159 Апродов В. А. Зоны землетрясений. – М.: Мысль. – 2000. – 461 с.
- 160 Nestorov G. T. A possible ionospheric presage of the Vranča earthquake of March 4, 1977 // Comptes rendus de Academie Bulgare des Sciences. – 1979. – V. 32. – N 4. – pp. 443–446.
- 161 Rishbeth H. F-region storms and thermospheric dynamics // J. Geomag. Geoelectr. – 1991. – V. 43. – Suppl. 1. – pp. 513-524.

- 162 Prölss G. W. Ionospheric F-region storms / Handbook of Atmospheric Electrodynamics. V. 2. Ed. Volland H. Boca Raton. – FL USA: CRC Press. – 1995. – Ch. 8. – pp. 195–248.
- 163 Михайлов Ю.М., Михайлова Г.А., Капустина О.В., Бузевич А.В., Смирнов С. Э. Особенности атмосферных шумов, наложенных на вариации квазистатического электрического поля в приземной атмосфере Камчатки // Геомагнетизм и аэрномия. – 2005. – Т. 45. – №5. – С. 690–705.
- 164 Корсунова Л. П., Хегай В. В. Анализ сейсмо-ионосферных возмущений на цепочке японских станций вертикального зондирования ионосферы // Геомагнетизм и аэрномия. – 2008. – Т. 48. – №3. – С. 407–415.
- 165 Korsunova L. P., Hegai V. V. Ionospheric precursors of crustal earthquakes in the northwestern part of the Asia-Pacific seismic belt // Open Transactions on Geosciences (GEOS). – 2014. – V. 1. – N 1. – pp. 25–33.
- 166 Liu J. Y., Chen Y. I., Chuo Y. J., Chen C. S. A statistical investigation of pre-earthquake ionospheric anomaly // J. Geophys. Res. – 2006. – V. 111. – N A05304.
- 167 Корсунова Л. П., Хегай В. В. Об эффективности метода поиска ионосферных предвестников землетрясений по параметрам спорадического слоя E и регулярного слоя F2 / Сб. докл. VI Междунар. конф. "Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений". Паратунка, Камчатский край, 9–13 сентября 2013 г. Отв. ред. Б. М. Шевцов. Петропавловск-Камчатский: изд-во ИКИР ДВО РАН. С. 412–417. 2013.
- 168 Chen Y.-I., Liu J.-Y., Tsai Y.-B., Chen C.-S. Statistical tests for pre-earthquake ionospheric anomaly // Terr. Atmos. Ocean. Sci. J. – 2004. – V. 15. – N 3. – pp. 385–396.
- 169 Korsunova L. P., Hegai V. V. Effectiveness criteria for methods of identifying ionospheric earthquake precursors by parameters of a sporadic E layer and regular F2 layer // J. Astron. Space Sci. – 2015. – V. 32. – N 2. – pp. 137–140.
- 170 Ouzounov D., Freund F. T. Mid-infrared emission prior to strong earthquakes analyzed by remote sensing data // Adv. Space Res. – 2004. – V. 33. – Iss. 3. – pp. 268–273.
- 171 Гершман Б. Н. Динамика ионосферной плазмы. – М: Наука. – 1974. – 256 с.
- 172 Чавдаров С. С., Часовитин Ю. К., Чернышева С. П., Шефтель В. М. Среднеширотный спорадический слой E ионосферы. – М.: Наука. – 1975. – 120 с.
- 173 Astafyeva E. I., Heki K. Vertical TEC over seismically active region during low solar activity // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. – 2011. – V. 73. – N 13. – pp. 1643–1652
- 174 Горный В.И., Сальман А.Г., Тронин А.А., Шилин Б.В. Уходящее инфракрасное излучение Земли – индикатор сейсмической активности // ДАН. – 1988. – Т. 301. – №1. – С. 67–69.
- 175 Сальман А.Г., Тронин А.А. Вариации потока уходящего инфракрасного излучения Земли в сейсмоактивных регионах Средней Азии // Изв.АН СССР. Физика Земли. – 1990. – №7. – С. 67–69.

- 176 Tronin A., Hayakawa M., Molchanov O. Thermal IR satellite data application for earthquake research in Japan and China // *J. Geodynamic.* – 2002. – V. 33. – pp. 519-534.
- 177 Ouzounov D., Liu D., Chunli K., Cervone G., Kafatos M., Taylor P. Outgoing long-wave radiation variability from IR satellite data prior to major earthquakes // *Tectonophysics.* – 2007. – V. 431(1-4). – pp. 211-220.
- 178 Бондур В.Г., Воронова О.С. Вариации уходящего длинноволнового излучения при подготовке и протекании сильных землетрясений на территории России в 2008 и 2009 годах // *Изв. ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка.* – 2012. – №1. – С. 79-85.
- 179 Ouzounov D., Bryant N., Logan Th., Pulinets S., Taylor P. Satellite thermal IR phenomena associated with some of the major earthquakes in 1999-2003 // *Phys. Chem. Earth.* – 2006. – V. 31. – pp. 154-163.
- 180 Tronin A.A., Biagi P.F, Molchanov O.A., Khatkevich Y.V., Gordeev E.I. Temperature variations related to earthquakes from simultaneous observation at the ground stations and by satellites in Kamchatka area // *Physics and Chemistry of the Earth.* – 2004. – V. 29. – pp. 501-506.
- 181 Dunajceka M.A., Pulinets S.A. Atmospheric and thermal anomalies observed around the time of strong earthquakes in Mexico // *Atmosfera.* – 2005. – V. 18. – №4. – pp. 235-247.
- 182 Руленко О.П., Дружин Г.И., Вершинин Е.Ф. Измерения атмосферного электрического поля и естественного электромагнитного излучения перед Камчатским землетрясением 13.11.93 г.,  $M = 7.0$  // *ДАН.* – 1996. – Т. 348. – №6. – С. 814-816.
- 183 Михайлова Г.А., Михайлов Ю.М., Капустина О.В., Смирнов С.Э. Эффекты грозовой активности в спектрах мощности электрического поля в приземной атмосфере на Камчатке // *Геомагнетизм и аэрономия.* – 2010. – Т. 50. – №6. – С. 843-852.
- 184 Михайлов Ю.М., Михайлова Г.А., Капустина О.В., Дружин Г.И., Смирнов С.Э. Электрические и электромагнитные процессы в приземной атмосфере перед землетрясениями на Камчатке // *Геомагнетизм и аэрономия.* – 2006. – Т. 46. – №6. – С. 839-852.
- 185 Smirnov S. Association of the negative anomalies of the quasistatic electric field in atmosphere with Kamchatka seismicity // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* – 2008. – V. 8. – P. 745-749.
- 186 Pierce E.T. Atmospheric electricity and earthquake prediction // *J.Geophys. Lett.* – 1976. – V. 3. – N 3. – pp. 185-188.
- 187 Kondo G. The variation of the atmosphere electric field at the time of earthquake // *Memoirs of the Kokioka magnetic observatory.* – 1986. – V. 13. – №1. – pp.11-23.
- 188 Hao J. The anomalous of atmospheric electric field at the ground level and earthquakes // *Acta Seismol.Sin.* – 1988. – V.10. – №2. – pp. 207-212.
- 189 Silva H., Bezzeghoud M., Reis A., Rosa R., Tlemcani M., Araujo A., Serrano C., Borges J., Caldeira B., Biagi P. Atmospheric electrical field decrease during the  $M = 4.1$  Sousel earthquake (Portugal) // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* – 2011. – V. 11. – pp. 987-991.

- 190 Милькис Б.Р. Метеорологические предвестники сильных землетрясений // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1986. – №3. – С. 36-47.
- 191 Dobrovolsky I.P., Zubkov S.I., Myachkin V.I. Estimation of the size of earthquake preparation zones // Pure Appl.Geophys. – 1979. – V.117. – No 5. – pp.1025-1044.
- 192 РД 52.04.168-2001. Методические указания. Наблюдения за электрическим полем. – С.-Петербург: Гидрометеоиздат. – 2002. – 23 с.
- 193 [www.pogodaiklimat.ru](http://www.pogodaiklimat.ru)
- 194 Rawat V., Saraf A.K., Sharma K., Shujat Y. Anomalous land surface temperature and outgoing long-wave radiation observations prior earthquakes in India and Romania // Nat. Hazards. – 2011. – V. 59. – pp. 33-46.
- 195 Riggio A., Santulin M. Earthquake forecasting: a review of radon as seismic precursor // Bollettino di Geofisica Teorica ad Appliata. – 2015. – V. 56. – №2. – pp. 95-114.
- 196 Руленко О.П., Кузьмин Ю.Я. Увеличение радона и торона в районе Верхне-Паратунской гидротермальной системы Южной Камчатки перед катастрофическим землетрясением в Японии 11 марта 2011 г. // Вулканология и сейсмология. – 2015. – №5. – С. 36-42
- 197 Pulinets S.A., Ouzounov D., Karelin A.V., Boyarchuk K.A., Pokhmelnikh L.A. The physical nature of thermal anomalies observed before strong earthquakes // Physics and Chemistry of the Earth. – 2006. – V. 31. – pp. 143-153.
- 198 Akasofu, S.I., and Chapman, S. Solar-Terrestrial Physics. – Oxford University Press, Oxford, – 1972. – 891p.
- 199 Afraimovich, E., Kosogorov, E., Palamarchouk, K., Perevalova, N., and Plotnikov, N. The use of GPS arrays in detecting the ionospheric response during rocket launchings // Earth, Planets and Space. –2000 – 52:11 – pp.1066-1061.
- 200 Afraimovich, E., Perevalova, N., Plotnikov, A., and Uralov, A. The shock-acoustic waves generated by earthquakes // Ann. Geophys. – 19:4 (2001) – pp.409-395.
- 201 Nakamura, M., Maruyama., T., and Shidama, Y. Using a Neural Network to Make Operational Forecasts of Ionospheric Variations and Storms at Kokubunji, Japan. – Journal of the National Institute of Information and Communications Technology. – 56:1-4 (2009) – pp.391-406.
- 202 Danilov, A.D. Ionospheric F-region response to geomagnetic disturbances // Advances in Space Research.– 2013. – 52:3 – pp.343-366
- 203 Liu L., Wan W., Zhang M. L., Zhao B. Case study on total electron content enhancements at low latitudes during low geomagnetic activities before the storms // Ann. Geophys. –2008. – 26:4 – pp.893-903.
- 204 Zhao, X., Ning, B., Liu, L., and Song, G. A prediction model of short-term ionospheric foF2 based on AdaBoost // Advances in Space Research. – 2014. – 53 (3) – pp. 387-394

- 205 Klimenko, M.V., Klimenko, V.V., Zakharenkova, I.E., and Karpov, I.V. Modeling of local disturbance formation in the ionosphere electron concentration before strong earthquakes // *Earth, Planets and Space*. – 2012. – 64:6 – pp. 441-450
- 206 Klimenko M. V., Klimenko V. V., Ratovsky K. G., Goncharenko L. P. Numerical modeling of the global ionospheric effects of storm sequence on September 9-14, 2005 - comparison with IRI model // *Earth, Planets and Space*. – 2012. – 64:6 – pp. 433-440.
- 207 Тясто М. И., Данилова О. А., Дворников В. М., Сдобнов В. Е., Большие снижения геомагнитных порогов космических лучей в период сильных возмущений магнитосферы // *Изв РАН, Сер. Физ.* – 2009. – 73:3 – pp.385–388
- 208 Gopalswamy, N., Xie, H., Yashiro, S., and Usoskin, I. Ground level enhancement events of Solar cycle 23 // *Indian Journal of Radio & Space Physics*. – 2010. – 39. – pp.240-248.
- 209 Парамонов Н. А. Атмосферное электричество. – Гидрометеиздат, Л. – 1969. – 129 с.
- 210 Roble R. G. On solar-terrestrial relationships in atmospheric electricity // *J. Geophys. Res.* – 1985. – 90:D4 – pp.6000–6012.
- 211 Смирнов С.Э., Михайлова Г.А., Капустина О.В. Вариации квазистатического электрического поля в приземной атмосфере на Камчатке во время геомагнитных бурь в ноябре 2004 г. // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 2013. – Т.53. – №4. – С.532-545.
- 212 Михайлова Г.А., Михайлов Ю.М., Капустина О.В., Дружин Г.И., Смирнов С.Э. Спектры мощности тепловых приливных и планетарных волн в приземной атмосфере и в D-области ионосферы на Камчатке. // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 2009. – Т.49. – №5. – С. 639-653
- 213 Смирнов С.Э., Михайлова Г.А., Капустина О.В. Вариации электрических и метеорологических величин в приземной атмосфере на Камчатке во время солнечных событий в октябре 2003 г. // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 2014. – Т.54. – №2. – С.257-265
- 214 Jaffard S. Pointwise smoothness, two-microlocalisation and wavelet coefficients. – *Publications Mathematiques*. – 1991. – 35. – pp. 155-168.
- 215 Bychkov V. V., Nepomnyashchiy Y. A., Perezhogin A. S., Shevtsov B. M., Lidar returns from the upper atmosphere of Kamchatka for 2008 to 2014 observations. – *Earth, Planets and Space*. – 2014. – 66:1. – pp.1-4.
- 216 Smirnov S. Reaction of electric and meteorological states of the near-ground atmosphere during a geomagnetic storm on 5 April 2010 // *Earth, Planets and Space*. – 2014. – 66:154
- 217 Aplin K. L., Harrison R. G., Atmospheric electric fields during the Carrington flare // *Astron. Geophys.* – 2014. – 55:5. – pp.5-32