

УДК 550.510.535

ЗАКОНОМЕРНОСТИ В ПРОЯВЛЕНИИ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ИОНОСФЕРЕ И ПРИЗЕМНЫХ АТМОСФЕРНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЯХ НА КАМЧАТКЕ

© 2013 г. Л. П. Корсунова¹, В. В. Хегай¹, Ю. М. Михайлов¹, С. Э. Смирнов²

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Троицк (Московская обл.)

²Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, п. Паратунка (Камчатская обл.)
e-mail: lpkors@rambler.ru

Поступила в редакцию 05.05.2011 г.

После доработки 27.01.2012 г.

Проведен анализ данных ежечасных измерений ряда ионосферных параметров в Петропавловске-Камчатском за 1998–2002 гг., для которых ранее были обнаружены предвестники землетрясений в вертикальной компоненте приземного атмосферного квазистатического электрического поля (E_z) – аномальные отрицательные “бухты” в E_z . В ряде случаев одновременно с аномальными отрицательными “бухтами” в E_z наблюдался аномально высокий спорадический слой E_s , отвечающий критериям идентификации его как ионосферного предвестника землетрясения. Со всеми такими случаями были сопоставлены землетрясения разной мощности со значительным временным запаздыванием после появления предвестника (более 5 сут). Представлены эмпирические зависимости, связывающие время упреждения предвестником момента землетрясения, магнитуду землетрясения и расстояние от пункта наблюдения до эпицентра по всей совокупности имеющихся данных (в том числе и для одновременных измерений параметров E_s и E_z). Показано, что эти зависимости близки к полученным ранее для долгосрочных предвестников землетрясений в наземных геофизических полях в этом же сейсмоактивном регионе. Приведены оценки времен упреждения этими предвестниками моментов землетрясений на границах зон подготовки.

DOI: 10.7868/S0016794013020089

1. ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени выделено большое количество предвестников землетрясений, представляющих собой значимые отклонения в параметрах различных геофизических полей в литосфере, нижней атмосфере и ионосфере Земли [Зубков и Мигунов, 1975; Сидорин, 1979; 1992; Зубков, 1983, 1987; Липеровский и др., 1992; Гуфельд и Гусев, 1998; Korsunova and Khegai, 2006; Исмагилов и др., 2006; Копылова и Серафимова, 2010]. Анализ мировых данных по предвестникам землетрясений в различных приземных геофизических полях позволил установить, что почти все они обнаруживают долгосрочные (годы–десятилетия для магнитуд $M \geq 6$), среднесрочные (недели–месяцы) и краткосрочные (часы–сутки) аномальные вариации, отражающие различные стадии подготовки сейсмических событий [Зубков, 1987]. Также было показано, что времена упреждения моментов землетрясений долго- и среднесрочными предвестниками в эпицентральной области находятся в тесной корреляционной связи с магнитудой землетрясения, увеличиваясь с ее ростом. Однако с удалением от эпицентра забла-

говременность появления предвестников зависит не только от энергии готовящегося землетрясения, но и от расстояния пункта наблюдения до будущего эпицентра. Так, в статье [Сидорин, 1979] было получено, что при учете удаленности пункта наблюдения от эпицентра землетрясения все предвестники можно подразделить на две большие группы, которые автор назвал соответственно долгосрочными и краткосрочными. Оказалось, что некоторые предвестники, появляющиеся непосредственно перед землетрясениями, на самом деле относятся к группе долгосрочных предвестников, проявляющихся в точке наблюдения, удаленной от эпицентра соответствующего землетрясения на значительное расстояние. Эти группы характеризуются вполне определенными, но разными зависимостями вида $\lg(\Delta T \times R) = aM + b$, где M – магнитуда землетрясения, R – расстояние от эпицентра до точки наблюдения, ΔT – промежуток времени от момента появления предвестника до момента землетрясения (время упреждения). В литературе приводятся и другие зависимости такого рода [Гуфельд и Гусев, 1998], но большая часть их получена по

данным наземных измерений. Существенные подвижки в изучении закономерностей появления предвестников землетрясений в нижней (включая приземный слой) и верхней атмосфере произошло в последнее десятилетие [Hao et al., 2000; Корсунова и Хегай, 2005; 2010; Liu et al., 2006; Korsunova et al., 2010]. В указанных работах получены эмпирические зависимости как времен упреждения предвестниками моментов землетрясений, так и вероятности обнаружения предвестника от магнитуд последовавших землетрясений и расстояний от эпицентров до пунктов наблюдений. Зависимости времени появления предвестника от магнитуды и эпицентрального расстояния получены не только по ионосферным измерениям, но и по наблюдениям атмосферных электрических полей [Korsunova et al., 2010]. По литературным данным заблаговременность появления предвестников зависит также от глубины гипоцентра готовящегося землетрясения [Mikhailov, 2007; Бахмутов и др., 2007; Xia et al., 2011].

Анализ многолетних ионосферных наблюдений в сейсмоактивных зонах позволил выделить аномалии в ионосферных параметрах, соответствующие разным стадиям подготовки землетрясений, которые были идентифицированы как долгосрочные и среднесрочные предвестники землетрясений [Korsunova and Khagai, 2006; Perrone et al., 2010; Korsunova et al., 2010]. Оказалось, что закономерности появления этих аномалий в ионосфере соответствуют результатам наземных измерений. Несомненно, что эмпирические зависимости, связывающие заблаговременность появления предвестника землетрясения с его магнитудой и эпицентральной дистанцией до точки наблюдения представляют большой интерес, но все они получены в эпигнозе. Возникает естественный вопрос – всегда ли в реальном времени за выделенными предвестниками следуют землетрясения? Действительно, в ряде случаев это не так [Смирнов, 2005; Perrone et al., 2010]. Поэтому важно различать реальные предвестники, за которыми по истечении некоторого времени следуют землетрясения, и “ложные”, т.е. аналогичные аномалии, не сопровождающиеся землетрясениями. Ранее, на нескольких примерах, нами было показано, что если при измерениях в одном и том же пункте предвестники появляются в атмосферном квазистатическом электрическом поле и в ионосфере, то за ними, как правило, следуют землетрясения [Korsunova et al., 2010]. Если этот вывод будет подтвержден и для других землетрясений, то это будет означать, что реальные предвестники можно выделять по одновременным измерениям ионосферных параметров и E_z -компоненты приземного атмосферного квазистатического электрического поля в одном и том же пункте.

С этой целью были рассмотрены результаты измерений E_z -компоненты приземного атмосферного квазистатического электрического поля, полученные одним из авторов настоящей статьи, и ионосферных параметров в п. Паратунка Камчатской обл. за 1998–2002 гг. Ежечасные данные ионосферных измерений для исследуемого периода были взяты из ресурса NOAA National Geophysical Data Center (NGDC), USA.

2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ И АНАЛИЗ ДАННЫХ

В работе [Смирнов, 2005] по наблюдениям градиента потенциала электрического поля в условиях “хорошей погоды” было выделено 103 отрицательные “бухты” в E_z -компоненте приземного атмосферного квазистатического электрического поля, которые обычно связывают с предвестниками землетрясений. Однако только в 37% случаев за ними последовали землетрясения с энергетическим классом $K = 11–15$ ($M = 4.7–6.7$) на эпицентральных расстояниях $R = 100–1000$ км в течение последующих ближайших суток. Повидимому, именно эти случаи относятся к краткосрочным предвестникам землетрясений. Возможно, что некоторая часть оставшихся отрицательных аномалий в E_z принадлежит к группе предвестников с большим временем упреждения момента землетрясения, как это было обнаружено в Китае [Hao et al., 2000]. Если это так, то в дни появления этих предвестников в E_z могут проявляться и предвестники в ионосфере, в частности в спорадическом слое E (E_s), как это следует из публикации [Korsunova et al., 2010]. Для проверки этого предположения были обработаны данные ежечасных ионосферных измерений, проведенных в том же пункте для тех же месяцев и лет, когда наблюдались предвестники землетрясений в приземных электрических полях, уже выделенные ранее в работе [Смирнов, 2005].

В связи с тем, что в ионосфере до сих пор не обнаружено специфических аномалий, связанных исключительно с подготовкой землетрясений, а не с другими геофизическими событиями, например, магнитными бурями, к их предвестникам относят обычно статистически значимые изменения того или иного из ионосферных параметров: критической частоты регулярного слоя $F2$ ($foF2$), предельной частоты отражения от спорадического слоя E (fEs), частоты экранирования ($fbEs$) и др. [Липеровский и др., 1992; Гуфельд и Гусев, 1998; Ondoh, 2003; Pulnits and Boyarchuk, 2004; Hobar and Parrot, 2005; Liu et al., 2006; Oyama et al., 2011]. Нами [Korsunova and Khagai, 2006; Корсунова и Хегай, 2008] была предложена методика выделения ионосферного предвестника землетрясений не по одному параметру, а по определенному набору морфологических признаков,

выявленных в результате длительных наблюдений ионосферы перед землетрясениями разного энергетического класса в различных сейсмоактивных регионах. Согласно этой методике для ионосферных предвестников землетрясений характерны:

- появление аномально высокого спорадического слоя E (E_s), превышающего фоновые значения действующих высот ($h'E_s$) в спокойных геофизических условиях для конкретного времени суток не менее чем на 10 км в течение 1–3 ч;

- увеличение частот E_s не менее чем на 20%, сопровождающееся повышением $foF2$ такой же продолжительности в пределах суточного интервала времени ± 12 ч относительно момента появления аномально высокого E_s .

Эта методика была апробирована для коровых землетрясений (глубина гипоцентра не более 60 км) с использованием данных вертикального зондирования ионосферы в таких сейсмо-активных регионах как Япония, Камчатка, Прибайкалье, Италия [Корсунова и Хегай, 2008; Korsunova et al., 2010; Корсунова и др., 2010; Perrone et al., 2010], что позволило обнаружить предвестники землетрясений с различным временем упреждения момента землетрясений (ΔT). Здесь следует заметить, что область применения предложенной методики естественным образом ограничена широтами, в которых достаточно часто наблюдается среднеширотный спорадический слой E , подчиняющийся уже хорошо известным суточным и сезонным закономерностям [Чавдаров и др., 1975]. Так как аномальные изменения параметров E_s составляют основу нашей методики, то сравнительный анализ предполагаемых предвестников землетрясений в E_s и E_z возможен только для тех месяцев, когда вероятность появления спорадического слоя E составляла не менее 50%. Для Петропавловска-Камчатского (географические координаты ионозонда $\varphi = 53.02^\circ$ N; $\lambda = 158.65^\circ$ E) это, в основном, летние месяцы. Поэтому нами были обработаны ионосферные данные за август 1998 г., июнь–август 1999 г., июль 2000 г., май–июнь и август–сентябрь 2001 г., апрель–май 2002 г. Для нахождения предполагаемых ионосферных предвестников землетрясений выполнялись следующие процедуры:

- вычислялись отклонения текущих значений действующих высот E_s ($\Delta h'E_s$), частот экранирования ($\Delta fbEs$) и критических частот слоя $F2$ ($\Delta foF2$) от средних значений этих параметров по геомагнитно-спокойным дням ($A_p \leq 10$ –15 нТл);

- определялись дни, когда отклонения во всех трех параметрах отвечали критериям выбора ионосферного предвестника, т.е. $\Delta h'E_s \geq 10$ км, $\Delta fbEs/(fbEs)_{cp} \geq 20\%$ и $\Delta foF2/(foF2)_{cp} \geq 10\%$ в течение времени $\tau = 1$ –3 ч.

В 19-ти случаях для всех указанных месяцев были обнаружены аномалии в E_s , отвечающие критериям выбора ионосферного предвестника землетрясения. В 13-ти случаях за этими предвестниками с различным временем запаздывания (ΔT) последовали землетрясения с магнитудами $M = 5.0$ –6.0, произошедшие на расстояниях 100–400 км от пункта наблюдения.

В 6-ти случаях в спокойных гелио-геомагнитных условиях наблюдались аномалии в E_s , за которыми не последовали землетрясения указанной магнитуды, так что “ложные тревоги” составили 32%. Все реальные ионосферные предвестники, сопровождавшиеся землетрясениями, представлены в табл. 1. В ней показаны также расстояния R эпицентров этих землетрясений до пункта наблюдения, вычисленные по дуге большого круга с учетом высоты E_s . Следует отметить, что ионосферная информация принимается ионозондом с некоторой довольно большой области, характерный размер которой составляет не менее 50 км, но для определенности в дальнейших расчетах используются именно эти вычисленные расстояния. В 7-ми случаях из 13-ти обнаруженных предвестников в E_s в одни и те же сутки отмечались и предвестники в электрическом поле (в табл. 1 эти случаи помечены звездочками). Отсутствие предвестников в E_z в остальных случаях может быть связано с невозможностью его уверенной идентификации по погодным условиям.

В эти же месяцы были обнаружены аномальные отрицательные “бухты” в E_z -компоненте электрического поля, которые не сопровождались ни аномалиями в E_s , ни землетрясениями (36%). Часть из них наблюдалась в магнито-возмущенные дни, другая часть – в спокойные, но все они относятся к “ложным предвестникам”, так как их невозможно соотносить с какими-либо землетрясениями. Таким образом, число “ложных тревог” по наблюдениям аномалий в E_z примерно такое же, как и для ионосферных наблюдений. Но нет ни одного случая, чтобы за предвестником в E_z следовало землетрясение, а в E_s предвестник для этого землетрясения не проявлялся бы. Следовательно, в условиях “хорошей погоды” отличить реальные предвестники в E_z от ложных можно только при наличии одновременных ионосферных измерений. Реальные предвестники в E_s и E_z появляются в одни и те же сутки, поэтому время упреждения этими предвестниками момента землетрясения для одновременных измерений одно и то же (см. табл. 1).

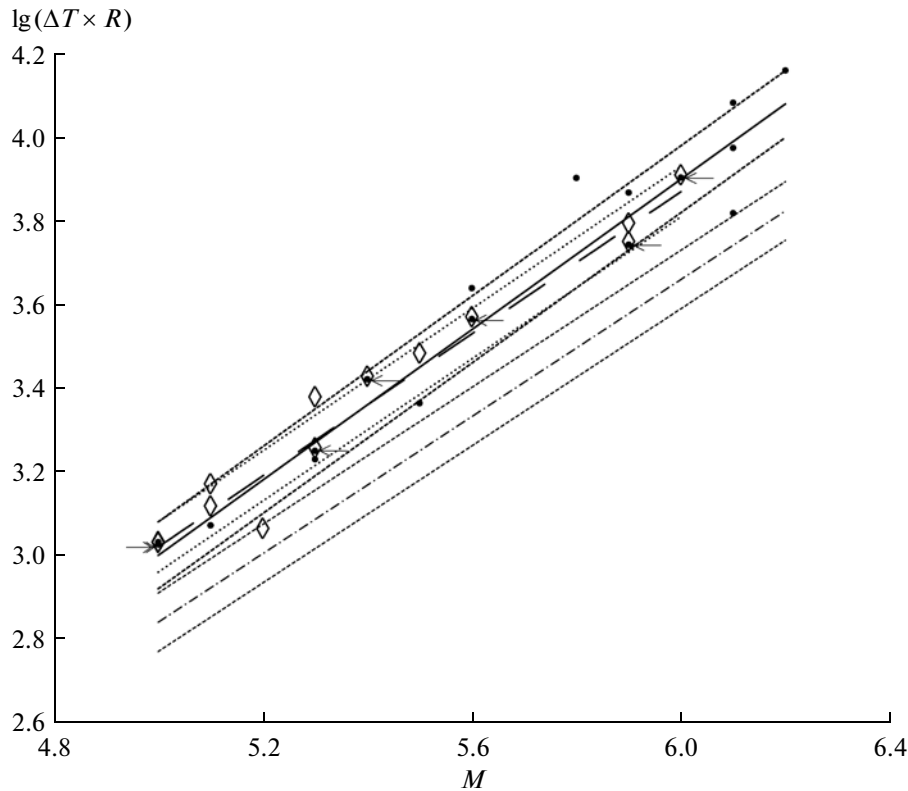
Для всех выделенных ионосферных предвестников землетрясений прослеживается тенденция изменения времени упреждения предвестником момента землетрясения в зависимости от магнитуды землетрясения (M) и эпицентрального расстояния (R) до точки наблюдения. Чем больше

Таблица 1. Характеристики землетрясений и их возможных долгосрочных предвестников

№	Дата землетрясения	M	R , км	Дата предвестника	ΔT , сут
Аномалии в спорадическом слое E (E_s)					
1*	30.08.1998	5.6	260	16.08.1998	14.5
2*	13.07.1999	5.0	180	08.07.1999	5.8
3*	06.08.1999	5.9	370	21.07.1999	15.2
4*	06.09.1999	5.0	120	28.08.1999	9.3
5*	18.09.1999	6.0	200	10.08.1999	39.9
6	12.05.2000	5.2	210	07.05.2000	5.5
7	03.06.2000	5.5	130	10.05.2000	24.0
8	08.06.2000	5.1	130	29.05.2000	9.8
9	01.09.2001	5.3	140	14.08.2001	17.0
10*	08.10.2001	5.3	160	26.09.2001	11.6
11*	10.10.2001	5.4	170	24.09.2001	15.6
12	08.05.2002	5.9	200	06.04.2002	32.0
13	29.05.2002	5.1	210	22.05.2002	7.0
Аномалии в вертикальной компоненте приземного электрического поля (E_z)					
14	09.02.1997	5.9	350	19.01.1997	21.1
15	06.12.1997	6.1	270	02.11.1997	34.0
16	07.12.1997	6.2	360	27.10.1997	40.4
17*	30.08.1998	5.6	250	16.08.1998	14.5
18	11.01.1999	5.6	130	08.12.1998	33.8
19	08.03.1999	5.8	120	02.01.1999	64.0
20	07.07.1999	6.1	460	23.06.1999	14.5
21*	13.07.1999	5.0	180	08.07.1999	5.8
22*	06.08.1999	5.9	360	21.07.1999	15.2
23*	06.09.1999	5.0	110	28.08.1999	9.3
24*	18.09.1999	6.0	200	10.08.1999	39.9
25	31.12.1999	5.0	120	22.12.1999	9.3
26	27.08.2000	5.1	40	24.07.2000	33.7
27	17.09.2001	5.3	100	31.08.2001	17.0
28*	08.10.2001	5.3	150	26.09.2001	11.6
29*	10.10.2001	5.4	170	24.09.2001	15.6
30	28.01.2002	6.1	440	01.01.2002	27.5
31	08.05.2002	5.5	150	22.04.2002	15.4

величина M , тем раньше появляется предвестник для одинаковых R , т.е. время упреждения предвестником момента землетрясения ΔT больше (№№ 5 и 6 табл. 1). С увеличением R для одинаковых M заблаговременность появления предвестника уменьшается (№№ 2 и 4; 9 и 10). Такое поведение характерно для среднесрочных и долгосрочных предвестников землетрясений и свидетельствует о распространении возмущения от эпицентра к границам зоны подготовки землетрясения [Гуфельд и Гусев, 1998].

В равноденственные месяцы и зимой спорадический слой E на широте Петропавловска-Камчатского появляется редко, поэтому достоверной информации о предвестниковых явлениях в E_s в эти периоды получить не удастся. Для этих месяцев реальные предвестники землетрясений в E_z выделялись из числа всех отмеченных аномалий в соответствии с изложенной выше тенденцией изменения времени появления предвестника в зависимости от магнитуды и эпицентрального расстояния. Таким образом были выделены 11 воз-



Эмпирические зависимости времен упреждения моментов землетрясений (ΔT) от магнитуд (M) и эпицентральных расстояний (R) до пункта наблюдения для аномалий в E_s (ромбы, линия регрессии – сплошная) и E_z (точки, линия регрессии – штриховая), а также по данным различных наземных измерений, обобщенных в работе [Сидорин, 1992] (штрихпунктир). Соответствующие стандартные отклонения линий регрессии показаны пунктиром. Горизонтальными стрелками отмечены предвестники одних и тех же землетрясений при одновременных измерениях параметров E_s и E_z .

можных предвестников в E_z , за которыми через несколько суток–недель последовали землетрясения с $M \geq 5.0$ (№№ 14–16, 18–20, 23, 25–27, 30 табл. 1).

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рисунке представлены изменения времени упреждения моментов землетрясений всеми выделенными реальными предвестниками в E_s (ромбы) и в E_z (точки) в зависимости от магнитуды последовавших землетрясений. Горизонтальными стрелками отмечены предвестники одних и тех же землетрясений при одновременных измерениях параметров E_s и E_z . Для двух групп предвестников в E_s и E_z на рисунке приведены прямые линейной регрессии (E_s – сплошная линия, E_z – штриховая линия), полученные методом наименьших квадратов

$$\lg(\Delta T \times R)_{E_s} = 0.85M - 1.23, \quad (1)$$

$$\lg(\Delta T \times R)_{E_z} = 0.9M - 1.5 \quad (2)$$

с соответствующими стандартными отклонениями регрессии (пунктир). Коэффициенты корреляции для 5%-го уровня значимости по критерию

Стьюдента для отобранных случаев составляют: $\rho_{E_s} = 0.98$ с доверительным интервалом (0.96; 0.99) и $\rho_{E_z} = 0.97$ с доверительным интервалом (0.96; 0.99). На рисунке показана также зависимость времени упреждения долгосрочным предвестником момента землетрясения от магнитуды (штрихпунктир), полученная в работе [Сидорин, 1992] для различных наземных измерений, проведенных в этом же сейсмоактивном регионе, но в другие годы (геодезические измерения, электротеллурические поля, уровень подземных вод, наклоны земной поверхности)

$$\lg(\Delta T \times R)_{\text{Сидорин}} = 0.82M - 1.26. \quad (3)$$

Все характеристики представленных зависимостей $\lg(\Delta T \times R) = aM - b$ приведены в табл. 2.

Видно, что несмотря на ограниченное число отобранных случаев вычисленные коэффициенты корреляции свидетельствуют о достаточно высокой степени достоверности полученных зависимостей между временем упреждения предвестником момента землетрясения и магнитудой землетрясения для конкретных эпицентральных расстояний.

Таблица 2. Характеристики линейной регрессии для различных предвестников землетрясений

Параметры линий регрессии	a	b	S_a	S_b	S	ρ	n
Ez	0.90	1.5	0.05	0.3	0.08	0.98	18
Es	0.85	1.23	0.05	0.26	0.06	0.98	13
[Сидорин, 1992]	0.82	1.26	0.05	0.32	0.42	0.93	43

Примечание: S_a, S_b – стандартные отклонения коэффициентов линий регрессии a и b ; S – стандартная ошибка регрессии, ρ – коэффициент корреляции между значениями M и $\lg(\Delta T \times R)$; n – количество рассмотренных случаев.

Из рисунка следует, что зависимости для предвестников землетрясений в электрических полях и ионосфере практически совпадают. Некоторое различие в коэффициентах формул (1) и (2) по-видимому связано с тем, что были использованы данные для различных землетрясений, а не только с разным числом рассмотренных землетрясений для Es и для Ez . Линия регрессии, построенная по данным наземных измерений (см. выше, [Сидорин, 1992]), проходит ниже этих зависимостей. Это может означать, что предвестники в приземной атмосфере и верхней атмосфере (ионосфере) для одинаковых M и R появляются раньше, чем на земле.

Числовые коэффициенты в приведенных выше формулах, особенно в (1) и (3), близки между собой, что свидетельствует об увеличении степени надежности идентификации ионосферных предвестников землетрясений по приведенной выше методике. При этом зависимость (3) получена в работе [Сидорин, 1992] именно для долгосрочных предвестников землетрясений, что позволяет отнести предвестники землетрясений, выделенные нами в Ez и Es , к группе долгосрочных предвестников землетрясений в приземной и верхней атмосфере Земли соответственно. Более того, выражения (1–3) имеют вполне определенный физический смысл. Во-первых, они свидетельствуют о направлении распространения сейсмогенного возмущения. Действительно, каждой точке на прямой регрессии соответствуют координаты $\{M, \lg(\Delta T \times R)\}$. Для конкретного значения магнитуды величина $\lg(\Delta T \times R) = \text{const}$, если пренебречь ошибкой в определении данной координаты M ($S = 0.06–0.08$), что следует и из рисунка.

Это означает, что для двух различных эпицентральных расстояний выполняется соотношение $\lg(\Delta T_1 \times R_1) = \lg(\Delta T_2 \times R_2)$. Тогда $\Delta T_1 \times R_1 = \Delta T_2 \times R_2$, и $\Delta T_1/\Delta T_2 = R_2/R_1$. При $R_2 > R_1$ предвестник появится раньше на станции, расположенной ближе к эпицентру готовящегося землетрясения (ΔT_1), и во столько раз раньше, во сколько раз удаленность второго пункта (R_2) превышает удаленность первого (R_1). Этот факт свидетельствует о распространении сейсмического возмущения

от эпицентра к границам зоны подготовки землетрясения.

Во-вторых, зависимости (1–3) для долгосрочных предвестников позволяют определить время упреждения момента землетрясения на границе зоны подготовки, радиус которой определяется формулой Добровольского [Добровольский и др., 1980]: $\lg(r) = 0.43 M$, км. В этом случае $R = r$; $\lg(\Delta T \times r) = aM + b$ и

$$\lg(\Delta T) = (a - 0.43)M + b. \quad (4)$$

Если предвестники в атмосфере отслеживают границу зоны подготовки землетрясения, то на основе выражений (1–3), с учетом стандартных отклонений в коэффициентах a и b (табл. 2) можно определить время упреждения момента землетрясения (ΔT) для разных предвестников. Расчеты показывают, что для $M = 5.0$ и $r = 150$ км время упреждения ΔT на границе зоны подготовки землетрясения для предвестников в Es составляет, с учетом приведенных погрешностей, 7.25–7.6 сут, для предвестников в Ez оно будет равно 6.9–7.25 сут, а для предвестников на земле это время составит 4–5.5 сут. Для $M = 6.0$ и $r = 380$ км получаются следующие времена упреждения: $\Delta T_{Es} = 18–21$ сут; $\Delta T_{Ez} = 19–23$ сут; $\Delta T_{\text{Сидорин}} = 11.5–12.5$ сут. Это означает, что

– в Es и Ez предвестники для одних и тех же землетрясений появляются практически одновременно для $M \leq 6$;

– на границе зоны подготовки землетрясения предвестники появляются тем раньше, чем выше магнитуда готовящегося землетрясения;

– в приземной и верхней атмосфере (ионосфере) Земли время упреждения предвестником момента землетрясения больше, чем на земле, независимо от M .

Вышеприведенные расчеты сделаны в предположении, что границы зон подготовки для наземных и атмосферных предвестников совпадают и определяются формулой Добровольского [Добровольский и др., 1980]. Однако в литературе есть указания на то, что предвестники в ионосфере отмечаются на расстояниях, превышающих зону подготовки землетрясения по Добровольскому на ~100–150 км даже для $M = 4$ [Силина и др., 2010]. С другой стороны, и на земле предвестники раз-

личной физической природы появляются в разное время [Сидорин, 1992]. В работе [Копылова и Серафимова, 2010] этот факт объясняется различным масштабным уровнем напряженно-деформированного состояния верхнего слоя земной коры. Так, по измерениям деформационных характеристик земной коры, протяженность зоны подготовки, определенная для 43-х предвестников землетрясений, описывается следующей зависимостью: $\lg(L_r) = 0.48M$ [Сидорин, 1992]. Для $M = 5.0$ величина $L_r = 250$ км, что на 100 км превышает оценки по формуле Добровольского, но совпадает с зоной проявления ионосферных предвестников, полученной в статье [Силина и др., 2010].

Пользуясь логарифмической зависимостью (3) можно рассчитать скорость (V) распространения сейсмического возмущения в поверхностном слое земли от некоторого пункта с эпицентральной дистанцией R до границы зоны подготовки землетрясения r по следующей простой формуле: $V = (r - R)/(\Delta T_R - \Delta T_r)$. Для этих двух рассматриваемых расстояний имеем: $\lg(\Delta T_R \times R) = \lg(\Delta T_r \times r) = 0.82M - 1.26 = \lg(C)$. Тогда $\Delta T_R = C/R$, а $\Delta T_r = C/r$. Для $M = 6.0$ радиус зоны подготовки $r = 380$ км, и при распространении сейсмического возмущения от точки наблюдения с $R = 100$ км к границе зоны подготовки землетрясения получим $V_{M=6.0} \approx 0.35$ км/ч. Таким образом, полученные логарифмические зависимости характеризуют среднюю скорость расширения зоны подготовки землетрясения в зависимости от его энергии (магнитуды).

4. ВЫВОДЫ

Проведенное исследование эффектов в ионосфере и приземном атмосферном квазистатическом электрическом поле, предшествующих сильным землетрясениям ($5.0 \leq M \leq 6.2$), по измерениям на Камчатке позволяет сделать следующие выводы.

1. Реальные предвестники землетрясений наблюдаются практически одновременно в спорадическом слое E и вертикальной компоненте приземного электрического поля при измерениях в одном и том же пункте.

2. Логарифмические зависимости, связывающие магнитуду землетрясения, время упреждения предвестником момента землетрясения и расстояние от пункта наблюдения до эпицентра для ионосферы и приземного квазистатического электрического поля соответствуют аналогичным зависимостям для долгосрочных предвестников землетрясений, полученных по данным измерений для различных наземных геофизических параметров в этой же сейсмоактивной зоне.

3. Атмосферные предвестники землетрясений в Камчатской сейсмоактивной зоне являются самым ранним долгосрочным предупреждением о возможной сейсмической опасности.

Авторы выражают благодарность NOAA's National Geophysical Data Center (NGDC) USA и World Data Center for Geomagnetism, Kyoto, Japan за предоставленную возможность использовать имеющиеся у них банки ионосферных и магнитных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бахмутов В.Г., Седова Ф.И., Мозговая Т.А. Геомагнитная возмущенность и землетрясения в зоне Вранча // Физика Земли. № 11. С. 30–36. 2007.
- Гуфельд И.Л., Гусев Г.А. Современное состояние работ по прогнозу землетрясений (Есть ли выход из тупика?) / Краткосрочный прогноз катастрофических землетрясений с помощью радиофизических наземно-космических методов. Ред. Страхов В.Н., Липеровский В.А. М.: ОИФЗ РАН. С. 7–25. 1998.
- Добровольский И.А., Зубков С.И., Мячкин В.И. Об оценке размеров зоны проявления предвестников землетрясения / Моделирование предвестников землетрясений. М.: Наука, С. 7–14. 1980.
- Зубков С.И., Мигунов Н.И. О времени возникновения электромагнитных предвестников землетрясений // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 15. № 6. С. 1070–1074. 1975.
- Зубков С.И. О зависимости времени возникновения и радиуса зоны проявления электротеллурического предвестника от энергии землетрясения // Физика Земли. № 4. С. 101–105. 1983.
- Зубков С.И. Времена возникновения предвестников землетрясений // Изв. АН СССР. Физика Земли. № 5. С. 87–91. 1987.
- Исмагилов 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 аэрномия Т. 46. № 3. С. 423–430. 2006.
- Копылова Г.Н., Серафимова Ю.К. Среднесрочные предвестники сильных землетрясений Камчатки как проявление взаимодействия геофизических полей / Сб. докл. V междунар. конф. “Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений”. П. Паратунка, Камчат. край, 2–7 авг. 2010 г. Ред. Б.М. Шевцов, В.В. Богданов. Петропавловск-Камчатский: изд-во ИКИР ДВО РАН. С. 372–376. 2010.
- Корсунова Л.П., Хегай В.В. Сейсмо-ионосферные эффекты сильных коровых землетрясений в Тихоокеанском регионе // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 45. № 5. С. 706–711. 2005.
- Корсунова Л.П., Хегай В.В. Анализ сейсмоионосферных возмущений на цепочке Японских станций вертикального зондирования ионосферы // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 48. № 3. С. 407–415. 2008.

- Корсунова Л.П., Хегай В.В. Изменения в атмосферных приземных электростатических полях в период подготовки коровых землетрясений в Японии и континентальном Китае / Сб. докл. V междунар. конф. “Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений”. П. Паратунка, Камчат. край, 2–7 авг. 2010 г. Ред. Б.М. Шевцов, В.В. Богданов. Петропавловск-Камчатский: изд-во ИКИР ДВО РАН. С. 383–386. 2010.
- Корсунова Л.П., Чистякова Л.В., Хегай В.В. Эффекты в спорадическом слое *E* в период подготовки землетрясения 27.08.2008 по наблюдениям в Иркутске // Солнечно-земная физика. Новосибирск: изд-во СО РАН. Т. 129. Вып. 16. С. 149–153. 2010.
- Липеровский В.А., Похотелов О.А., Шалимов С.Л. Ионосферные предвестники землетрясений. М.: Наука, 304 с. 1992.
- Сидорин А.Я. Зависимость времени появления предвестников землетрясений от эпицентрального расстояния // Докл. АН СССР. Т. 245. № 4. С. 825–828. 1979.
- Сидорин А.Я. Предвестники землетрясений. М.: Наука, 192 с. 1992.
- Силина А.С., Липеровская Е.В., Васильева Н.Э., Алимов О.А. Влияние процессов подготовки землетрясений на вариации параметров спорадического слоя *E* ионосферы / Сб. докл. V междунар. конф. “Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений”. П. Паратунка, Камчат. край, 2–7 авг. 2010 г. Ред. Б.М. Шевцов, В.В. Богданов. Петропавловск-Камчатский: изд-во ИКИР ДВО РАН. С. 440–444. 2010.
- Смирнов С.Э. Особенности отрицательных аномалий квазистатического электрического поля в приземной атмосфере на Камчатке // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 45. № 2. С. 282–287. 2005.
- Чавдаров С.С., Часовитин Ю.К., Чернышева С.Н., Шефтель В.Н. Среднеширотный спорадический слой *E* ионосферы. М.: Наука, 120 с. 1975.
- Hao J., Tang T., Li D. Progress in the research on atmospheric electric field anomaly as an index for short-term prediction of earthquakes // J. Earthquake Prediction Res. V. 8. № 3. P. 241–255. 2000.
- Hobara Y., Parrot M. Ionospheric perturbations linked to a very powerful seismic event // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 67. № 7. P. 677–685. 2005.
- Korsunova L.P., Khegai V.V. Medium-term ionospheric precursors to strong earthquakes // Int. J. Geomagn. Aeron. V. 6. G13005. doi:10.1029/2005G1000122. 2006.
- Korsunova L.P., Mikhailov Yu.M., Khegai V.V., Leshchenko L.N., Smirnov S.E., Bogdanov V.V. Experimental evidence of the correlation between possible precursors of earthquakes in near surface quasistatic electric fields and in the ionosphere // Geomagnetism and Aeronomy. V. 50. № 7. (Special Issue 1). P. 920–926. 2010.
- Liu J.Y., Chen Y.I., Chuo Y.J., Chen C.S. A statistical investigation of preearthquake ionospheric anomaly // J. Geophys. Res. V. 111. A05304. doi:10.1029/2005JA011333. 2006.
- Mikhailov Yu.M. On the properties of earthquake precursors in the electrostatic field of the surface atmosphere // Phys. Solid Earth. V. 43. № 4. P. 336–339. 2007.
- Ondoh T. Anomalous sporadic-E layers observed before M 7.2 Hyogo-ken Nanbu earthquake; Terrestrial gas emanation model // Adv. Polar Upper Atmos. Res. № 17. P. 96–108. 2003.
- Oyama K.-I., Kakinami Y., Liu J.Y., Abdu M.A., Cheng C.Z. Latitudinal distribution of anomalous ion density as a precursor of a large earthquake // J. Geophys. Res. V. 116. A04319, doi:10.1029/2010JA015948. 2011.
- Perrone L., Korsunova L.P., Mikhailov A.V. Ionospheric precursors for crustal earthquakes in Italy // Ann. Geophysicae. V. 28. № 4. P. 941–950. 2010.
- Pulinetz S.A., Boyarchuk K.A. Ionospheric Precursors of Earthquakes // Berlin: Springer. 315 p. 2004.
- Xia C., Yang S., Xu G., Zhao B., Yu T. Ionospheric anomalies observed by GPS TEC prior to the Qinghai-Tibet region earthquakes // Terr. Atmos. Ocean. Sci. V. 22. № 2. P. 177–185. doi: 10.3319/TAO.2010.08.13.01(TibXS). 2011.