

УДК 550.510.535

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ВОЗМОЖНЫХ
ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ПРИЗЕМНЫХ КВАЗИСТАТИЧЕСКИХ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЯХ И В ИОНОСФЕРЕ**

¹Л.П. Корсунова, ¹Ю.М. Михайлов, ¹В.В. Хегай,
¹Л.Н. Лешенко, ²С.Э. Смирнов, ²В.В. Богданов

**EXPERIMENTAL EVIDENCE OF RELATIONSHIP BETWEEN POSSIBLE FORESHOCKS IN THE
SURFACE QUASI-STATIC ELECTRIC FIELDS AND IN THE IONOSPHERE**

¹L.P. Korsunova, ¹Yu.M. Mikhailov, ¹V.V. Khagai,
¹L.N. Leshchenko, ²S.E. Smirnov, ²V.V. Bogdanov

Рассмотрены данные одновременных измерений параметров E_s - и F2-слоев ионосферы и вертикального градиента электрического потенциала в приземной атмосфере в период подготовки коровых землетрясений с $M=5.0\div 6.2$ в Камчатском регионе. Обнаружено появление аномально высокого E_s , сопровождаемое увеличением частотных параметров спорадического слоя и регулярного слоя F2, в те дни, когда отмечались выделенные ранее возможные предвестники землетрясений в атмосферных электрических полях. Выделены две группы предполагаемых предвестников землетрясений в ионосфере с различным временем упреждения о моменте землетрясения – от нескольких часов до двух недель. Представлены эмпирические зависимости, связывающие время упреждения о моменте землетрясения (от момента появления соответствующей аномалии в ионосфере или в приземном атмосферном электрическом поле до толчка) и эпицентрального расстояние до точки наблюдения с магнитудой землетрясения. Эти зависимости различны для двух групп предполагаемых предвестников землетрясений, но близки внутри каждой из групп для вероятных предвестников землетрясений, выделенных по измерениям квазистатического электрического поля (ЭПЗ) и обнаруженных в изменениях ионосферных параметров (ИПЗ).

Simultaneous measurements of E_s - and F2-layer parameters and of vertical gradient of electric potential in the surface atmosphere are studied. The data were obtained during the crustal earthquake preparations with $M=5.0\div 6.2$ in the Kamchatka region. We revealed occurrence of anomalously high E_s accompanied with increase in frequency parameters of the sporadic layer and F2 regular layer on the days when previously detected possible foreshocks were observed in atmospheric electric fields. Supposed foreshocks in the ionosphere were divided into 2 groups according to the lead time of earthquake – from some hours to 2 weeks. We present empirical dependences that connect the lead time (from the moment of occurrence of a corresponding anomaly in the ionosphere or in the surface atmospheric electric field to the moment of the shock) and epicentral distance to the observation point with the earthquake magnitude. These dependences are different in two groups of supposed foreshocks. However, they are similar inside each group for possible foreshocks derived from measurements of the quasi-static electric field and from changes in ionospheric parameters.

Введение

Появление сейсмо-ионосферных возмущений в период подготовки землетрясений вызывает значительный интерес; это важно как для понимания природы литосферно-ионосферного взаимодействия, так и для возможного практического использования в прогностических целях. Обсуждается два главных механизма такого взаимодействия: электромагнитные модели и воздействие акустико-гравитационных волн [Сорокин 1998, Pulinets, Boyarchuk, 2004]. В связи с тем, что предвестниковые эффекты весьма разнообразны, имеют разную продолжительность и величину отклонений от фоновых значений, в каждом конкретном случае наиболее подходящим оказывается тот или иной механизм сейсмо-ионосферного взаимодействия.

Так, для интерпретации возмущений длительностью $\tau=1.5\text{--}2.5$ ч в суточных вариациях частотных параметров F2 и E_s -слоев с пространственными масштабами $l \geq 500$ км часто привлекают гипотезу о воздействии на ионосферу акустико-гравитационных волн (АГВ) аналогичных масштабов, усиление активности которых действительно отмечалось в сейсмоактивные периоды [Хусамидинов, 1983]. Однако в [Корсунова, Хегай, 2008] было получено, что кажущиеся скорости распространения ионосферных возмущений с $\tau=2\text{--}3$ ч (идентифицированных как среднесрочные предвестники землетрясений) составляют примерно $4\text{--}8$ км/ч и сопоставимы со скоростями перемещения границы зоны подготовки землетрясения

в земной коре [Сидорин, 1979]. Такие скорости на два порядка меньше скоростей АГВ, и потому эта гипотеза не может служить удовлетворительным объяснением наблюдаемых ионосферных возмущений.

С другой стороны, появление аномально высокого E_s на $h=120\text{--}140$ км в период подготовки землетрясений, являющееся основным морфологическим признаком при идентификации ионосферных предвестников [Корсунова, Хегай, 2008], соответствует модельным расчетам, учитывающим воздействие электрических полей на ионосферу [Ким и др., 1993, Sorokin, et al., 2006]. Важный вклад в понимание природы такого взаимодействия могут внести одновременные измерения электрических полей в атмосфере и ионосферных параметров в каком-либо сейсмоактивном регионе. Такие измерения проводятся на геодинамическом полигоне в с. Паратунка вблизи Петропавловска-Камчатского, в Институте космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН.

Первые результаты сопоставления измерений вертикальной компоненты электрического поля в приземной атмосфере (E_z) и ионосферных параметров в период подготовки землетрясений были опубликованы в [Михайлов и др., 2002], где рассматривалась взаимосвязь между изменениями в слое F2 и квазистатическим электрическим полем. Однако в силу использования в этом исследовании только одного ионосферного параметра – критической частоты слоя F2 (f_0F2) и маскирующего эффекта магнит-

ных возмущений, четкой корреляции между поведением E_z и изменениями в F2-области ионосферы получить не удалось.

Аномалии электрического поля в атмосфере, которые можно было отнести к предвестникам землетрясений, и скорость их распространения обсуждались в работе [Mikhailov, 2007]. Было получено, что скорости распространения этих аномалий имеют величины порядка единиц километров в час, что близко к значениям кажущихся скоростей распространения ионосферных возмущений, отнесенных к предвестникам землетрясений в [Корсунова, Хегай, 2008]. Этот факт послужил отправным моментом для настоящей работы, направленной на выявление взаимосвязи между аномалиями в приземных атмосферных квазистатических электрических полях и ионосфере в периоды подготовки землетрясений. При этом для поиска ионосферных предвестников землетрясений (ИПЗ) использовалась методика, учитывающая одновременные измерения параметров ионосферных слоев E_s и F2 [Корсунова, Хегай, 2008].

Использовались данные измерений на ионосферной станции в Паратунке ($\varphi=52^\circ58.3' N$; $\lambda=158^\circ14.9' E$) за февраль, март 1992 г.; сентябрь, октябрь 1999 г. и сентябрь, октябрь 2002 г. Для сентября, октября 1999 г. проведена полная обработка ионосферных наблюдений с дискретностью 30 мин, для остальных месяцев использованы данные часовых измерений этой же станции из архива NOAA's National Geophysical Data Center (Space Physics Interactive Data Resource – SPIDR). Более детальная обработка ионосферных измерений необходима в связи с редкими случаями появления спорадического слоя E в рассматриваемые периоды времени (равноденствия), а также в связи с существованием двух спорадических образований, которые не отражены в часовых данных архива. Измерения электрических полей в атмосфере для указанных месяцев подробно рассмотрены в [Михайлов и др., 2002, Mikhailov, 2007]. Эти же измерения использовались также в настоящем исследовании для сопоставления с изменениями ионосферных параметров во время подготовки землетрясений.

Метод анализа

В работе [Корсунова, Хегай, 2008] был апробирован предложенный ранее метод выделения ИПЗ [Korsunova, Khagai, 2006], основанный на одновременных измерениях параметров E_s и F2-слоев. При этом основным критерием обнаружения предвестников служило появление аномально высокого E_s с длительностью существования $\tau \sim 2$ ч, с высотой, превышающей на 10 км и более фоновые значения действующей высоты образования спорадического слоя $h'E_s$. Кроме того, учитывались только те случаи, когда возрастания $h'E_s$ сопровождалось «всплесками» в частотных параметрах E_s (частоте экранирования f_bE_s и предельной частоте отражения f_oE_s) и критической частоте регулярного слоя F2 (f_oF2) той же длительности. Этот метод позволил обнаружить ИПЗ для 33 мощных землетрясений (ЗТ) с $M \geq 6$ в Японии, которые произошли в 1985–2001 гг.

Для Камчатки характерны более слабые ЗТ с $M < 6.5$, так что можно ожидать и более слабые ионосферные эффекты, предшествующие ЗТ. Это связа-

но с тем, что величина сейсмо-ионосферных возмущений зависит от магнитуды M предстоящего ЗТ [Korsunova, Khagai, 2006]. Тем не менее, предложенные выше критерии определения предвестников использовались и для Камчатки. Но, в отличие от [Korsunova, Khagai, 2006], в качестве фоновых значений ионосферных параметров использовались средние значения по 10 магнитоспокойным дням, предшествовавшим ЗТ. Это связано с тем, что на рассматриваемой широте достаточно велико влияние магнитных возмущений на параметры слоя F2.

Для выявления предполагаемых ионосферных предвестников ЗТ находились отклонения текущих значений исследуемых величин ($h'E_s$, f_bE_s , f_oE_s , f_oF2) от фоновых для каждого часа суток, а для контрольных периодов 1999 г. – для каждых 30 мин. Для частотных параметров вычислялись отношения величин этих отклонений к фоновым значениям ($(\Delta f_b/f_b)E_s$; $(\Delta f_o/f_o)E_s$; $\Delta f_oF2/f_oF2$). Анализ проводился в период от суток, предшествовавших моменту ЗТ, до появления предвестника. Отмечались все случаи, которые отвечали приведенным выше признакам (подробное описание методики см. в [4]).

На рис. 1 представлены отклонения основных ионосферных параметров со временем опроса 30 мин в период подготовки ЗТ 18.09.99 с $M = 6.0$ и E_z -компоненты электрического поля [Mikhailov, 2007]. Расстояние от эпицентра ЗТ до пункта наблюдения (R) составляло 190 км. Момент удара обозначен штриховой линией со стрелкой. Время появления электрического предвестника землетрясения (ЭПЗ) определялось по моменту возникновения отрицательной бухты во временных изменениях E_z , а ионосферного предвестника землетрясения (ИПЗ) – по регистрации аномально высокого E_s (тип “h” – жирный пунктир на рис. 1).

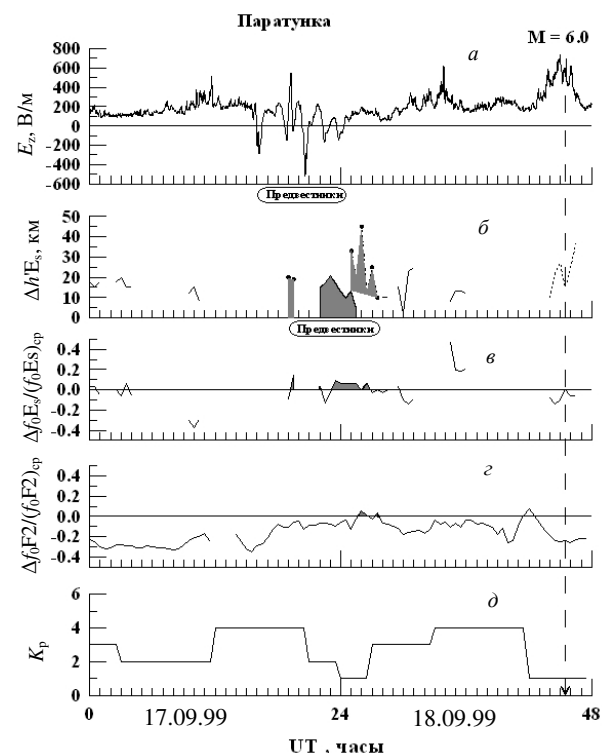


Рис. 1. Изменения величины вертикального градиента электрического потенциала (а), параметров ионосферы (б–с) и K_p -индекса (д) в период подготовки землетрясения 18.09.1999 г.

Зачерненные всплески в ионосферных параметрах, отвечающие указанным выше критериям, отнесены к предполагаемым предвестникам. На нижней панели приведены изменения K_p -индекса [Solar-Geophysical Data, 1999] за тот же период времени. Видно, что подготовка землетрясения 18.09.1999 проходила во время магнитных возмущений. Именно поэтому положительные отклонения в частотных параметрах слоев E_s и F2 очень малы, но появление их в тот же период времени, что и аномалий в E_z и $h'E_s$, и нарушение наблюдаемой тенденции к отрицательным отклонениям в f_0F2 свидетельствуют об их сейсмогенной природе. Однако в отсутствие данных по E_s -слою выделение ИПЗ только по f_0F2 во время магнитных возмущений весьма затруднительно, на что указывалось в работе [Михайлов и др., 2002]. Сравнение изменений ионосферных параметров и E_z -компоненты электрического поля показывает, что предвестник ЗТ в электрическом поле появляется раньше, чем в ионосфере. Кроме того, за несколько часов до подземного толчка отмечаются всплески в параметрах E_s , которым соответствует увеличение E_z -компоненты электрического поля.

Анализ временных вариаций ионосферных параметров при подготовке землетрясений в отсутствие заметных геомагнитных возмущений (когда среднесуточный магнитный индекс $A_p \leq 17$ нТл) показывает, что можно выделить две группы (I, II) существенных отклонений в параметрах E_s , которые удовлетворяют морфологическим признакам идентификации ИПЗ, определенным в [Корсунова, Хегай, 2008] и различающимся по времени упреждения момента ЗТ, т. е. ИПЗ первого и второго порядков срочности соответственно. Это иллюстрирует рис. 2, построенный по получасовым ионосферным данным, на котором показаны обе группы ИПЗ (обозначения те же, что и на рис. 1).

Видно, что эти группы различаются не только по времени упреждения подземного толчка (ΔT), но и по величине отклонений внутри групп и их продолжительности. Причем наибольшие отклонения в ионосферных параметрах отмечаются в группе II в E_s -слое. Длительность всплесков и их число в группе II также больше, чем в группе I, для которой характерны кратковременные одиночные всплески.

Изменения квазистатического электрического поля в сентябре, октябре 2002 г., представленные в работе [Mikhailov, 2007], сопоставлялись с соответствующими изменениями в E_s - и F2-слоях по часовым данным. Определялся момент появления предвестников землетрясения и время упреждения ими главного удара ΔT . В таблице приведены результаты такого сопоставления наряду с параметрами анализируемых землетрясений.

К сожалению, для марта 1992 г. данные по электрическому полю отсутствуют, а для землетрясения, произошедшего 05.10.1999 г., предвестник ЗТ в группе II однозначно не идентифицируется (прочерки в таблице). Звездочкой отмечены предвестники ЗТ, выделенные ранее в работе [Mikhailov, 2007] только по измерениям электрического поля. В остальных случаях были выявлены слабые бухтообразные возмущения в поведении электрического поля в пределах суточного интервала, центрированного относительно появ-

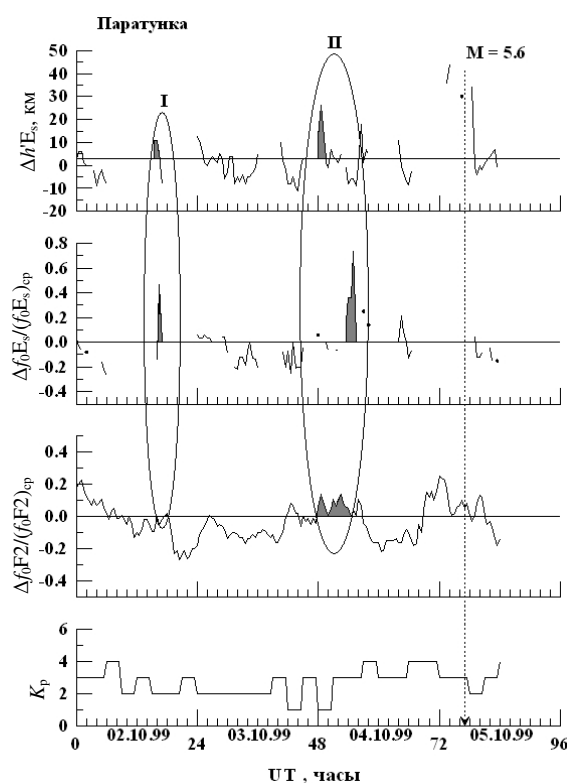


Рис. 2. Временные вариации отклонений параметров ионосферы и изменения K_p -индекса (нижняя панель) в период подготовки землетрясения 05.10.1999 г. Две группы предполагаемых предвестников обозначены римскими цифрами I и II.

вления ИПЗ. Момент появления такого возмущения с максимальной амплитудой и соответствующее ему ΔT указаны в таблице, из которой следует, что аномалии в E_z появляются несколько ранее, чем в ионосфере, или одновременно с ионосферными.

Результаты и обсуждение

Результаты анализа вариаций ионосферных параметров за предшествующий землетрясениям период (для шести землетрясений) показывают, что можно выделить две группы всплесков с длительностью $\tau \sim 1.5 \div 2$ ч, которые соответствуют признакам предвестников ЗТ и, как правило, сопровождаются специфическими бухтами в вариациях E_z -компоненты электрического поля. Появление таких всплесков наблюдается обычно в освещенное время суток. Длительность всплесков в E_s для группы II, в основном, имеет продолжительность $\tau \sim 1.5 \div 2$ ч, что несколько больше, чем для всплесков группы I. Наибольшие отклонения ионосферных параметров имеют группы ИПЗ с малым временем упреждения, которые мы обозначили ранее как ИПЗ второго порядка срочности. Как следует из таблицы, для одинаковых эпицентральных расстояний предвестники в обеих группах появляются тем раньше, чем больше величина M последовавшего землетрясения. Это свойство является характерным для исследованных нами ранее ИПЗ [Korsunova, Khagai, 2006]. Однако существование двух групп ИПЗ, отличающихся не только по величине ΔT , но и по амплитуде отклонений, обнаружено нами впервые.

Для вариаций E_z -компоненты электрического поля в приземной атмосфере также можно выделить

Таблица

Характеристики ионосферных и электрических предвестников землетрясений

| Дата и время ЗТ, UT | M | R, км | Группа I | | | | Группа II | | | |
|-------------------------|-----|----------|-------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|
| | | | ИПЗ | | E_z | | ИПЗ | | E_z | |
| | | | Дата и время, UT | ΔT , сут | Дата и время, UT | ΔT , сут | Дата и время, UT | ΔT , сут | Дата и время, UT | ΔT , сут |
| 08.10.02 09 ч 19 мин | 5.0 | 120 | 06.10.02 22 ч | 1.5 | 06.10.02 23 ч | 1.4 | 07.10.02 20 ч | 0.5 | 07.10.02 17 ч | 0.7 * |
| 03.10.02 15 ч 57 мин | 5.2 | 280 | 02.10.02 20 ч | 0.8 | 02.10.02 21 ч | 0.8* | 03.10.02 06 ч | 0.4 | 03.10.02 04 ч | 0.5 |
| 20.10.02 01 ч 35 мин | 5.3 | 110 | 16.10.02 22 ч | 3.2 | 16.10.02 15 ч | 3.4 | 18.10.02 23 ч | 1.1 | 18.10.02 23 ч | 1.1* |
| 05.10.99 05 ч 02 мин | 5.6 | 190 | 02.10.99 15 ч 30 мин | 2.6 | 02.10.99 12 ч | 2.7 | 04.10.99 00 ч. | 1.2 | – | – |
| 02.03.92 14 ч 08 мин | 6.0 | 160 | 25.02.92 19 ч | 5.8 | – | – | 29.02.92 15 ч | 1.9 | – | – |
| 18.09.99 21 ч 29 мин | 6.0 | 190 | 14.09.99 07 ч 30 мин | 4.6 | 14.09.99 06 ч | 4.7 | 17.09.99 19 ч | 1.1 | 17.09.99 16 ч 30 мин | 1.2* |
| 05.03.92 14 ч 39 мин | 6.1 | 130 | 21.02.92 10 ч | 13.2 | – | – | 02.03.92 22 ч | 2.7 | – | – |
| 16.10.02 10 ч 12 мин | 6.2 | 160 | 04.10.02 20 ч | 11.6 | 04.10.02 14 ч | 11.8 | 14.10.02 14 ч | 1.8 | 14.10.02 22 ч | 1.5* |

две группы специфических возмущений перед ЗТ, отличающихся по своей структуре и времени появления. Эти времена указаны в таблице, из которой следует, что возмущения E_z -компоненты наблюдаются в те же дни, что и ионосферные, хотя времена появления несколько отличаются от них. В зависимости от времени появления они отнесены в таблице к группам I и II соответственно.

Анализ амплитуд возмущений электрического поля показывает, что в группе II преобладают возмущения электрического поля с отрицательными знаками и амплитудой от -200 В/м до -1500 В/м. В группе I отклонения в электрическом поле представляют собой небольшие знакопеременные $\pm(150 \div 300)$ В/м бухтообразные возмущения с $\Delta t \sim (1 \div 1.5)$ ч. Эти различия по амплитуде изменений и их длительности аналогичны отмеченным выше особенностям ИПЗ соответствующих групп. Поэтому можно предположить, что появление двух групп различных предвестников ЗТ (в электрическом поле и в ионосфере) соответствует различным фазам подготовки ЗТ.

Следует отметить, что предвестники ЗТ в электрических полях с большим временем упреждения ($3 \div 26$ сут) для землетрясений с $M = 5.0-6.4$ наблюдались в Китае [Нао, et al., 2000]; они соответствуют, по видимому, идентифицированным нами электрическим предвестникам землетрясений (ЭПЗ) первого порядка срочности. Для камчатских землетрясений в вариациях E_z -компоненты электрического поля уверенно выделяются предвестники землетрясений в пределах суток до момента ЗТ [Руленко, 2000; Смирнов, 2005], отвечающие характеристикам предвестников ЗТ второго порядка срочности по нашей классификации. Возможно, это связано с тем обстоятельством,

что величина сейсмогенных аномалий в E_z второго порядка срочности обычно в несколько раз превышает изменения поля для группы первого порядка срочности, так что их трудно выделить на фоне суточных изменений E_z . Наибольшие времена упреждения момента землетрясения (2, 3 и 6 месяцев) были выявлены для аномалий в изменениях градиентов и фазовых скоростей сверхнизкочастотных ($f=0.03-0.1$ Гц) геомагнитных возмущений перед землетрясениями с $M=5.8$ и 6.4 в Японии для эпицентральных расстояний $R < 150$ км [Исмаилов и др., 2006]. Хотя природа этих аномалий может быть иной, нежели для обнаруженных нами аномалий в ионосфере и изменениях вертикального градиента электрического потенциала, появление их свидетельствует о длительном периоде подготовки землетрясения, включающем несколько различных этапов.

Тенденции изменения логарифма произведения времени упреждения начала ЗТ (ΔT) на эпицентрального расстояния (R) в зависимости от магнитуды землетрясения (M) для обеих групп предполагаемых предвестников землетрясений показаны на рис. 3 (точки – ИПЗ, квадраты – ЭПЗ).

Аппроксимирующие прямые проведены на основании метода наименьших квадратов. Для предвестников землетрясений группы I получены выражения

$$\lg(\Delta T \times R)_{\text{ИПЗ}} = 0.81M - 1.83;$$

$$\lg(\Delta T \times R)_{\text{ЭПЗ}} = 0.81M - 1.81. \quad (1)$$

Для предвестников землетрясений группы II, более близкой к моменту землетрясения, получены выражения

$$\lg(\Delta T \times R)_{\text{ИПЗ}} = 0.54M - 0.79;$$

$$\lg(\Delta T \times R)_{\text{ЭПЗ}} = 0.35M + 0.25. \quad (2)$$

Из рис. 3 видно, что полученные эмпирические зависимости близки между собой, особенно для группы I. Это подтверждает взаимосвязь аномалий E_z сейсмогенного происхождения с появлением возмущений в ионосферных параметрах, которые можно отнести к ИПЗ. Кроме того, формулы (1) весьма близки к полученной в [Сидорин, 1979] зависимости

$$\lg(\Delta T \times R) = 0.72M - 0.72 \quad (3)$$

для предвестников землетрясений, распространяющихся в земной коре. Это позволяет соотнести их с одной и той же фазой подготовки землетрясения. Различия в свободном члене в формулах (1)–(3) отражают, по-видимому, структурные особенности земной коры в зоне подготовки землетрясения. Физический смысл высокой корреляции между $\lg(\Delta T \times R)$ и магнитудой M землетрясения для наземных предвестников землетрясений рассмотрен в [Сидорин, 1979] на основе теории «включения» и представления об очаге землетрясения как растущей зоне с повышенной трещиноватостью. Границы зоны подготовки землетрясения определяются радиусом $r = 10^{0.43M}$ км [Dobrovolsky, et al., 1979], откуда следует, что $\lg r$ будет линейно зависеть от магнитуды. Это означает, что в приводимых в работе эмпирических зависимостях в правой части в неявном виде фигурирует размер зоны подготовки землетрясения, растущий с увеличением магнитуды землетрясения. Чем больше энергия (магнитуда) готовящегося землетрясения, тем раньше могут проявиться его предвестники, соответственно, больше становится время упреждения предвестником момента зем-

мента землетрясения ΔT . Обратно пропорциональная зависимость времени упреждения от эпицентрального расстояния до пункта наблюдения вытекает из конечности величины скорости распространения границы зоны подготовки землетрясения: чем ближе расположен пункт наблюдения, тем раньше достигнет его эта граница, тем больше времени пройдет до момента землетрясения, по сравнению с пунктами, лежащими ближе к предельной величине радиуса зоны его подготовки. Согласно исследованиям, проведенным в [Сидорин, 1979], учет этого фактора и умножение времени упреждения предвестником момента землетрясения ΔT на эпицентральное расстояние R для соответствующей группы предвестников увеличивает коэффициент корреляции с величины 0.71 (когда игнорируется зависимость от эпицентрального расстояния) до величины 0.94 (когда эта зависимость принимается во внимание).

Как было показано в [Корсунова, Хегай, 2008], на основании выражений (1), (2) можно оценить кажущиеся скорости перемещения возмущений от сейсмического источника в атмосфере и ионосфере. При распространении возмущения от 100 до 200 км для $M = 6.0$ получаем для группы I кажущуюся скорость перемещения $V = (0.7 - 0.8)$ км/ч; для группы II – $V_{\text{ИПЗ}} = 3$ км/ч, $V_{\text{ЭПЗ}} = 3.7$ км/ч. Для такой же магнитуды землетрясения и указанных эпицентральных расстояний в соответствии с (3) имеем $V = 0.3$ км/ч. Сравнение полученных кажущихся скоростей показывает, что возмущения в ионосфере и электрических полях в группе I следуют за расширяющейся на поверхности земли границей области подготовки землетрясения. Полученные скорости распространения сейсмогенных возмущений в группе II практически совпадают с кажущимися скоростями перемещения возмущений в ионосфере по данным станций вертикального зондирования в Японии (4.4 ± 3.3 км/ч) [Корсунова, Хегай, 2008] и полученными ранее скоростями ЭПЗ в работе [Mikhailov, 2007]. Близкие времена появления ЭПЗ и ИПЗ для одновременных наблюдений в одном пункте, соответствие структуры возмущения для двух групп предвестников и кажущихся скоростей распространения возмущений в атмосферных электрических полях и в ионосфере свидетельствуют в пользу физического механизма сейсмо-ионосферного взаимодействия, основанного на модификации квазиэлектростатических полей в приземной атмосфере и их дальнейшего воздействия на ионосферу [Pulinets, et al., 2000]. Как следует из этой модели, одним из важных факторов воздействия на приземное квазиэлектростатическое поле является эманация радиоактивных газов из грунтовых вод и поверхности земли в период подготовки землетрясений. Можно предположить, что область повышенного выхода радиоактивных газов отслеживает расширяющуюся границу зоны подготовки землетрясения на поверхности земли, образованную притоком грунтовых вод в микротрещины напряженного участка земной коры. Действительно, во многих случаях за несколько суток до землетрясения наблюдалось увеличение концентрации радона в грунтовых водах и поверхностных слоях земли на [Virk, Singh, 1994; Steintz, et al., 1996]. Даль-

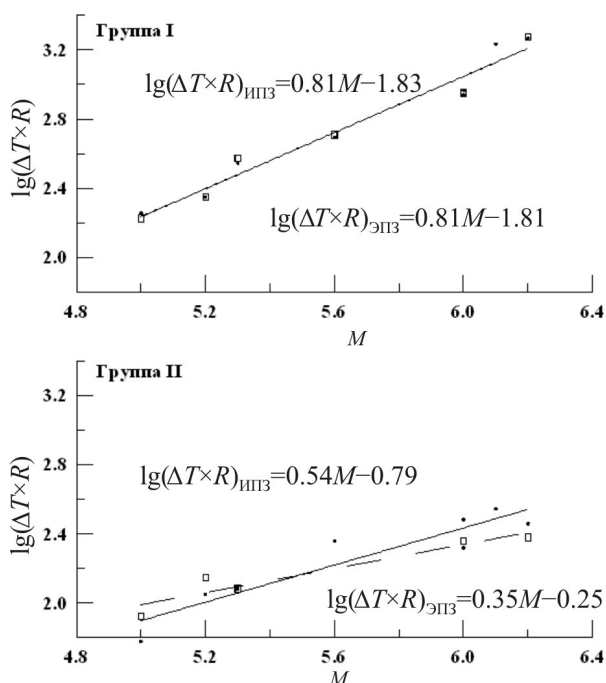


Рис. 3. Логарифмы произведения времени упреждения момента ЗТ (ΔT , сутки и их доли) на эпицентральное расстояние (R , км) в зависимости от магнитуды землетрясения (M) для двух групп предполагаемых предвестников землетрясений и аппроксимирующие их прямые (сплошная линия – аппроксимация для ИПЗ, штриховая – для ЭПЗ).

нейшая верификация физических механизмов литосферно-ионосферного взаимодействия, предложенных в [Pulinets, et al., 2000], требует постановки комплексных экспериментов по одновременным измерениям в нескольких пунктах концентрации радона, аэрозолей, атмосферных электростатических полей, метеорологических параметров и характеристик ионосферы. Наиболее перспективным в России в этом отношении является геодинамический полигон на Камчатке, где высока сейсмическая активность.

Выводы

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы.

1. По данным одновременных измерений параметров в E_s - и F2-слоях ионосферы и вертикального градиента электрического потенциала в приземной атмосфере (E_z) в период подготовки коровых землетрясений с $M=5.0-6.2$ в Камчатском регионе выделены две группы возможных предвестников землетрясений с различным временем упреждения момента землетрясения (ΔT) – от нескольких часов до двух недель, соответствующих, по-видимому, различным фазам подготовки землетрясения. Амплитуды предполагаемых предвестников в группе, более близкой к моменту землетрясения, существенно выше.

2. Получены эмпирические зависимости, отражающие тенденцию к изменениям между временем упреждения момента землетрясения предполагаемыми предвестниками, расстоянием от точки наблюдения до эпицентра и магнитудой землетрясения. Эти зависимости оказались близкими для выделенных аномалий в ионосфере и приземных электрических полях, что свидетельствует в пользу их взаимосвязи в процессе литосферно-ионосферного взаимодействия во время подготовки землетрясения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Исмаилов В.С., Копытенко Ю.А., Хаттори К., Хаякава М. Использование градиентов и фазовых скоростей СНЧ геомагнитных возмущений для определения местоположения очага будущего сильного землетрясения // Геомагнетизм и аэрономия. 2006. Т. 46, № 3. С. 423–430.

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

Ким В.П., Хегай В.В., Иллич-Свитыч П.В. О возможности образования слоя ионов металлов в E-области ночной среднеширотной ионосферы перед сильными землетрясениями // Геомагнетизм и аэрономия. 1993. Т. 33, № 5. С. 114–119.

Михайлов Ю.М., Михайлова Г.А., Капустина О.В. и др. Вариации различных атмосферных и ионосферных параметров в периоды подготовки землетрясений на Камчатке. Предварительные результаты // Геомагнетизм и аэрономия. 2002. Т. 42, № 6. С. 805–813.

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

Сорокин В.М., Чмырев В.М., Похотелов О.А., Липеровский В.А. Обзор моделей литосферно-ионосферных связей в периоды подготовки землетрясений // Краткосрочный прогноз катастрофических землетрясений с помощью радиофизических наземно-космических методов / Под ред. акад. В.Н. Страхова и д.ф.-м.н. Липеровского В.А. М.: ОИФЗ РАН, 1998. С. 64–83.

Сидорин А.Я. Зависимость времени появления предвестников землетрясений от эпицентрального расстояния // Докл. АН СССР. 1979. Т. 245, № 4. С. 825–828.

Смирнов С.Э. Особенности отрицательных аномалий квазистатического электрического поля в приземной атмосфере на Камчатке // Геомагнетизм и аэрономия. 2005. Т. 45, № 2. С. 282–287.

Хусамидинов С.С. Ионосферные исследования // Электрические и магнитные предвестники землетрясений / Под ред. д.ф.-м.н. В.П. Головкина. Ташкент: ФАН УзССР, 1983. С. 90–111.

Dobrovolsky I.R., Zubkov S.I., Myachkin V.I. Estimation of the size of earthquake preparation zones // Pageoph. 1979. N 117. P. 1025–1044.

Hao J., Tang T., Li D. Progress in the research on atmospheric electric field anomaly as an index for short-impending prediction of earthquakes // J. Earthquake Prediction Res. 2000. V. 8. N 3. P. 241–255.

Korsunova L.P., Khagai V.V. Medium-term ionospheric precursors to strong earthquakes // Int. J. Geomagn. Aeron. 2006. V. 6. GI3005. doi:10.1029/2005GI000122.

Mikhailov Yu M. On the properties of earthquake precursors in the electrostatic field of the surface atmosphere // Phys. of the Solid Earth. 2007. V. 43, N 4. P. 336–339.

Pulinets S.A., Boyarchuk K.A. Ionospheric Precursors of Earthquakes. Berlin, Springer. 2004. 315 p.

Pulinets S.A., Boyarchuk K.A., Hegai V.V., et al. Quasi-electrostatic model of atmosphere-thermosphere-ionosphere coupling // Adv. Space Res. 2000. V. 26, N 8. P. 1209–1218.

Sorokin V.M., Yaschenko A.K., Hayakawa M. Formation mechanism of the lower ionospheric disturbances by the atmospheric electric current over a seismic region // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2006. V. 68. N 11. P. 1260–1268.

Solar-Geophysical Data. 1999 / Ed H.E. Coffey.

Steintz G., Vulkan U., Lang D. Monitoring of the tectonically related radon flux in Israel // Isr. Geol. Surv. Current Res. 1996. V. 10. P. 148–153.

Virk H.S., Singh B. Radon recording of uttarkashi earthquake // Geophys. Res. Lett. 1994. V. 21, N 8. P. 737–740.

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН, Троицк

²Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, с. Паратунка