

DOI: 10.18454/2079-6641-2018-22-2-85-99

ФИЗИКА

УДК 551.510.535:519.2:550.34

ДИНАМИКА ПОВЕДЕНИЯ ИОНОСФЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ НАКАНУНЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ПЕРИОДЫ 28.02.-01.03.2013 Г И 19.05-24.05.2013 Г

В. В. Богданов, А. В. Павлов

Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
684034, с. Паратунка, ул. Мирная, 7

E-mail: vbogd@ikir.ru pavlov@ikir.ru

В настоящей статье с помощью комплекса радиофизических методов исследовались вариации ионосферных параметров и ионосферной турбулентности до и во время сейсмических событий. Для локализации области возникновения возможного сейсмического события использовался теоретико-вероятностный подход, предложенный авторами. Этот подход позволил обнаружить рост сейсмической активности на юге Камчатском крае в период с 2007 до 2013 году. Установлено, что характерные особенности ионосферных аномалий такие как формирование К-слоя (корпускулярного слоя из-за осаждения частиц из радиационных поясов), увеличение характеристики критической частоты f_0F2 и образование F-spread, а также Es-spread произошли примерно за один день до сейсмических событий в феврале-марте (28.02.-02.03) 2013 года и за несколько дней до серии событий 21 мая и одиночного события 24 мая 2013 года.

Ключевые слова: ионосфера, литосфера, томография, вертикальное радиозондирование, GPS-радиозондирование, землетрясение

© Богданов В. В., Павлов А. В., 2018

Введение

Исследование солнечно-земных связей выявило прямую зависимость между солнечной активностью и процессами в магнитосфере, ионосфере и литосфере. Активные процессы на Солнце проявляются в околоземном космическом пространстве и ответственны за развитие магнитосферных и ионосферных бурь. В процессе развития магнитосферных бурь в магнитосфере и ионосфере происходит формирование различных токовых систем, что приводит, в свою очередь, к возбуждению индукционных токов в земной коре. В сейсмоактивном регионе, где породы находятся в напряженном (критическом) состоянии, эти токи могут вызывать изменение режимов формирования в литосфере различных физических, химических, электромеханических, термодинамических и прочих процессов. Это приводит к изменению скорости эманации радиоактивного радона, влияющего на величину электрического поля Земли и изменению условий протекания тока в Глобальной токовой цепи; локальному нагреву поверхности и формированию восходящих воздушных потоков; к генерации акустико-гравитационных и внутренних гравитационных волн (АГВ и ВГВ), распространяющихся на ионосферные высоты и т.д. Все это может вызвать турбулизацию и изменению степени ионизации различных слоев ионосферы. В свою очередь, распространяющиеся возмущения вдоль силовых линий магнитного поля Земли приводят к изменению пичч-углового распределения заряженных частиц и, как следствие, к их высыпанию из радиационных поясов и образованию корпускулярных слоев. Таким образом, осуществляется обратная связь, определяющая влияние литосферных процессов сейсмоактивных регионов на ионосферу и магнитосферу. Можно сказать, что на ионосферных и магнитосферных высотах происходит как бы отображение и осреднение процессов, происходящих в земной коре на территориях размером в сотни километров. Любые малые воздействия на ионосферу могут привести к триггерным эффектам с энерговыведением, значительно превышающим энергию первичных возмущающих факторов солнечного или литосферного происхождения. Современными исследованиями установлено, что земная кора оказывает влияние на физические процессы, протекающие в верхних геосферных оболочках. Следовательно, в сейсмоактивных регионах любые аномальные изменения в поведении параметров ионосферы, формирующееся на фоне регулярного суточного изменения характеристик ионосферы, обусловленного влиянием Солнца, могут дать информацию о процессах подготовки землетрясений [2]-[4]. В свою очередь, каждый сейсмоактивный регион характеризуется своими, наиболее информативными особенностями (аномалиями) в поведении параметров ионосферы, которые могут быть отождествлены с предвестниками землетрясений. В Камчатском регионе к таким особенностям, как показывают многолетние исследования динамики ионосферных параметров накануне землетрясения, можно отнести следующие:

- 1) высыпание за несколько часов до землетрясения заряженных частиц из радиационных поясов в ионосферу;
- 2) формирование за 1-3 суток до землетрясения диффузионного спорадического слоя E_S (E_S -spread);
- 3) за 1-5 суток на фоне развития магнитной бури аномальное повышение критической частоты f_0F2 (рост концентрации электронов), превышающее медианные значения (при обычном развитии магнитосферной бури в ионосфере за

счет вихревого электрического поля возникает дрейф, который приводит к смещению электронов на большие высоты и к уменьшению их концентрации).

4) формирование за 1-3 суток на фоне спокойной магнитосферы диффузионного слоя $F2$ ($F2$ -spread) длительностью в несколько часов;

5) расслоение за 1-3 суток слоя $F2$ по частоте и высоте (режим "H"), так называемые перемещающиеся ионосферные возмущения.

Физические основы генерации предвестников в данной статье не рассматриваются.

Средства радиофизических наблюдений

Радиофизические наблюдения выполнялись средствами вертикального радиозондирования, автоматизированной системой спутниковой радиотомографии и GPS-радиоинтерферометрии [5]. Автоматическая ионосферная станция (АИС) вертикального радиозондирования установлена в с. Паратунка Елизовского района Камчатского края (широта φ - $52^{\circ}58'$, долгота λ - $158^{\circ}15'$). Наблюдения ведутся в импульсном режиме на частотах от 1 до 15 МГц. Режим зондирования: один раз в 15 минут. Примеры ионограмм, представлены на рис.2, на которых представлены аномалии, соответствующие особенностям 5) (рис.2а), 1) и 4) (рис.2б), перечисленные в предыдущем разделе. Приемные станции томографического зондирования (разработка ОАО "Российские космические системы"), были установлены в селах Паратунка, Мильково и Эссо (см. рис.рис.1) и обслуживались ИКИР ДВО РАН. Время работы станций определяется временем пролета на высотах 1000 км низколетящих навигационных космических аппаратов (ННКА), оснащенных соответствующей передающей аппаратурой.

Радиотомографическое зондирование ионосферы проводится над территорией п-ова Камчатка с помощью лучевой радиотомографии. Задачи лучевой радиотомографии решаются на практике с помощью ИСЗ (высота ~ 1000 км) и нескольких станций приема навигационного сигнала, которые размещаются на поверхности Земли под углом, соответствующим углу наклона плоскости орбиты спутников. В случае систем типа «Цикада/Транзит», наклонение орбиты которых составляет $83^{\circ}/90^{\circ}$ градусов, необходимо расположить наземные приемники навигационных сигналов в меридиональном направлении.

На земле по приведенным фазам сигналов с частотами 150 и 400 МГц можно рассчитать электронное содержание на пути распространения навигационного сигнала. За время пролета спутника над развернутой системой наземных станций проводится серия измерений, при этом для каждой станции приема навигационного сигнала определяется ПЭС = $\int_p N_e ds$ на элементе пути распространения ds , где ПЭС – полное электронное содержание вдоль пути распространения сигнала между источником и приемником p , N_e – электронное содержание. После этого проводится реконструкция томографического разреза ионосферы, путем решения обратной задачи [6],[7].

На рис.?? представлена схема реализации метода томографического зондирования ионосферы, позволяющего восстановить электронную концентрацию в верхней атмосфере. В качестве источников когерентного сигнала используются низкоорбитальные навигационные спутники типа «Космос», что позволяет восстановить вертикальное распределение электронной концентрации вдоль

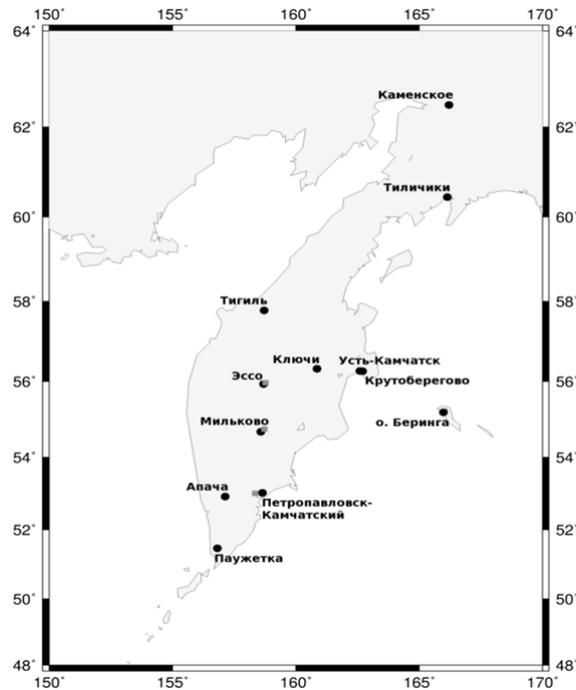


Рис. 1. Схема расположения приемных станций спутниковой информации на о-ве Камчатка. Томографические станции обозначены серыми квадратами, станции GPS-радиоинтерферометрии – черными кружками

трассы пролета спутника с хорошим разрешением (25 км по высоте и 50 км по широте). Наземные приемники сигналов расположены в субмеридиональном направлении (158°31' в.д.). Приемные станции работают в автоматическом режиме.

На основе метода GPS-радиозондирования в последнее время был достигнут значительный прогресс в изучении перемещающихся ионосферных неоднородностей [8]. Метод позволяет получать данные о вариациях полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере с высоким пространственным и временным разрешением. Передатчики когерентного излучения устанавливаются на космических системах GPS и "ГЛОНАС" (высота орбит КА свыше 20 000 км). Методы и технологии GPS-детектора ионосферных возмущений подобны методам лучевой радиотомографии (см. выше) и позволяют исследовать ионосферные неоднородности с амплитудой до 10^{-3} от фонового значения ПЭС. Приемники GPS-радиоинтерферометрии (см. рис.1) принадлежат КФ ГС РАН и информация с них передавалась ИКИР ДВО РАН согласно Договору о научно-техническом сотрудничестве.

Результаты радиофизических наблюдений

Согласно данным с АИС 27 февраля на фоне спокойной магнитосферы ($K_z = 6$) в районе с 00^h по 04^h UT (здесь и далее время берется по UT) наблюдается расслоение слоя F_2 по частоте и высоте (режим "H" (см. рис.4а)). С 10^h 00^m начинается турбулизация слоя F_2 (диффузия слоя, так называемый F_2 -spread; см. рис.4б, режим "F"). Однако до 21h 00m аппаратным способом возможна регистрация значений критической частоты f_0F_2 (см. рис.4а) с точностью ± 0.2 МГц (этот режим выделен

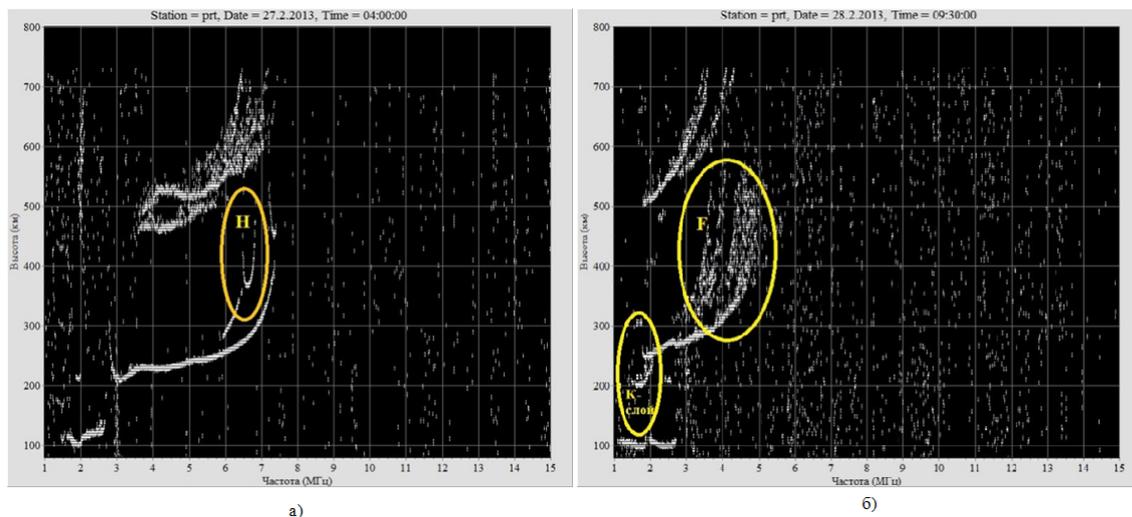


Рис. 2. Примеры аномального поведения параметров ионосферы. а) - расслоение слоя F_2 по частоте и высоте (режим "H" перемещающиеся ионосферные возмущения). б) - на фоне спокойной магнитосферы формирование за 1-3 дня диффузионного слоя F_2 (F_2 -spread) длительностью в несколько часов (режим "F"); формирование K-слоя, за счет высыпания заряженных частиц из радиационных поясов

овалом и отмечен цифрой "6"). С $00^{h}00^{m}$ до $01^{h}00^{m}$ наблюдается E_S -spread (диффузия слоя E_S , подобен диффузии слоя F_2). Динамика турбулизации слоя F_2 хорошо просматривается на томограммах (см.рис.5). На рис.5а видно, что 27.02 в $08^{h}00^{m}$ (на рис.5 в скобках указано местное камчатское время) максимум распределения электронов слоя F_2 приходится на 300 км с небольшими локальными образованиями, наблюдаемыми чуть южнее и севернее с. Паратунки. Но уже при следующем пролете спутника в $11^{h}24^{m}$ фиксируется турбулизация слоя F_2 (см.рис.5б) с увеличением высоты его максимума до 350 км. По данным АИС турбулентность в слое F_2 прекращается в $21^{h}00^{m}$, что хорошо видно на томограмме рис.5в при пролете спутника в $22^{h}07^{m}$. Причем геомагнитная активность 27 февраля характеризовалась низким уровнем ($K_{\Sigma} = 6$) и не могла явиться причиной формирования F_2 -spread.

28.02.2013 г. с $06^{h}00^{m}$ по данным АИС начинает формироваться спорадический слой ES, а с $06^{h}00^{m}$ и до $11^{h}00^{m}$ на высоте 200 км регистрируется корпускулярный слой K, обусловленный высыпанием частиц (см.рис.2б). При этом, в спокойных геомагнитных условиях (3-х часовой индекс k в это время равен 1), наблюдается турбулизация слоя F_2 , но аппаратным способом критические частоты можно определить (режим "F"). На томограммах во время пролета в $05^{h}03^{m}$ диффузия отсутствует, но была зарегистрирована при пролетах в $08^{h}26^{m}$ и $11^{h}28^{m}$. Томограммы 28.02 подобны томограммам за 27.02. (см. рис.5) и поэтому не приведены.

28.02.2013г. в $14^{h}05^{m}$ произошло землетрясение с магнитудой $M_C = 6.6$ ($\varphi = 50.66^\circ$ с.ш., $\lambda = 157.77^\circ$ в.д.)

Как видно из рис.4в, 01.03.2013г. была зарегистрирована сильная магнитная буря с суточным значением индекса геомагнитной активности $K_{\Sigma} = 27$. Кроме того, с $12^{h}00^{m}$ до $15^{h}00^{m}$ было зафиксировано образование корпускулярного слоя, обусловленного высыпанием заряженных частиц из радиационных поясов.

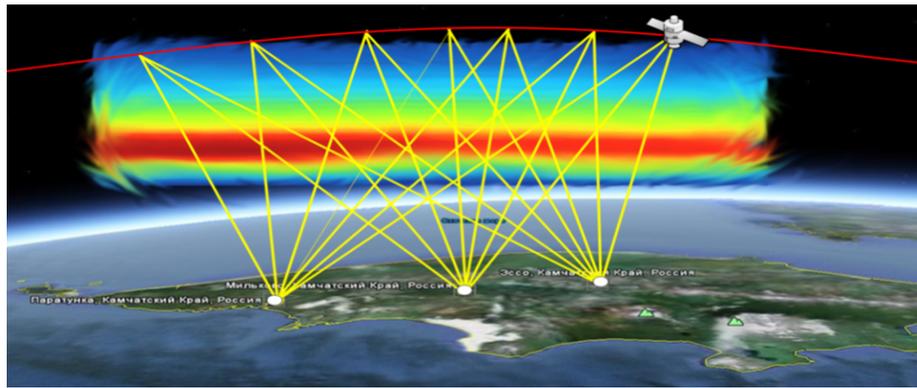


Рис. 3. Схема расположения станций приема и распространения зондирующего сигнала с НКА

С 04^h00^m до 06^h00^m и с 07^h00^m до 10^h00^m было зарегистрировано аномальное превышение значений критической частоты по сравнению с медианными значениями, рассчитанными за последние 30 дней (на рис.4 выделены двумя пунктирными овалами). Поскольку, в 2013 году в ИКИР по техническим причинам информацию об ионосферных данных и геомагнитной активности получали только через сутки, то аномалии были обнаружены только 02.03.2013г. В противном случае аномалия была бы зафиксирована 01.03.2013г. не позднее 12^h00^m .

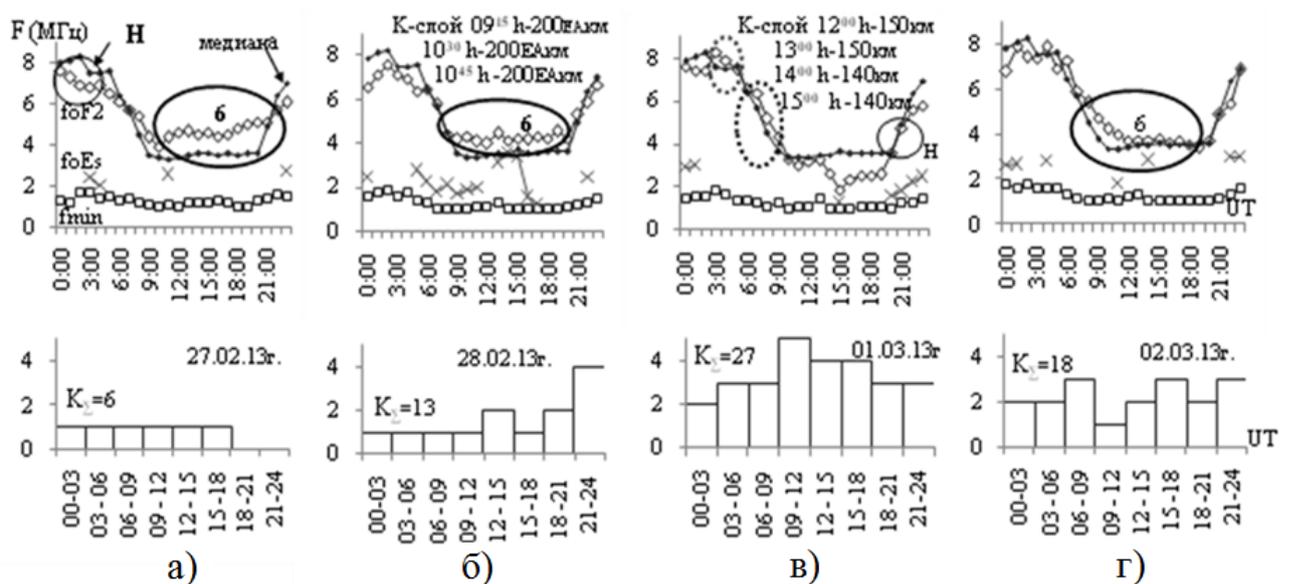


Рис. 4. Динамика суточных значений параметров ионосферы для серии сейсмических событий 28.02. - 01.03.2013г. \diamond - критических частот f_0F_2 ; \times - спорадического слоя f_oE_s , \square - минимальных частот f_{min}

01.03.2013г. произошло два землетрясения в 12^h53^m с магнитудой $M_C = 6.5$ ($\varphi = 50.64^\circ$ с.ш., $\lambda = 157.90^\circ$ в.д.).

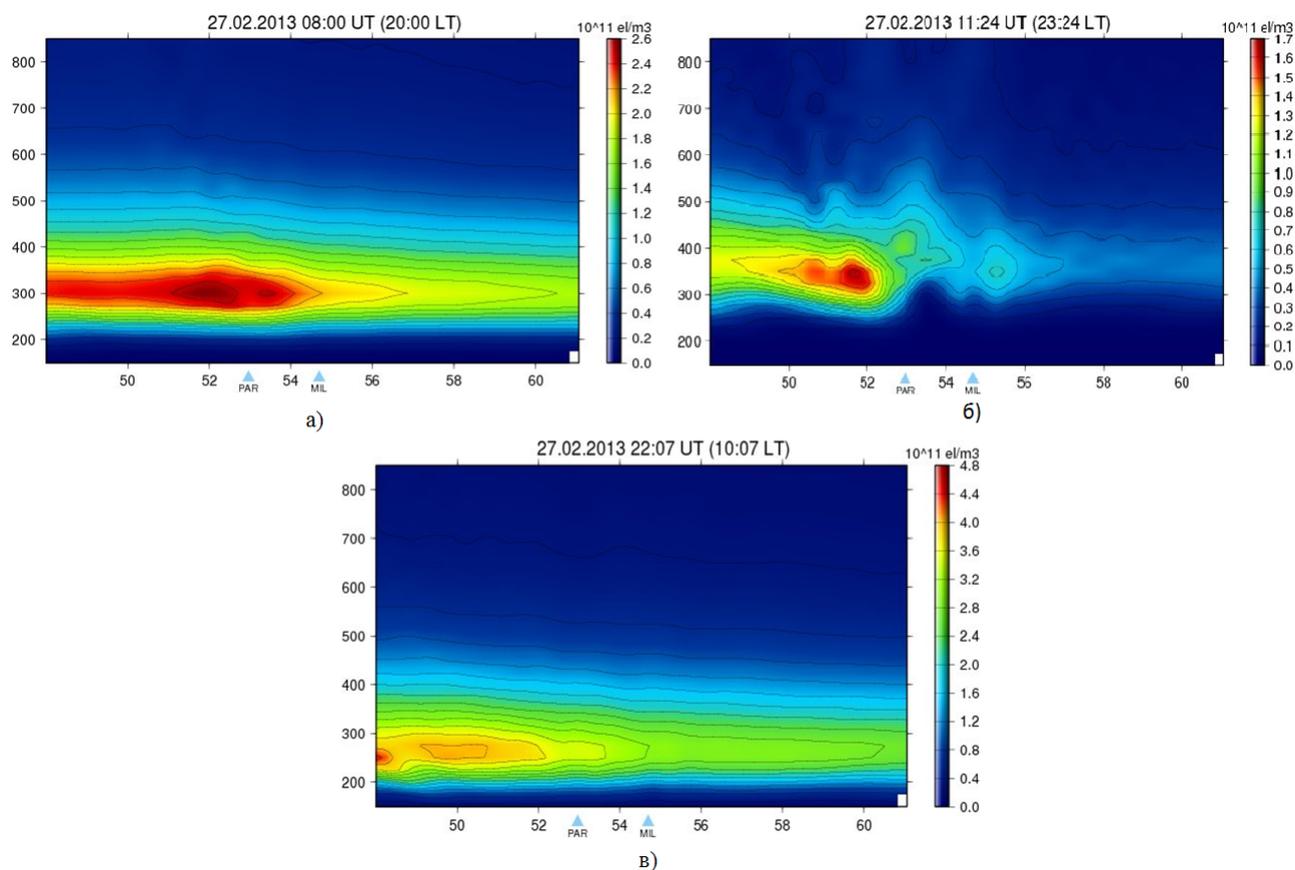


Рис. 5. Томограммы распределения электронов по высоте (вертикальная ось в км) и широте (горизонтальная ось в градусах) за 27.02.2013г. Треугольниками отмечены широты приемных станций в с. Паратунка (Par) и с. Мильково (Mil). Справа от рисунков представлена цветовая шкала распределения электронов с численным множителем $10^{11}(\text{eV}/\text{m}^3)$

Следует отметить, что после того как 01.03.2013г. произошли два землетрясения в $12^{\text{h}}53^{\text{m}}$ и в $13^{\text{h}}20^{\text{m}}$ (UT), в $14^{\text{h}}00^{\text{m}}$ и в $15^{\text{h}}00^{\text{m}}$ средствами вертикального радиозондирования было зарегистрировано высыпание заряженных частиц из радиационных поясов (образование К-слоя) (см. рис.4в).

Согласно магнитным данным за 02.03.2013 г. состояние магнитного поля определялось умеренной возмущенностью с $K_{\Sigma} = 18$ (см. рис.4в), период времени с $08^{\text{h}}00^{\text{m}}$ до $21^{\text{h}}00^{\text{m}}$ характеризовался режимом «F» ($F2\text{-spread}$). Это соответствует обычному поведению параметров ионосферы, которое сопутствует развитию магнитной бури без аномального поведения ионосферы.

Рассмотрим теперь поведение ионосферы в третьей декаде мая 2013г. 20 мая с $17^{\text{h}}00^{\text{m}}$ до $23^{\text{h}}00^{\text{m}}$ на фоне спокойной магнитосферы ($K_{\Sigma} = 10$) произошло аномальное превышение медианы текущими значениями критической частоты f_0F2 . На рис.6 динамика суточных значений параметров ионосферы за эту дату не представлена, поскольку характер поведения ионосферы за это число полностью соответствует её поведению за 23.05.2013, представленному на рис.6в.

21 мая, на фоне спокойной магнитосферы ($K_{\Sigma} = 8$), с 3^{h} до 6^{h} UT наблюдается расслоение слоя $F2$ по частоте и высоте (режим "H"); с $11^{\text{h}}00^{\text{m}}$ и до $22^{\text{h}}00^{\text{m}}$ UT

наблюдается турбулизация слоя F_2 ; с 10^h45^m и до 12^h45^m на высоте 140 км, а в 16^h00^m на 125 км, регистрируется корпускулярный слой K , обусловленный высыпанием частиц (см.рис.6а).

На томограммах за 21 мая (см. рис.7) турбулизация слоя F_2 просматривается при пролете спутника в 11^h28^m , максимум распределения электронов слоя F_2 приходится на 330 км с локальными образованиями повышенной концентрации электронов южнее с. Паратунки и севернее с. Мильково.

21.05.2013г. произошла серия землетрясений с магнитудами $M_C = 6.3$ (время 01^h55^m , $\varphi = 52.22^\circ$ с.ш., $\lambda = 160.89^\circ$ в.д.), $M_C = 6.0$ (время 03^h08^m , $\varphi = 52.18^\circ$ с.ш., $\lambda = 160.63^\circ$ в.д.), $M_C = 6.3$, (время 05^h43^m , $\varphi = 52.05^\circ$ с.ш., $\lambda = 160.49^\circ$ в.д.)

Следует отметить, что после серии землетрясений 28.02-01.03.2013 года в последующие дни аномальное поведение ионосферы не было зарегистрировано. Однако после серии землетрясений 21 мая 2013 года аномальное поведение параметров продолжилось. 22 мая в 00^h00^m происходит расслоение слоя F_2 по частоте и высоте (режим "H"), а с 09^h00^m до 21^h00^m турбулизация (см. рис.6), состояние магнитного поля умеренно-возмущенное ($K_\Sigma = 19$).

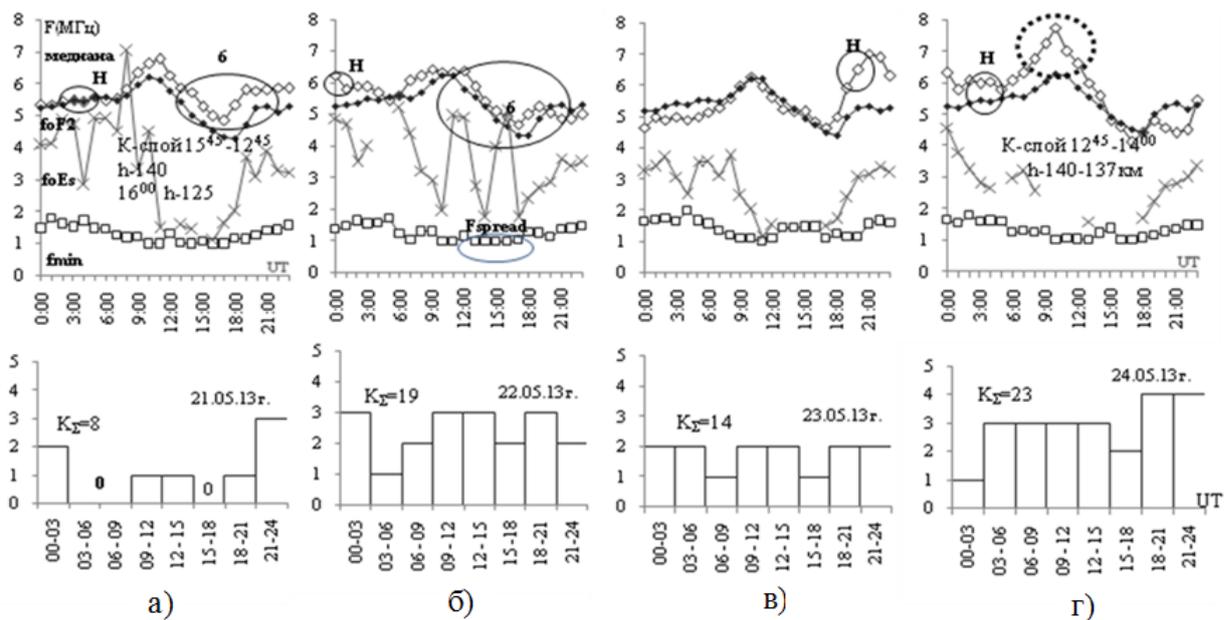


Рис. 6. Динамика суточных значений параметров ионосферы для сейсмического события 24.05.2013 г. \diamond - критических частот f_0F_2 ; \times - спорадического слоя f_oE_s , \square - минимальных частот f_{min}

23 мая произошло аномальное превышение медианы текущими значениями критической частоты f_0F_2 и зарегистрировано расслоение слоя F_2 по частоте и высоте (режим "H") с 16^h00^m до 20^h30^m на фоне спокойной магнитосферы ($K_\Sigma = 14$) (рис.6в).

К сожалению, по техническим причинам 22 и 23 мая томограммы распределения электронов не были получены.

24 мая была зарегистрирована магнитная буря с суточным значением индекса геомагнитной активности $K_\Sigma = 23$, с 02^h00^m до 05^h00^m происходит расслоение слоя F_2 по частоте и высоте (режим "H") (рис.6г). С 05^h30^m до 14^h30^m было зарегистрировано

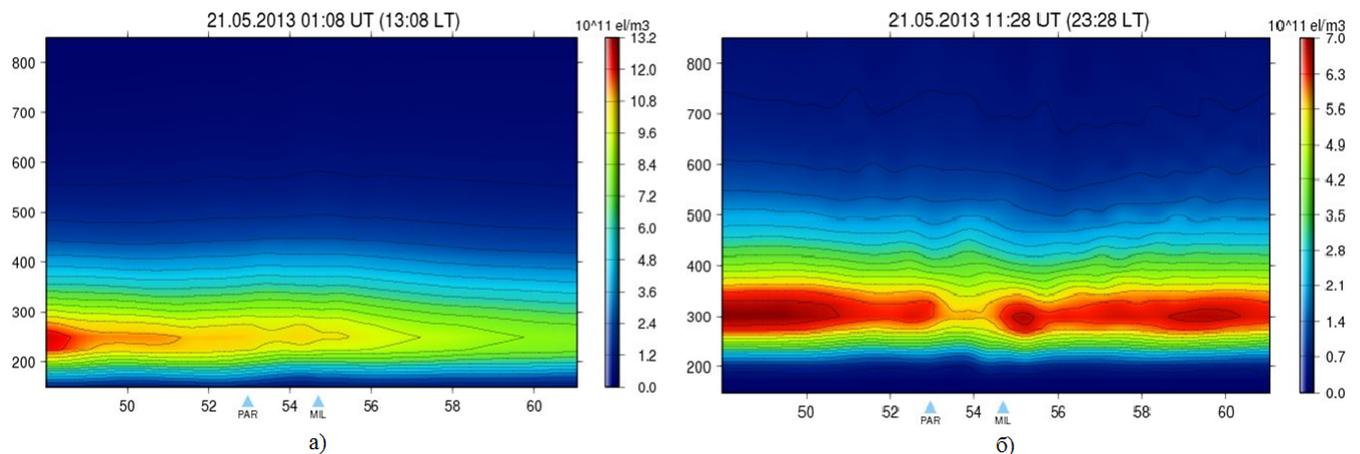


Рис. 7. Томограммы распределения электронов по высоте (вертикальная ось в км) и широте (горизонтальная ось в градусах) за 21.05.2013г. Треугольниками отмечены широты приемных станций в с. Паратунка (Par) и с. Мильково (Mil). Справа от рисунков представлена цветовая шкала распределения электронов с численным множителем $10^{11}(\text{eV}/\text{m}^3)$

аномальное превышение значений критической частоты по сравнению с медианными значениями, рассчитанными за последние 30 дней (на рис.6г выделено пунктирным овалом). Также 24 мая с $12^{\text{h}}45^{\text{m}}$ до $14^{\text{h}}00^{\text{m}}$ зафиксирован корпускулярный слой на высоте, обусловленный высыпанием заряженных частиц из радиационных поясов.

24.05.2013 г. в $05^{\text{h}}44^{\text{m}}$ в Охотском море произошло землетрясение с магнитудой $M_S = 7.4$ (время $05^{\text{h}}44^{\text{m}}$, $\phi = 54.75^\circ \text{с.ш.}$, $\lambda = 153.78^\circ \text{в.д.}$).

После землетрясения с $12^{\text{h}}5^{\text{m}}$ и до $14^{\text{h}}00^{\text{m}}$ было зарегистрировано высыпание заряженных частиц (образование -слоя) (см.рис.6г).

Вероятностный подход к анализу сейсмического режима.

Известно, что максимальные линейные размеры области формирования предвестников землетрясений от эпицентра связаны с магнитудой события формулой Добровольского $R \sim \exp M$ [9]. Поэтому при ретроспективном анализе сейсмического события, т.е. при его уже известных координатах и магнитуде, мы можем оценить область, в которой возможна регистрация предвестника. Однако регистрация предвестника в реальном времени в одной точке (например, с помощью АИС) и определение его интенсивности ("степень аномальности") не позволяет однозначно ответить на вопрос "где" и "какой" силы ожидается землетрясение. Для ответа на вопрос "где" можно воспользоваться теоретико-вероятностным подходом, подробно описанном в [10]. Для трёх сейсмоактивных областей (рис.8) были вычислены временные ряды вероятностей случайного события, определяемого как "попадание эпицентров сейсмических событий, произошедших в выбранном в объёме V , в заданные интервалы широты $\Delta\phi_i$ и долготы $\Delta\lambda_i$ ". Временной интервал ΔT с 01.01.1990 по 01.01.2014 гг. с окном $\Delta T = 1$ год и скользящим шагом $\Delta t = 1$ месяц. Распределения вероятностей были рассчитаны для сейсмических событий с энергетическим классом $9.0 \leq K_S < 14.0$ и интервалом глубин $0 \leq h \leq 100$. На рис.9-11 представлены временные ряды вероятностей $P(A)$ для каждой из

рассматриваемых областей S_1, S_2, S_3 , выбранных согласно делению Камчатского региона на зоны сейсмичности [11]. На временной шкале каждого графика отмечено время сейсмических событий с энергетическим классом $K_S \geq 14.0$, произошедших в соответствующей области. Анализ рассчитанных рядов вероятностей показал, что наибольшая сейсмическая активность за рассматриваемый период T наблюдалась в области S_2 , для которой средняя вероятность составила 0.57. Наименьшая – в области S_3 со средней вероятностью 0.13.

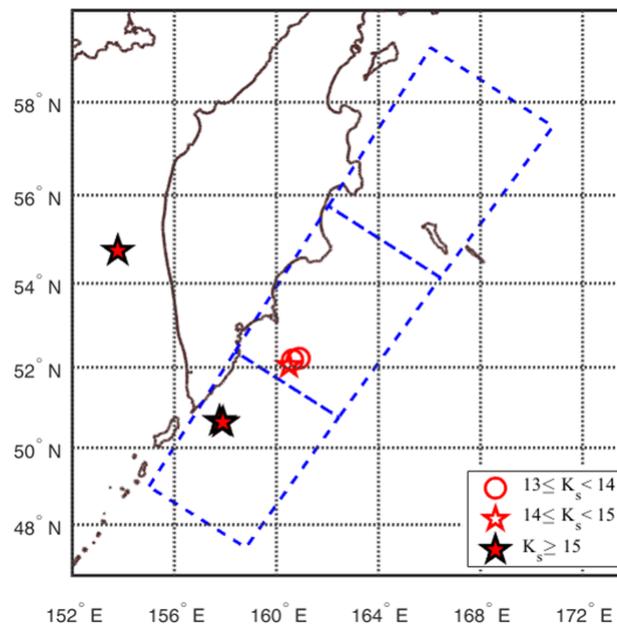


Рис. 8. Расположение исследуемых сейсмоактивных областей S_i . Расположение эпицентров сейсмических событий с энергетическим классом $K_S \geq 14.0$, произошедших в 28.02.2013 - 01.03.2013 гг. и 21.05.2013 - 24.05.2013 гг., обозначены звёздочками

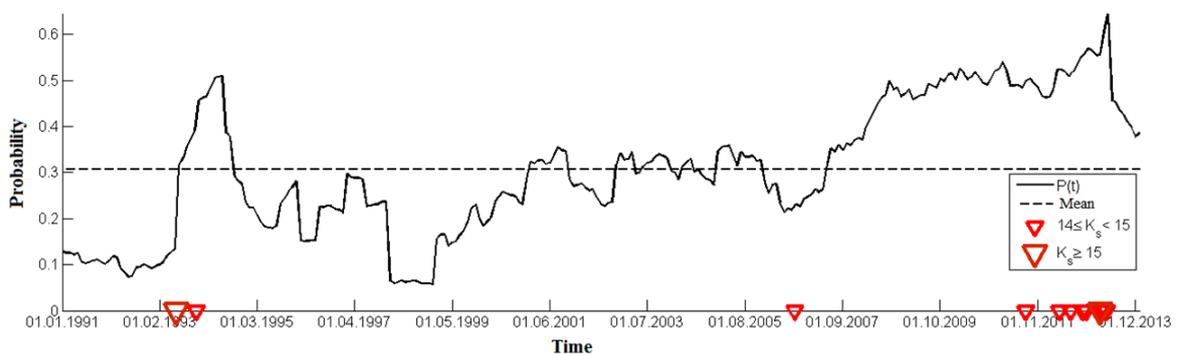


Рис. 9. Временной ряд вероятностей попадания сейсмических событий в область S_1

Для области S_1 средняя вероятность составила 0,3. В области S_3 заметное повышение вероятности происходило только в 1999 и 2006 гг. Для области S_2 в период 1990–2000 гг. характерна высокая сейсмическая активность, особенно в

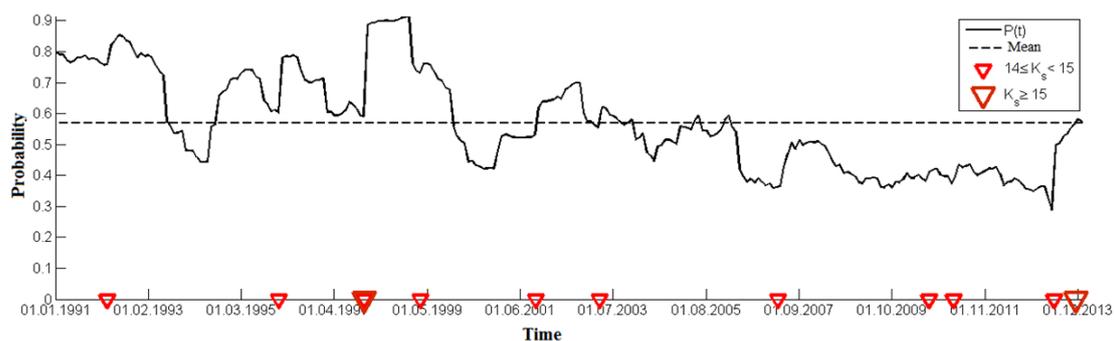


Рис. 10. Временной ряд вероятностей попадания сейсмических событий в область S_2

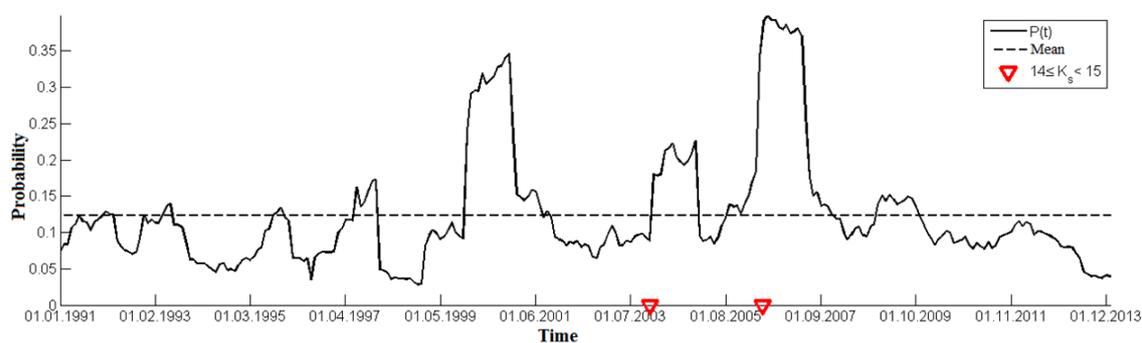


Рис. 11. Временной ряд вероятностей попадания сейсмических событий в область S_3

1990–1993 гг., а также после Кроноцкого события в 1997 – 1999 гг., когда вероятность попадания сейсмических событий в эту область была ≈ 0.9 [12].

В последующие годы сейсмическая активность в области S_2 стала снижаться и, начиная с 2006 г. вероятность стала меньше среднего многолетнего уровня. В области S_1 повышение сейсмоактивности было в 1993–1994 гг., когда вероятность попадания сейсмических событий в эту область достигла 0,5. Начиная с 2007 г. в S_1 происходил рост вероятностей, превысивший в 2 раза средний многолетний уровень в 2013 году. В период с 2007 по май 2013 г. в этой области произошло 11 сейсмических событий с энергетическим классом $K_S \geq 14.0$ и глубиной $h \leq 100$ км. Таким образом, с помощью представленного метода, основанного на применении теоретико-вероятностного подхода к каталогу Камчатских землетрясений, позволившего вычислить вероятности попадания сейсмических событий в заданные сейсмоактивные области, удалось обнаружить рост сейсмической активности, происходивший на протяжении 2007–2010 гг. в сейсмофокальной зоне Курил и Южной Камчатки (область S_1) и предшествовавший серии крупных землетрясений с $K_S \geq 14.0$, произошедших в этой зоне в 2011–2013 гг.

Анализ распределения вероятностей сейсмических событий в акватории Охотского моря не проводился. Однако по поведению ионосферы можно констатировать, что процессы в литосфере, сопутствующие этому землетрясению, оказывали на нее влияние, что подтверждает высказанную во Введении мысль: на ионосферных высотах происходит отображение ионосферных процессов,

происходящих в земной коре на территориях в сотни километров. Это нашло свое отражение в аномальном поведении параметров ионосферы с 22.05 по 24.05.2013 г.

Выводы

Ретроспективный анализ формирования информативных в Камчатском регионе ионосферных предвестников землетрясений, регистрируемых радиофизическими методами, за период 27.02-02.03.2013г. и 21.05-24.05.2013г. показал: накануне сейсмических событий, произошедших 28.02.2013 г. (14^h05^m UT с магнитудой $M_C = 6.6$) и 01.03.2013 г. (12^h53^m с магнитудой $M_C = 5.9$, 13^h20^m с магнитудой $M_C = 6.5$), 21.05.2013г. (01^h55^m с магнитудой $M_C = 6.3$, 03^h08^m с магнитудой $M_C = 6.0$, 05^h43^m с магнитудой $M_C = 6.3$) и 24.05.2013г. с магнитудой $M_C = 7.4$ сформировались все пять отмеченных выше признака.

Всем землетрясениям за несколько часов предшествовало высыпание частиц (п.1); за 1-2 суток произошло формирование диффузионного спорадического слоя E_S (E_S -spread) (п.2); за 1 сутки до события 28 февраля и за 2-3 суток до события 24 мая предшествовало формирование на фоне спокойной магнитосферы диффузионного слоя $F2$ ($F2$ -spread) (п.4); землетрясениям 1 марта за несколько часов предшествовало аномальное повышение значений критической частоты f_0F2 , превышающее медианные значения, на фоне развития магнитной бури (п.3), землетрясениям 1 марта и 24 мая предшествовало за 2 дня расслоение слоя $F2$ по частоте и высоте (п.5).

Применение теоретико-вероятностного подхода к каталогу Камчатских землетрясений позволило вычислить вероятности попадания сейсмических событий в сейсмоактивную область S_1 и установить для нее рост сейсмической активности, происходивший на протяжении 2007–2010 гг. в сейсмофокальной зоне Курил и Южной Камчатки (область S_1) и предшествовавший серии крупных землетрясений с $K_S \geq 14.0$, произошедших в этой зоне в 2011–2013 гг., включая события за 28 февраля - 01 марта 2013 с $K_S = 15.2$ ($M_C = 6.6$) и $K_S = 15.1$ ($M_C = 6.5$).

В области S_2 , в период 2007-2012 гг., предшествовавший наступлению серии землетрясений, произошедших 21.05.2013 г. с $K_S = 13.6$ ($M_C = 6.3$), $K_S = 13.9$ ($M_C = 6.0$) и $K_S = 14.4$ ($M_C = 6.3$), наблюдалось снижение сейсмической активности, при этом значения вероятностей попадания сейсмических событий в сейсмоактивную область S_2 принимали значения ниже среднего многолетнего уровня. После прохождения данной серии землетрясений, в области S_2 наблюдалось возрастание значений вероятностей. Следует отметить, что при достижении ими среднего многолетнего уровня 12.11.2013 г. произошло событие с $K_S = 15.0$ ($M_C = 6.4$). При этом за три дня до события на фоне развития магнитной бури сформировались все пять отмеченные выше признака.

Список литературы

- [1] Сорокин В.М., Чмырев В.М., Похотелов О.А., Липеровский В.А., “Обзор моделей литосферно-ионосферных связей в периоды подготовки землетрясений”, *Краткий прогноз катастрофических землетрясений с помощью радиофизических наземно-космических методов.*, Докл. конф. (Москва, 2-3 октября 1997.), ОИФЗ РАН, Москва, 1988, 64–85. [Sorokin V.M., Chmyrev V.M., Pohotelov O.A., Liperovskij V.A., “Obzor modelej litosferno-ionosfernih svyazej v periody podgotovki zemletrjasenij”, *Kratkij prognoz katastroficheskikh zemletrjasenij s pomoshhju radiofizicheskikh nazemno-*

- kosmicheskikh metodov.*, Dokl. konf. (Moskva, 2-3 oktjabrja 1997.), OIFZ RAN, Moskva, 1988, 64–85 (in Russian)].
- [2] Страхов В.Н., Мигулин В.В., Савин А.И., Уткин В.Ф., Куликов С.Д., Гивишвили Г.В., Ораевский В.Н., Похотелов О.А., Липеровский В.А., Резников А.Е., Болотов С.М., Малютин В.Н., Гуфельд И.Л., Пирогов Ю.А., “Краткий прогноз катастрофических землетрясений с помощью радиофизических наземно-космических методов”, *Краткий прогноз катастрофических землетрясений с помощью радиофизических наземно-космических методов.*, Докл. конф. (Москва, 2-3 октября 1997.), ОИФЗ РАН, Москва, 1988, 155–160. [Strahov V.N., Migulin V.V., Savin A.I., Utkin V.F., Kulikov S.D., Givishvili G.V., Oraevskij V.N., Pohotelov O.A., Liperovskij V.A., Reznikov A.E., Bolotov S.M., Maljutin V.N., Gufel'd I.L., Pirogov Ju.A., “Kratkij prognoz katastroficheskikh zemletrjasenij s pomoshh’ju radiofizicheskikh nazemno-kosmicheskikh metodov”, *Kratkij prognoz katastroficheskikh zemletrjasenij s pomoshh’ju radiofizicheskikh nazemno-kosmicheskikh metodov.*, Dokl. konf. (Moskva, 2-3 oktjabrja 1997.), OIFZ RAN, Moskva, 1988, 155–160 (in Russian)].
- [3] Liperovskaya, E.V., Bogdanov, V.V., Biagi, P.-F., Meister, C.-V., Liperovsky, V.A., Rodkin, M.V., “Day-time variations of foF2 connected to strong earthquakes.”, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2009, № 9, 1–7.
- [4] Liperovskaya, E.V., Bogdanov, V.V., Biagi, P.-F., Meister, C.-V., Liperovsky, V.A., “Day-time variations of foE connected to earthquakes”, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2011, № 8, 1807–1812.
- [5] Богданов В.В., “Интерпретация закона повторяемости землетрясений на примере Камчатского региона”, *ДАН*, **408**:3 (2006), 393–397. [Bogdanov V.V., “Interpretacija zakona povtorjaemosti zemletrjasenij na primere Kamchatskogo regiona”, *DAN*, **408**:3 (2006), 393–397 (in Russian)].
- [6] Андреева Е.С., Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., “Фазоразностная томография ионосферы”, *Геоматнезизм и аэрономия*, **32**:1 (1992), 104–110. [Andreeva E.S., Kunicyn V.E., Tereshhenko E.D., “Fazoraznostnaja tomografija ionosfery”, *Geomagnetizm i ajeonomija*, **32**:1 (1992), 104–110 (in Russian)].
- [7] Романов А.А., Романов А.А., Трусов С.В., Урличич Ю.М., “Современные подходы к созданию автоматизированной системы регистрации ионосферных предвестников землетрясений по спутниковым данным”, *Космонавтика и ракетостроение.*, 2006, № 1, 167–172. [Romanov A.A., Romanov A.A., Trusov S.V., Urlichich Ju.M., “Sovremennye podhody k sozdaniju avtomatizirovannoj sistemy registracii ionosfernyh predvestnikov zemletrjasenij po sputnikovym dannym”, *Kosmonavtika i raketostroenie.*, 2006, № 1, 167–172 (in Russian)].
- [8] Афрамович Э.Л., Перевалова Н.П., *GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли*, Иркутск, 2006, 480 с. [Aframovich Je.L., Perevalova N.P., *GPS-monitoring verhnej atmosfery Zemli*, Irkutsk, 2006 (in Russian), 480 pp.]
- [9] Добровольский И.П., *Теория подготовки тектонического землетрясения.*, ИФЗ АН СССР, М., 1991, 224 с. [Dobrovol’skij I.P., *Teorija podgotovki tektonicheskogo zemletrjasenija.*, IFZ AN SSSR, M., 1991 (in Russian), 224 pp.]
- [10] Богданов В.В., Павлов А.В., Полюхова А.Л., “Вероятностная модель сейсмичности на примере камчатских землетрясений”, *Вулканология и сейсмология.*, 2010, № 6, 64–74. [Bogdanov V.V., Pavlov A.V., Polyukhova A.L., “Verojatnostnaja model’ sejsmichnosti na primere kamchatskikh zemletrjasenij”, *Vulkanologija i sejsmologija.*, 2010, № 6, 64–74 (in Russian)].
- [11] Левина В.И. и др., “Сейсмичность Камчатского региона 1962–2011 гг”, *Вулканология и сейсмология*, 2013, № 1, 41–64. [Levina V.I. et al., “The seismicity of the Kamchatka region: 1962–2011”, *Journal of Volcanology and Seismology*, **7**:1 (2013), 37–57].
- [12] Левина В.И., Митюшкина С.В., Ландер А.В., Чеброва А.Ю., “Сейсмичность Камчатского региона за период детальных сейсмологических наблюдений.”, *Сейсмологические и геофизические исследования на Камчатке. К 50-летию детальных сейсмологических исследований.*, Холд. комп. «Новая книга», Петропавловск-Камчатский, 2012, 105–137. [Levina V.I., Mitjushkina S.V., Lander A.V., Chebrova A.Ju., “Sejsmichnost’ Kamchatskogo regiona za period detal’nyh sejsmologicheskikh nabljudenij.”, *Sejsmologicheskie i geofizicheskie issledovanija na Kamchatke. K 50-letiju detal’nyh sejsmologicheskikh issledovanij.*, Hold. komp. «Novaja kniga», Petropavlovsk-Kamchatskij, 2012, 105–137 (in Russian)].

Список литературы (ГОСТ)

- [1] Сорокин В.М., Чмырев В.М., Похотелов О.А., Липеровский В.А. Обзор моделей литосферно-ионосферных связей в периоды подготовки землетрясений. Краткий прогноз катастрофических землетрясений с помощью радиофизических наземно-космических методов. Докл. конф. Москва, 2-3 октября 1997. М.: ОИФЗ РАН. 1988. С. 64–85
- [2] Страхов В.Н., Мигулин В.В., Савин А.И., Уткин В.Ф., Куликов С.Д., Гивишвили Г.В., Ораевский В.Н., Похотелов О.А., Липеровский В.А., Резников А.Е., Болотов С.М., Малютин В.Н., Гуфельд И.Л., Пирогов Ю.А. Краткий прогноз катастрофических землетрясений с помощью радиофизических наземно-космических методов. Краткий прогноз катастрофических землетрясений с помощью радиофизических наземно-космических методов. Докл. конф. Москва, 2-3 октября 1997. М.: ОИФЗ РАН. 1988. С. 155–160
- [3] Liperovskaya, E.V., Bogdanov, V.V., Biagi, P.-F., Meister, C.-V., Liperovsky, V.A., Rodkin, M.V. Day-time variations of foF2 connected to strong earthquakes // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2009. № 9. p. 1–7
- [4] Liperovskaya, E.V., Bogdanov, V.V., Biagi, P.-F., Meister, C.-V., Liperovsky, V.A. Day-time variations of foE connected to earthquakes Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2011. no. 8. pp. 1807–1812
- [5] Богданов В.В. Интерпретация закона повторяемости землетрясений на примере Камчатского региона // ДАН. 2006. Т. 408. № 3. С. 393–397
- [6] Андреева Е.С., Куницын В.Е., Терещенко Е.Д. Фазоразностная томография ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия. 1992. Т. 32. №1. С. 104–110
- [7] Романов А.А., Романов А.А., Трусов С.В., Урличич Ю.М. Современные подходы к созданию автоматизированной системы регистрации ионосферных предвестников землетрясений по спутниковым данным // Космонавтика и ракетостроение. 2006. № 1. С. 167–172
- [8] Афрамович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: 2006. 480 с.
- [9] Добровольский И.П. Теория подготовки тектонического землетрясения. М.: ИФЗ АН СССР. 1991. 224 с.
- [10] Богданов В.В., Павлов А.В., Полюхова А.Л. Вероятностная модель сейсмичности на примере камчатских землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2010. № 6. С.64–74
- [11] Левина В.И. и др. Сейсмичность Камчатского региона 1962–2011 гг // Вулканология и сейсмология. 2013. №1. С. 41–64
- [12] Левина В.И., Митюшкина С.В., Ландер А.В., Чеброва А.Ю. Сейсмичность Камчатского региона за период детальных сейсмологических наблюдений. Сейсмологические и геофизические исследования на Камчатке. К 50-летию детальных сейсмологических исследований. Петропавловск-Камчатский: Холд. комп. «Новая книга», 2012. С. 105–137

Для цитирования: Богданов В. В., Павлов А. В. Динамика поведения ионосферных параметров накануне землетрясений в периоды 28.02.-01.03.2013 г и 19.05.-24.05.2013 г // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*. 2018. № 2(22). С. 85-99. DOI: 10.18454/2079-6641-2018-22-2-85-99

For citation: Bogdanov V.V., Pavlov A.V. Dynamics of ionospheric parameters before earthquakes on 28.02.2013-01.03.2013 and 19.05.2013-24.05.2013, *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki*. 2018, **22**: 2, 85-99. DOI: 10.18454/2079-6641-2018-22-2-85-99

DOI: 10.18454/2079-6641-2018-22-2-85-99

PHYSICS

MSC 86A10, 86A15

**DYNAMICS OF IONOSPHERIC PARAMETERS
BEFORE EARTHQUAKES ON 28.02.2013-01.03.2013
AND 19.05.2013-24.05.2013**

V. V. Bogdanov, A. V. Pavlov

Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, 684034,
Paratunka, Mirnaya str., 7, Russia

E-mail: vbogd@ikir.ru pavlov@ikir.ru

In the present report the variations of ionospheric parameters and ionospheric turbulence before and during seismic events are studied applying complex radiophysical methods and using a theoretical probability approach, suggested by the authors. The probability approach allowed to detect the growth of seismic activity in the Kamchatka region in 2013. It is found that characteristic ionospheric features as K-layer formation (corpuscular layer due to precipitation of particles from the radiation belts), increase of the characteristic f_0F2 -frequency and formation of F- spread as well as Es-spread occurred about one day before some seismic events on February-March (28.02.-02.03) 2013 and some days before series of the events on 19-24 May 2013.

Key words: ionosphere, lithosphere, tomography, vertical radiosonde, GPS-radiosounding, earthquake

© Bogdanov V. V., Pavlov A. V., 2018