УДК 523.31-853,551.510.535

АНОМАЛИИ В ИОНОСФЕРЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСТВЕ ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ ПЕРЕД КАМЧАТСКИМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ 30.01.2016 г. ПО ДАННЫМ ОБСЕРВАТОРИИ "ПАРАТУНКА"

© 2017 г. В. В. Бычков^{1,} *, Л. П. Корсунова^{2,} **, С. Э. Смирнов^{1,} ***, В. В. Хегай^{2,} ****

¹Институт космофизических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения РАН (ИКИР ДВО РАН), с. Паратунка, Елизовский район, Камчатский край
²Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк *e-mail: vasily.v.bychkov@gmail.com **e-mail: lpkors@rambler.ru
***e-mail: sergey.ed.smirnov@gmail.com ***e-mail: hegai@izmiran.ru Поступила в редакцию 19.05.2016 г.

После доработки 13.10.2016 г.

Проанализированы пятнадцатиминутные данные вертикального зондирования ионосферы, десятиминутные данные измерений вертикальной компоненты (*Ez*) 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. Анализ проведен с целью обнаружения возможных аномалий, предшествующих землетрясению магнитудой M = 7.2, произошедшему 30.01.2016 г. в 03:25 UT. Расстояние от обсерватории до эпицентра составляло 117 км. Такие аномалии были обнаружены, причем большая часть из них, по мнению авторов, может быть связана с процессами подготовки этого землетрясения.

DOI: 10.7868/S0016794017040058

1. ВВЕДЕНИЕ

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 временны́м упреждением.

В настоящей 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 [Липеровский и др., 1992; Pulinets and Boyarchuk, 2004], а аномалии в приземном атмосферном электричестве, предшествующие землетрясениям (АПАЭПЗ), являющиеся электрическими предвестниками землетрясения (ЭПЗ), детально разбираются в монографии [Электромагнитные ..., 1982], а также в работах [Руленко, 2000, 2008]. 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 [St-Laurent et al., 2006; Freund et al., 2006]. Общий обзор предвестников землетрясений всех возможных типов и их физическая природа подробно обсуждаются в монографии [Сидорин, 1992].

Целью настояшей работы является выделение ВИПЗ и АПАЭПЗ и их сопоставительный анализ перед Камчатским землетрясением 30.01.2016 г. (географические координаты эпицентра ϕ_e = = 54.01° N, λ_e = 158.01° E, магнитуда *M* = 7.2, глубина гипоцентра h = 161 км), произошедшим в 03:25 UT на эпицентральном расстоянии $R \cong 117$ км от комплексной геофизической обсерватории "Паратунка" (географические координаты ϕ = = 52.97° N, λ = 158.25° E). Для этого были использованы данные проводившихся на ней пятнадцатиминутных измерений параметров ионосферы, десятиминутных измерений вертикальной компоненты (Ег) приземного квазистатического атмосферного электрического поля (КАЭП) и соответствующих ему величин электропроводности приземного слоя воздуха (λ^+ и λ^-) в январе 2016 г.

Здесь необходимо отметить то обстоятельство, что рассматриваемое далее землетрясение принадлежит к классу землетрясений с промежуточной глубиной гипоцентра (60 км $\leq h \leq 300$ 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 ~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 [Апродов, 2000]), 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 [Nestorov, 1979] 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.

2. 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 [Rishbeth, 1991; Prölss, 1995]), а исследование приземного атмосферного электричества может осложнять наличие осадков [Михайлов и др., 2005; Руленко, 2008].

В нашей работе далее детально будет 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 обс. "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 [Михайлов и др., 2005].

Во-вторых, согласно http://wdc.kugi.kyoto-u. ac.jp/index.html, величина трехчасового Kp-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.

3. МЕТОД ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Обработка данных проводилась единообразно (как для абсолютных, так и для относительных изменений) для всех рассматриваемых в работе временны́х рядов физических параметров по методике, близкой к описанной в работах [Корсунова и Хегай, 2008; Korsunova and Hegai, 2014].

Процедура состояла в следующем. Сначала для выбранной совокупности дней для каждого момента времени суток вычислялась медиана $Y_{\text{med}}(t_i)$ для требуемого физического параметра $Y(t_i)$ (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 t_i на суточном интервале [$\Delta Y(t_i) = Y_{\text{current}}(t_i) - Y_{\text{med}}(t_i)$ и $\Delta Y(t_i)/Y_{\text{med}}(t_i)$] 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) IOR – разность между верхним и нижним квартилями соответствующего параметра, вычисленный на указанном трехдневном интервале. Тогда "шумовые" полосы K± = $= [\Delta Y(t_i)]_{\text{MED}} \pm 1.5 IQR$ или $K \pm = [\Delta Y(t_i)/Y_{\text{med}}(t_i)]_{\text{MED}} \pm 1.5 IQR$ $\pm 1.5IOR$ 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 $\Delta Y(t_i)$ (или $\Delta Y(t_i)/Y_{med}(t_i)$), величина 1.5IQR будет соответствовать примерно двум стандартным отклонениям. Значение $\Delta Y(t_i)$ (или $\Delta Y(t_i)/Y_{med}(t_i))$ 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*± обусловлен чисто случайными факторами, составляет всего 5%. Значения $\Delta Y(t_i)$ и $\Delta Y(t_i)/Y_{med}(t_i)$, выходящие за пределы соответствующей из обозначенных "шумовых" полос, относились нами к аномальным значениям $Y_{current}(t_i)$, 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 [Liu et al., 2006], 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 [Корсунова и Хегай, 2013] в соответствии с одним из алгоритмов, описанным в статье [Chen et al., 2004].

При этом составляется соответствующая таблица сопряженности признаков (contingency table) для выбранного интервала наблюдений. Дни распределяются в матрице 2 × 2 согласно своим характеристикам, а затем используется оценка Хансена-Койпера (Hanssen-Kuipers Score, True Skill Statistic, Pierce Skill Score, Rscore) [Chen et al., 2004]. Она представляет собой разность между вероятностью обнаружения истинной сейсмоионосферной аномалии, т. е. предваряющей землетрясение с заданным упреждением (в работе [Корсунова и Хегай, 2013] интервал упреждения был определен как ≤ 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 [Корсунова и Хегай, 2013] 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 [Корсунова и Хегай, 2013; Korsunova and Hegai, 2014; Korsunova and Hegai, 2015]. В отличие от этих работ здесь параллельно привлекаются также и независимые измерения электрических характеристик приземной атмосферы.

Далее в работе будут рассмотрены временны́е вариации следующих физических параметров:

h'Es — наименьшая действующая высота спорадического слоя *E* для обыкновенной волны;

foEs — 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;

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

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

 J_z — плотность вертикального тока проводимости в приземном слое воздуха, определяемая как произведение $\lambda_{\Sigma} E_z$, где $\lambda_{\Sigma} = abs(\lambda^+) + abs(\lambda^-)$.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 1 приведены вариации выбранных (см. раздел 3) 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-І аномалии действующей высоты *h'Es* появляются на ~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 [Ouzounov and Freund, 2004]).

Первая аномалия группы ВИПЗ-І в *h'Es* появляется за ~26.5 ч до землетрясения, а последние (в foEs и fbEs) заканчиваются за ~13 ч до него. Общая длительность аномалий в группе (от начала появления первой до исчезновения последней в этой группе) составляет ~13 ч. Анализ группы аномалий ВИПЗ-І 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 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 [Гершман, 1974]). Taким образом, над станцией зондирования ионосферы появляются более плотные и более неоднородные "облака" плазмы внутри регулярного слоя Е, собственно и составляющие спорадический слой Es.

Следует также отметить еще одно обстоятельство. Для группы аномалий ВИПЗ-І 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 ВИПЗ-II проявляется только в спорадическом слое *Es* практически синхронно (в *h*'*Es* и *foEs*) за ~6.4 часа до толчка и длится ~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 рисунке 2 представлено поле корреляции значений (*Ez*; λ_{Σ}) 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



Рис. 1. Изменения параметров ионосферных слоев *Es* и *F*2 со временем (UT): $a - \Delta h'Es$; $\delta - \Delta foEs/foEs_{med}$; $e - \Delta fbEs/fbEs_{med}$; $e - \Delta fbEs/fbEs_{med}$; $e - \Delta fbEs/fbEs_{med}$; $e - \Delta foF2/foF2_{med}$. 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*±, 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-1 и ВИПЗ-11).

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. $\rho^2 = 0.795^2 \approx 0.632$ и, следовательно, в 63.2% случаев изменения λ_{Σ} 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 λ_{Σ} и соответствующих "теоретических" вариаций в приземном атмосферном электричестве для сравнения их с полученными в результате наблюдений.

Как показано далее на рис. 3, 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 обс. "Паратунка" проводятся независимо друг от друга.

Рисунок 3 выполнен по аналогии с рис. 1, но для соответствующих электрических параметров



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

приземного слоя атмосферы (см. раздел 2). Пунктирные линии на панелях б и в показывают вариации этих же параметров в соответствии с "теоретической" моделью (см. рис. 2). 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-І 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 вертикальной компоненты КАЭП *Ег.* По времени группа АПАЭПЗ-I примерно соответствует группе ВИПЗ-I рис. 1.

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. 1.

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 ~01:30 UT регистрируется отрицательный "выброс" приращения действующей высоты $\Delta h'Es$ (см. рис. 1). К сожалению, ионосферные данные по слою *Es* на этом интервале времени далее (вблизи этого момента времени) слишком фрагментарны. Можно только отметить, что этот "выброс" приращения действующей высоты $\Delta h'Es$ в ионосферевозникает по времени несколько позже, чем возмущение в приземном электричестве, когда аномалия в $\Delta Jz/Jz_{med}$ уже успела развиться.

Более детальное сопоставление рис. 3 с рис. 1 (путем совмещения их временных осей) обнаруживает следующее. Аномалии в группе ВИПЗ-ІІ появляются практически синхронно с началом аномалии в КАЭП $\Delta Ez/Ez_{med}$, с незначительной задержкой. В группе ВИПЗ-І ситуация несколько сложнее. Аномальные изменения частотных параметров ионосферы, тесно связанные со структурой спорадического слоя Es, также начинаются с задержкой (незначительной для $\Delta foEs/foEs_{med}$, $\Delta fbEs/fbEs_{med}$, и около 4 часов для $\Delta foF2/foF2_{med}$) после начала аномалий в группе АПАЭПЗ-І величин $\Delta Jz/Jz_{med}$ и $\Delta \gamma$. Однако высотная его характеристика Δh'Es, начинает свой аномальный ход раньше примерно за три часа до того, как значения $\Delta Jz/Jz_{med}$ станут аномально низкими (оставаясь отрицательными). Тем не менее, из рис. 3 видно, что на протяжении этих трех часов величина $\Delta Jz/Jz_{med}$ не только отрицательна, но и проходит существенно ниже "теоретической" кривой для $\Delta Jz/Jz_{med}$, т.е. несмотря на то, что возмущение $\Delta Jz/Jz_{med}$ по своей величине еще не выходит за нижнюю границу своего разброса, высота ионосферного слоя *Es* растет, прежде чем в нем начнутся существенные его структурные изменения, что конечно, требует какого-то времени.

Сопоставление рис. 1 и 3 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 разви-



Рис. 3. То же, что и на рис. 1, но для электрических характеристик приземного слоя атмосферы: $a - \Delta \gamma$; $\delta - \Delta Ez/Ez_{med}$; $e - \Delta Jz/Jz_{med}$. Выделены две группы аномалий (эллипсы АПАЭПЗ-I и АПАЭПЗ-II) и отдельно – аномалия $\Delta Jz/Jz_{med}$ в начале суток 28.01.2016 г. Пунктирные линии на панелях δ и e показывают вариации этих же параметров в соответствии с "теоретической" моделью зависимости $Ez = Ez(\lambda_{\Sigma})$ (см. рис. 2).

тие 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. 4 приведены временные вариации Bz-компоненты межпланетного магнитного поля (ММП) и Kp-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 Kp-индекса во все часы суток не превышала уровня 1_, а величина Bz-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 $30^{\circ}-50^{\circ}$ наблюдается отрицательная корреляция вероятности появления *Es* с магнитной активностью (см. [Чавдаров и др., 1975]), а геомагнитная широта обс.-"Паратунка" составляет ~46°.

Вообще говоря, анализ ионосферных возмущений всегда требует особой и тщательной проверки на их возможную связь с геомагнитными возмущениями. Так, в работе [Astafyeva and Heki, 2011], направленной на изучение сейсмоионосферных аномалий по измерениям интегральной характеристики — полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере, показано, что при определенных условиях, отрицательные экскурсы B_{Z} -компоненты ММП величиной -5...-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 определе-



Рис. 4. Временные вариации *Вz*-компоненты межпланетного магнитного поля (верхняя панель) и *Кр*-индекса (нижняя панель) 29–30 января 2016 г. Штриховая линия со стрелкой отмечает момент землетрясения.

ния аномалии в частотных параметрах, полученный нами, составляет ~23% (для $\Delta foF2/foF2_{med}$, для других частотных параметров он только выше), а с другой стороны, интерполируя результат работы [Astafyeva and Heki, 2011] до наблюдаемого в нашем случае предельного отрицательного значения *Bz*-компоненты ММП -2.5 нТл, получим максимальную абсолютную величину возможного отклонения от фона ~7.5%, которая может быть связана с этим отрицательным экскурсом *Bz*-компоненты ММП.

5. ВЫВОДЫ

Проведен сопоставительный анализ данных пятнадцатиминутных измерений вертикального зондирования ионосферы и десятиминутных измерений вертикальной компоненты (*Ez*) приземного квазистатического атмосферного электрического поля (с соответствующими ему величинами электропроводности приземного слоя воздуха λ^+ и λ^-) 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 эпицентральным расстоянием 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 (АПА-ЭПЗ-I,-II). С учетом ранее проведенных исследований по обнаружению ионосферных предвестников землетрясений для Камчатского региона, выполненных в работе [Корсунова и Хегай, 2013], 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).

Авторы благодарят Думбраву Зинаиду Филипповну за содействие в проведении этой работы, а также NASA's Goddard Space Flight Center, USA за предоставление информации по планетарному индексу геомагнитной активности *Кр* и *Bz*-компоненте ММП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

— Апродов В.А. Зоны землетрясений. М.: Мысль, 461 с.
 2000.

— *Гершман Б.Н.* Динамика ионосферной плазмы. М.: Наука, 256 с. 1974.

— Корсунова Л.П., Хегай В.В. Анализ сейсмо-ионосферных возмущений на цепочке японских станций вертикального зондирования ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 48. № 3. С. 407–415. 2008.

— Корсунова Л.П., Хегай В.В. Об эффективности метода поиска ионосферных предвестников землетрясений по параметрам спорадического слоя *E* и регулярного слоя *F*2 / Сб. докл. VI Междунар. конф. "Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений". Паратунка, Камчатский край, 9–13 сентября 2013 г. Отв. ред. Шевцов Б.М. Петропавловск-Камчатский: изд-во ИКИР ДВО РАН. С. 412–417. 2013.

— Липеровский В.А., Похотелов О.А., Шалимов С.Л. Ионосферные предвестники землетрясений. М.: Наука, 303 с. 1992.

— 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 аэрономия. Т. 45. № 5. С. 690– 705. 2005.

— *Руленко О.П.* Оперативные предвестники землетрясений в электричестве приземной атмосферы // Вулканология и сейсмология. № 4. С. 57–68. 2000.

— Руленко О.П. Новая методика выявления и изучения предвестника землетрясений в электричестве приземной атмосферы // Вестник КРАУНЦ. Науки о земле. № 2. Вып. № 12. С. 42–47. 2008.

— Сидорин А.Я. Предвестники землетрясений. М.: Наука, 192 с. 1992.

— Чавдаров С.С., Часовитин Ю.К., Чернышева С.П., Шефтель В.М. Среднеширотный спорадический слой Е ионосферы. М.: Наука, 120 с. 1975.

— Электромагнитные предвестники землетрясений. Ред. Садовский М.А. М.: Наука, 69 с. 1982.

— Astafyeva E.I., Heki K. Vertical TEC over seismically active region during low solar activity // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 73. № 13. P. 1643–1652. 2011. doi 10.1016/ j.jastp.2011.02.020

— *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. Parts A/B/C. V. 31. Iss. 4–9. P. 389–396. 2006.

- Chen Y.-I., Liu J.-Y., Tsai Y.-B., Chen C.-S. Statistical tests for pre-earthquake ionospheric anomaly // Terr. Atmos. Ocean. Sci. J. V. 15. № 3. P. 385–396. 2004.

- http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html

- *Klotz S., Johnson N.L.* (Eds.) Encyclopedia of statistical sciences. N. J.: John Wiley, Hoboken, 1983.

- 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). V. 1. \mathbb{N}_2 1. P. 25–33. 2014.

— Korsunova L.P., Hegai V.V. Effectiveness criteria for methods of identifying ionospheric earthquake precursors by parameters of a sporadic E layer and regular *F*2 layer // J. Astron. Space Sci. V. 32. \mathbb{N} 2. P. 137–140. 2015.

 Liu J.Y., Chen Y.I., Chuo Y.J., Chen C.S. A statistical investigation of pre-earthquake ionospheric anomaly // J. Geophys. Res. V. 111. N A05304. 2006. doi 10.1029/ 2005JA011333

— Nestorov G.T. A possible ionospheric presage of the Vrancha earthquake of March 4, 1977 // Comptes rendus de l'Academie Bulgare des Sciences. V. 32. \mathbb{N} 4. P. 443–446. 1979.

— Ouzounov D., Freund F.T. Mid-infrared emission prior to strong earthquakes analyzed by remote sensing data // Adv. Space Res. V. 33. Iss. 3. P. 268–273. 2004.

- *Prölss G.W.* Ionospheric *F*-region storms / Handbook of Atmospheric Electrodynamics. V. 2. Ed. *Volland H.* Boca Raton. FL USA: CRC Press. Ch. 8. P. 195–248. 1995.

- *Rishbeth H. F*-region storms and thermospheric dynamics // J. Geomag. Geoelectr. V. 43. Suppl. 1. P. 513–524. 1991.

- 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. Parts A/B/C. V. 31. Iss. 4–9. P. 305–312. 2006.