ГЕОМАГНЕТИЗМ И АЭРОНОМИЯ, 2024, том 64, № 2, с. 303–311

УДК 523.31-853, 551.510.535

ВЫЯВЛЕНИЕ ВОЗМОЖНЫХ КРАТКОСРОЧНЫХ ИОНОСФЕРНЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ДЛЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ С ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ГЛУБИНОЙ ГИПОЦЕНТРА ОЧАГА ПО ИЗМЕРЕНИЯМ СТАНДАРТНЫХ ПАРАМЕТРОВ СРЕДНЕШИРОТНОГО СЛОЯ *Es*

© 2024 г. Л. П. Корсунова[1, *], В. В. Хегай[1, **]

[1]*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Москва, Троицк, Россия*

**e-mail: lpkors@rambler.ru*

***e-mail: hegai@izmiran.ru*

Поступила в редакцию 21.07.2023 г.
После доработки 25.09.2023 г.
Принята к публикации 23.11.2023 г.

Исследованы изменения отклонений от фоновых значений параметров спорадического слоя *E* ионосферы (*Es*): действующей (виртуальной) высоты *h'Es* и предельной частоты отражения (*foEs*). В основном, анализ проводился на основе данных ежечасных измерений нескольких японских наземных станций вертикального зондирования ионосферы с целью выявления возможных краткосрочных ионосферных предвестников землетрясений с промежуточной (от 60 до 300 км) глубиной гипоцентра очага землетрясения. Рассмотрены все известные события (12 землетрясений, с 1969 по 2022 гг.), для которых имеются нужные ионосферные данные в регионе Японии и магнитуды (*M*) которых лежат в диапазоне от 6.5 до 7.6. По совпадению максимумов в изменениях рассматриваемых характеристик *Es* в одни и те же сутки на парах станций, разнесенных на сотни километров друг от друга фиксировалось время появления возможных ионосферных предвестников землетрясений. По ионосферным данным, имеющимся в период подготовки рассматриваемых землетрясений, выявлена тенденция, согласно которой время упреждения ими момента главного удара зависит от магнитуды готовящегося землетрясения. Выявлены сходства и отличия в откликах ионосферы на подготовку поверхностных (коровых) землетрясений и землетрясений с промежуточной глубиной гипоцентра очага. Обнаружена также и другая тенденция – к более раннему появлению выделенных предвестников землетрясений с ростом глубины гипоцентра очага для землетрясений с промежуточной глубиной гипоцентра очага при одинаковых расстояниях от эпицентра до точки наблюдения.

DOI: 10.31857/S0016794024020139, **EDN:** DYFVKO

1. ВВЕДЕНИЕ

До настоящего времени еще не разработана система краткосрочного прогноза землетрясений, поэтому изучение эффектов подготовки землетрясений в различных областях ионосферы (в эпигнозе) по-прежнему актуально. Известно, что отклик ионосферы на изменения сейсмической активности зависит от процессов, происходящих в очаге назревающего землетрясения. Эти процессы, в частности, обусловлены глубиной гипоцентра очага готовящегося землетрясения (h_G), с чем связана классификация землетрясений по их глубине: ***поверхностных***, ***промежуточных*** (т.е. землетрясений с промежуточной глубиной гипоцентра очага — ПГГО) и ***глубокофокусных***. ЭПИЦЕНТРАЛЬНАЯ зона землетрясения обычно определяется как проекция очаговой зоны землетрясения на поверхность Земли, в которой наиболее сильно проявляются макросейсмические эффекты землетрясения, тогда размер области ПОДГОТОВКИ землетрясения на поверхности Земли, по крайней мере, не меньше. К тому же оказывается (см. монографию [Апродов, 2000]), что чем глубже расположен очаг землетрясения, тем большую территорию на поверхности Земли охватывают сейсмические проявления при равной энергии землетрясения. Таким образом, сейсмические проявления на поверхности Земли для

промежуточных землетрясений (глубины гипоцентров от 60 до 300 км) регистрируются на бОльших площадях, чем для поверхностных землетрясений (глубины гипоцентров до 60 км) той же магнитуды.

Ионосферные эффекты, связанные с подготовкой поверхностных (коровых) землетрясений, достаточно хорошо изучены (см. работы [Pulinets and Boyarchuk, 2004; Liu et al., 2006; Sharma et al., 2006; Sarkar et al., 2007; Dabas et al., 2007; Корсунова и Хегай, 2018; Perrone et al., 2010; Xia et al., 2011; Perevalova et al., 2014; Пулинец и др., 2014; Pulinets and Ouzounov, 2018; Hegai et al., 2023]), тогда как о влиянии на ионосферу промежуточных землетрясений известно немного. Тем не менее, уже в пионерской работе [Nestorov, 1979] были идентифицированы сейсмоионосферные возмущения в ионосфере, краткосрочные ионосферные предвестники землетрясений (КИПЗ) 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 очага землетрясения была равна 120 км, т. е. это землетрясение относилось именно к классу промежуточных землетрясений. В работе [Бычков и др., 2017] были зафиксированы значительные изменения ионосферных параметров как в области *F*, так и в спорадическом слое *Es*, за сутки до землетрясения с $M = 7.2$, эпицентр которого находился в $\cong 117$ км от пункта наблюдения. Глубина очага этого землетрясения составила $h_G \cong 161$ км, то есть оно также относилось к классу промежуточных землетрясений.

Далее, время появления предвестников землетрясений в квазистатическом электрическом поле приземной атмосферы перед толчком (а значит, и связанных с ними возможных аномалий в ионосфере — ионосферных предвестников землетрясений) для разных глубин гипоцентров очагов землетрясений было рассмотрено в работе [Михайлов, 2007].

Этих сведений недостаточно, чтобы составить адекватное представление о влиянии промежуточных землетрясений на ионосферу. Однако такое представление необходимо получить для распознавания их возможных эффектов в ионосфере при подготовке землетрясений в реальных условиях. Важно знать, чем могут отличаться ионосферные эффекты перед коровыми землетрясениями, которые более разрушительны, от ионосферных эффектов промежуточных землетрясений при одинаковых магнитудах. Такие отличия, если они существуют, помогут избежать ложных тревог при значительных изменениях сейсмической активности. Более полные сведения о влиянии промежуточных землетрясений на ионосферу можно получить из анализа данных многолетних ионосферных наблюдений на сети наземных станций вертикального зондирования ионосферы (НСВЗИ) в сейсмоактивных регионах (*далее всюду, где это возможно, для краткости, вместо сокращения* НСВЗИ *используются термины* станция(и) *или сокращение* ст.). Особенно полезными, с этой точки зрения, оказываются наблюдения за среднеширотным спорадическим слоем *Es*. Этот слой менее чувствителен к воздействию на ионосферу геомагнитных возмущений [Чавдаров и др., 1975] с одной стороны, но, с другой стороны, является достаточно надежным индикатором проявлений ионосферных эффектов при значительных изменениях сейсмической активности [Корсунова и Хегай, 2018; 2023; Корсунова и Легенька, 2021].

Целью нашего исследования является изучение возможных эффектов в *Es* в периоды подготовки сильных промежуточных землетрясений с магнитудами $M = 6.5$—7.6 на основании данных измерений НСВЗИ в Тихоокеанском регионе (Япония, Камчатка), где высока сейсмическая активность и ведутся многолетние ионосферные наблюдения.

В исследовании использованы ионосферные данные ст. Paratunka (географические координаты $\varphi = 52.97^\circ$ N, $\lambda = 158.25^\circ$ E), Wakkanai ($\varphi = 45.16^\circ$ N, $\lambda = 141.75^\circ$ E), Akita ($\varphi = 39.725^\circ$ N, $\lambda = 140.053^\circ$ E) и Kokubunji ($\varphi = 35.71^\circ$ N, $\lambda = 139.49^\circ$ E).

2. МЕТОД АНАЛИЗА ДАННЫХ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Для обнаружения возможного влияния на ионосферу подготовки сильных промежуточных землетрясений с магнитудами $M = 6.5$—7.6 необходимо исследовать изменения выбранных для этого параметров ионосферы непосредственно перед землетрясениями или за несколько суток до них. Учитывая что, как уже указано выше, среднеширотный спорадический слой *Es* ионосферы менее чувствителен к влиянию геомагнитных возмущений, чем лежащие выше ионосферные слои (см. работы [Чавдаров и др., 1975; Корсунова и Хегай, 2023]), мы остановились на выборе двух его стандартных параметров: виртуальной высоты слоя *h'Es* и предельной частоты отражения *foEs*. Для выделения возможных КИПЗ использовался основной критерий, уже применявшийся при анализе эффектов подготовки коровых (поверхностных) землетрясений. Согласно этому критерию, максимум в отклонениях ионосферных параметров от фоновых значений должен наблюдаться в одни и те же сутки на двух станциях, разнесенных на несколько сотен километров друг от друга, но находящихся в пределах зоны подготовки конкретного землетрясения (подробно см. работу [Корсунова и Легенька, 2021]). При этом, на более удаленной от эпицентра станции этот максимум должен совпадать с максимумом на более близкой к эпицентру землетрясения станции ***или быть ближе к моменту толчка не более, чем на 4 часа.*** Это удовлетворяет требованию о том, что

КИПЗ должны проявляться практически синхронно во всей зоне подготовки землетрясения. Радиус этой зоны для поверхностных землетрясений соответствует теоретической оценке Добровольского (см. работу [Dobrovolsky et al., 1979]) согласно которой $\rho_D = 10^{0.43M}$ (км). Однако, для землетрясений в Тихоокеанском регионе (см. монографию [Сидорин, 1992]) на основе экспериментальных данных был определен другой, существенно больший радиус зоны подготовки землетрясения, согласно которому $\rho_S = 10^{0.48M}$ (км). Рассматриваемые в нашем исследовании землетрясения принадлежат к классу промежуточных землетрясений, когда 60 км $\leqslant h_G \leqslant$ 300 км, где h_G — глубина гипоцентра очага (см. монографию [Апродов, 2000]), и радиус зоны их подготовки должен быть больше, чем ρ_D (см. введение). Поэтому используемый в нашей работе радиус зоны подготовки промежуточного землетрясения на поверхности Земли $\rho_{DS} = 10^{[(0.43+0.48)/2]\times M} = 10^{0.455\times M}$ км был определен как медианное значение между этими двумя оценками (ρ_D и ρ_S). Именно он и считается верхней границей зоны подготовки землетрясения в описанной ниже методике выделения возможных КИПЗ для сильных промежуточных землетрясений, магнитуды которых лежат в диапазоне 6.5 $\leqslant M \leqslant$ 7.6.

Методика выделения КИПЗ состояла в следующем: в пределах зоны, определяемой радиусом ρ_{DS}, выбирались две станции с наиболее близкими эпицентральными расстояниями для того или иного землетрясения. Далее выполнялась следующая процедура анализа данных одновременных измерений параметров *Es* на этих станциях.

1. Интервал наблюдения для каждого случая составляет 4 сут (от -3 дня до нулевого, т.е. дня землетрясения).

2. Время упреждения момента подземного толчка его возможным ионосферным предвестником (ΔT) определяется по поведению параметра *h′Es* (обозначение $\Delta T_{h'Es}$). Для этого вычисляется соответствующая разность $\Delta h'Es = h'Es_{cur} - h'Es_{med}$ (между текущим значением *h′Es* и его месячной медианой) на выбранных парах станций, входящих в зону подготовки землетрясения ($R_e < \rho_{DS}$). В качестве возможного КИПЗ рассматриваются наибольшие локальные максимумы $h'Es \geqslant h'Es_{med}$ (при этом $\Delta h'Es \geqslant 0$), ближайшие к моменту толчка, и появляющиеся почти одновременно (в пределах 4-х часов) на двух станциях, разнесенных между собой на расстояние не менее чем на несколько сотен километров.

Определение нужных локальных максимумов *h′Es* проводилось так: на графике временных изменений $\Delta h'Es$ для станции, более близкой к эпицентру, начинается обратный отсчет от момента землетрясения до обнаружения наибольшего ближайшего неотрицательного экстремума. Этот момент считается моментом появления вероятного КИПЗ на этой станции. С этого момента начинается прямой отсчет для второй, более далекой от эпицентра

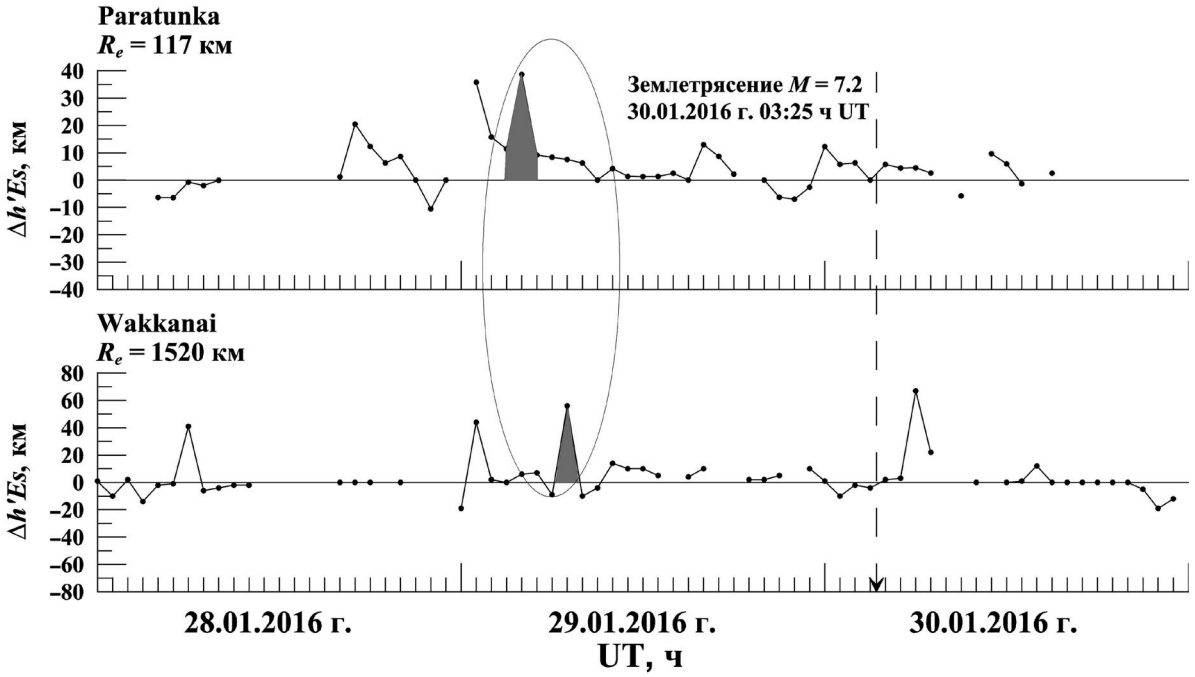

Рис. 1. Часовые вариации $\Delta h'Es$ (сплошные линии с точками) на ст. Paratunka (верхняя панель) и ст. Wakkanai (нижняя панель) перед землетрясением 30.01.2016 г. с промежуточной глубиной очага h_G = 161 км и магнитудой M = 7.2. Разрывы линий означают отсутствие данных. Вероятные КИПЗ отмечены темной заливкой и выделены эллипсом. Эпицентральные расстояния (R_e) до соответствующей ионосферной станции указаны на рисунке под названиями станций.

станции. Ближайший, следующий за этим моментом, наибольший неотрицательный экстремум $\Delta h'Es$ отмечает появление КИПЗ на этой второй станции. Если такового в пределах 4 часов не обнаруживается, то считается, что КИПЗ не наблюдается на **обеих** станциях. Этот способ выделения возможных КИПЗ, в качестве примера, иллюстрирует рис. 1.

Видно, что для ближайшей к эпицентру землетрясения ст. Paratunka первый максимум при "сканировании" по времени назад от момента толчка (0 UT 30.01.2016), второй, чуть БОЛЬШЕ (16 UT 29.01.2016), следующий, ПРЕВЫШАЮЩИЙ его (04 UT 29.01.2016) выбран как "КАНДИДАТ" в предвестники землетрясения, т.к. следующий за ним, уже МЕНЬШЕ его. Т.к. обнаружен максимум в 07 UT на ДРУГОЙ, более удаленной от эпицентра землетрясения (в пределах 4 часов от обнаруженного на более близкой к эпицентру ст. Paratunka) ст. Wakkanai (выделен темной заливкой), то считается, что КИПЗ наблюдаются на обеих станциях.

3. Для ближайшей к эпицентру землетрясения станции фиксируется наибольшее по абсолютной величине отклонение $\Delta foEs = foEs_{\text{cur}} - foEs_{\text{med}}$ от месячной медианы, совпадающее или следующее за временем появления возможного КИПЗ на этой же станции в течение ближайших 4-х часов. Т. е. выбраны максимальные по абсолютной величине значения $\Delta foEs$ в диапазоне [0, 4] ч от выбранного как КИПЗ "всплеска" $\Delta h'Es$. Аналогичный анализ проводится и для более удаленной станции. Полученные значения отклонений характеризуют эффекты в *Es*, возможно связанные с подготовкой конкретного землетрясения.

4. По выбранным КИПЗ для ст., имеющих наибольшее количество выделенных возможных КИПЗ, строятся линейные регрессии — зависимости логарифмов величин $\Delta T_{h'Es}$ (сут) и логарифмов произведений $\Delta T_{h'Es} \cdot R$ (R — эпицентральное расстояние до станции в км) от магнитуд (M) рассмотренных промежуточных землетрясений. Если соответствующие, достаточно высокие коэффициенты корреляции ($\rho(\Delta T_{h'Es} \cdot R, M) \geqslant 0.7$) увеличиваются для $\rho(\Delta T_{h'Es}, M)$, то КИПЗ считаются определенными верно.

Из 17 случаев (с 1969 по 2022 гг.), соответствующих сильным промежуточным землетрясениям в регионе Японии (с магнитудами M в диапазоне $6.5 \leqslant M \leqslant 7.6$), после фильтрации, обусловленной фактическим наличием нужных ионосферных данных, осталось 12 событий, пригодных для обработки по указанной выше методике. Характеристики рассмотренных землетрясений, соответствующих им предшествующих изменений в параметрах среднеширотного слоя *Es* (вероятные КИПЗ) а также геомагнитная обстановка (*Kp*-индексы) приведены в табл. 1.

В табл. 1 также приведены значения трех типов радиусов для зон подготовки соответствующих землетрясений. Видно, что в 6 из 12 случаев эпицентральные расстояния для вторых станций превышают ρ_D, т. е. не попадают в зону подготовки,

Таблица 1. Характеристики промежуточных землетрясений, *Kp*-индексы и соответствующие им значения параметров среднеширотного слоя *Es* на выбранных парах ионосферных станций, характеризующие возможные КИПЗ

N	Время землетрясения, UT	Географические координаты эпицентров землетрясений	M	h_G, км	ρ_D, км	ρ_S, км	ρ_{DS}, км	НСВЗИ	R_e, км	$\Delta T_{h'Es}$, ч	$\Delta h'Es$, км	$\Delta foEs$, МГц	Тип *Es*, Время LT, ч	*Kp*
1	02.12.2001 13:02 UT	39.4° N 141.1° E	6.5	124	620	1320	910	Kokubunji Wakkanai	440 650	6 5	6 17	1.2 0.9	F2, 16 F1, 17	1_0
2	09.01.1987 06:14 UT	39.9° N 141.7° E	6.6	68	690	1470	1010	Akita Kokubunji	140 310	12 11	5 5	0.5 0.5	F1, 03 F2, 02	2_0
3	06.12.1978 14:02 UT	45.0° N 146.6° E	6.7	90	760	1640	1120	Wakkanai Akita	430 790	20 19	8 5	0.5 0.3	F1, 03 F1, 04	1_-
4	17.12.1987 02:08 UT	35.4° N 140.2° E	6.7	63	760	1640	1120	Kokubunji Akita	70 480	19 19	65 40	2.1 0.5	L2, 14 C1, 14	5_+
5	14.01.1987 11:04 UT	42.6° N 142.8° E	6.8	102	840	1840	1240	Wakkanai Akita	350 450	20 20	0 5	0.4 0.1	F1, 00 F2, 00	1_+
6	23.07.2008 15:26 UT	39.8° N 141.5° E	6.8	108	840	1840	1240	Kokubunji Wakkanai	490 600	24 24	4 12	3.2 1.7	F4, 00 F6, 00	3_0
7	19.01.1969 07:02 UT	45.2° N 143.2° E	7.0	245	1020	2290	1530	Akita Kokubunji	660 1100	25 23	10 5	0.8 -0.1	H1, 15 L1, 17	3_+
8	26.05.2013 09:24 UT	38.8° N 141.6° E	7.0	68	1020	2290	1530	Kokubunji Wakkanai	390 710	25 25	10 12	-0.8 0.3	L2, 17 C2, 17	3_0
9	13.02.2020 10:34 UT	45.6° N 149.0° E	7.0	143	1020	2290	1530	Wakkanai Kokubunji	560 1360	26 23	5 10	1.9 0.9	L4, 17 F3, 20	2_0
10	19.04.2013 03:06 UT	46.2° N 150.8° E	7.2	110	1250	2860	1890	Wakkanai Kokubunji	710 1500	31 27	12 8	0.8 2.0	L2, 05 L2, 09	0_+
11	30.01.2016 03:25 UT	54.0° N 158.0° E	7.2	161	1250	2860	1890	Paratunka Wakkanai	120 1520	23 20	39 56	3.6 1.0	H1, 15 H1, 16	1_-
12	15.01.1993 11:06 UT	43.3° N 144.6° E	7.6	102	1850	4450	2870	Wakkanai Kokubunji	310 950	62 58	4 13	1.4 0	C1, 07 H1, 11	2_0

определяемой этим радиусом. Так как эффекты на этих станциях были обнаружены, то это значит, что реальная зона подготовки больше. При этом все станции находятся в зоне подготовки, определяемой радиусом ρ_{DS}, что подтверждает факт ее расширения для промежуточных землетрясений. Далее, в табл. представлены индексы *Kp* для времени появления КИПЗ на 2-х станциях. Для 11 из 12 рассмотренных землетрясений в часы появления КИПЗ на 2-х станциях не наблюдалось сильных геомагнитных возмущений и только в одном случае отмечена магнитная буря. В работе [Корсунова и Хегай, 2023] было показано на примере этих же ионосферных станций (но для коровых землетрясений!), что даже в таких условиях использованная в ней методика позволяет выделять КИПЗ.

Вообще говоря, надо учитывать, что виртуальная (действующая) высота слоя E_s зависит от профиля электронной концентрации. Однако, в отсутствие знания реальных профилей электронной концентрации можно считать, что медианные значения *h′Es* в конкретные часы суток соответствуют некоторому среднему профилю электронной концентрации в этих условиях. Отклонения от этих фоновых значений свидетельствуют об изменениях в условиях образования *Es* под влиянием тех или иных факторов в конкретный момент времени. Следует также иметь в виду, что величина $\Delta foE_s = foEs_{\text{cur}} - foEs_{\text{med}}$ определяется состоянием ионосферы, условиями и механизмом образования слоя E_s, а не только гипотетическим влиянием землетрясения. Тем не менее, для среднеширотных типов *Es* в спокойных геомагнитных условиях при отсутствии внешних факторов наиболее важной причиной изменений условий образования *Es* является изменение структуры ветра, которое может происходить под воздействием АГВ, имеющих различную природу, в том числе и связанную с подготовкой землетрясения. Поэтому изменения *foEs* являются следствием воздействия ряда факторов и величина Δ*foEs* не определяется каким-либо одним из них. Мы не обнаружили связи этого параметра с магнитудами землетрясений и полагаем, что рассмотренные промежуточные землетрясения на фазе подготовки не вносят существенного вклада в изменения Δ*foEs*. Более того, существенной закономерности вариаций Δ*h′Es* в зависимости от величины h_G на исследованном материале также выявить не удалось. Коэффициент линейной корреляции $\rho(\Delta h'Es, h_G)$ оказался равным 0.1.

Из табл. 1 также следует, что в 17 случаях наблюдались слои типов F, L и только в 7 случаях слои типов C, H, т.е. в 70% случаев отмечались низкие интенсивные слои (до 6-й кратности отражения), а в 30% случаев высокие слои. Это означает, что для промежуточных землетрясений исследованной выборки с $M = 6.5$—7.2 слои *Es* образуются, в основном, в нижней части области *E*, как и в отсутствие землетрясений. Этот факт не повлиял на результаты нашего исследования, но прояснил причину небольших отклонений Δ*h′Es*. С физической точки зрения, по-видимому, более высокие спорадические слои, предпочтительно, образуются под влиянием сейсмогенного электрического поля, проникшего в ионосферу, а более низкие — за счет АГВ, связанных с процессами подготовки землетрясения.

Наконец, анализ числовых данных табл. показывает, что значения отклонений в ионосферных параметрах варьируют в пределах $\Delta h'Es = 0$—65 км, $\Delta foEs = 0.1$—3.6 МГц. Величины отклонений на двух станциях обычно отличаются друг от друга, причем отклонения Δ*foEs* на станции, находящейся ближе к эпицентру, в 9 из 12 случаев выше, чем на более далекой от эпицентра землетрясения станции. Время упреждения момента землетрясения имеет тенденцию возрастания с увеличением магнитуды землетрясения.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Представленные на рис. 2 линейные регрессии также построены по данным табл., приведенной выше, и количественно характеризуют полученные времена упреждения момента толчка ($\Delta T_{h'Es}$) для ионосферных станций Kokubunji и Wakkanai соответственно.

Из рисунка хорошо видно, что существует достаточно высокая корреляция времени упреждения момента землетрясения возможным КИПЗ с магнитудой землетрясения, причем для обеих станций, исключение зависимости от эпицентрального расстояния (R_e) увеличивает коэффициент корреляции (на $\cong 6\%$ для обеих станций). Такие изменения соответствующих коэффициентов корреляции характерны для краткосрочных ионосферных предвестников землетрясений (КИПЗ) сильных коровых землетрясений (с $h_G \leqslant 60$ км), как это показано в работе [Корсунова и Хегай, 2018]. Однако, величины отклонений Δ*h′Es*, связанные с КИПЗ коровых землетрясений, оказываются систематически выше при сравнении их с соответствующими отклонениями Δ*h′Es*, обусловленными подготовкой сильных промежуточных землетрясений. Таким образом, КИПЗ сильных коровых землетрясений проявляются более “ярко”, чем КИПЗ сильных промежуточных землетрясений. При этом, выделенные КИПЗ подчиняются тем же закономерностям, что и КИПЗ коровых землетрясений. Основными отличиями являются проявление эффектов подготовки промежуточных землетрясений на больших расстояниях и меньшие изменения виртуальных высот *Es* (*h′Es*) по сравнению с коровыми землетрясениями.

На рис. 3 представлены зависимости, аналогичные рис. 2, в которых, однако в качестве независимой переменной по осям абсцисс отложена не магнитуда землетрясения, а глубина гипоцентра очага h_G. Соответствующие линейные регрессии

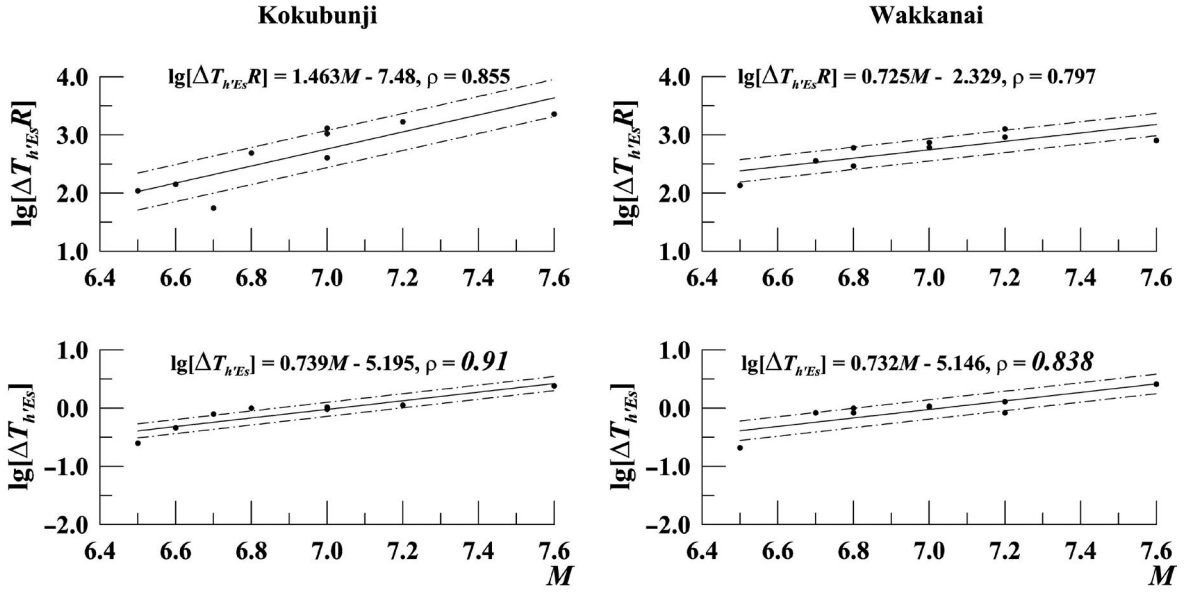

Рис. 2. Зависимости логарифмов величин $\Delta T_{h'Es}$ (сут) и логарифмов произведений $\Delta T_{h'Es} \times R$ (R – эпицентральное расстояние до ионосферной станции в км) для возможных КИПЗ, наблюдаемых на ст. Kokubunji (левые панели) и ст. Wakkanai (правые панели) от магнитуд (M) рассмотренных промежуточных землетрясений, построенные по данным этих станций (точки). Сплошными линиями показаны линии регрессии, полученные методом наименьших квадратов, а штрихпунктирными линиями указаны величины стандартных ошибок этих регрессий (разброс зависимой переменной вокруг линии регрессии). Рядом с уравнением каждой регрессии указан коэффициент корреляции (ρ).

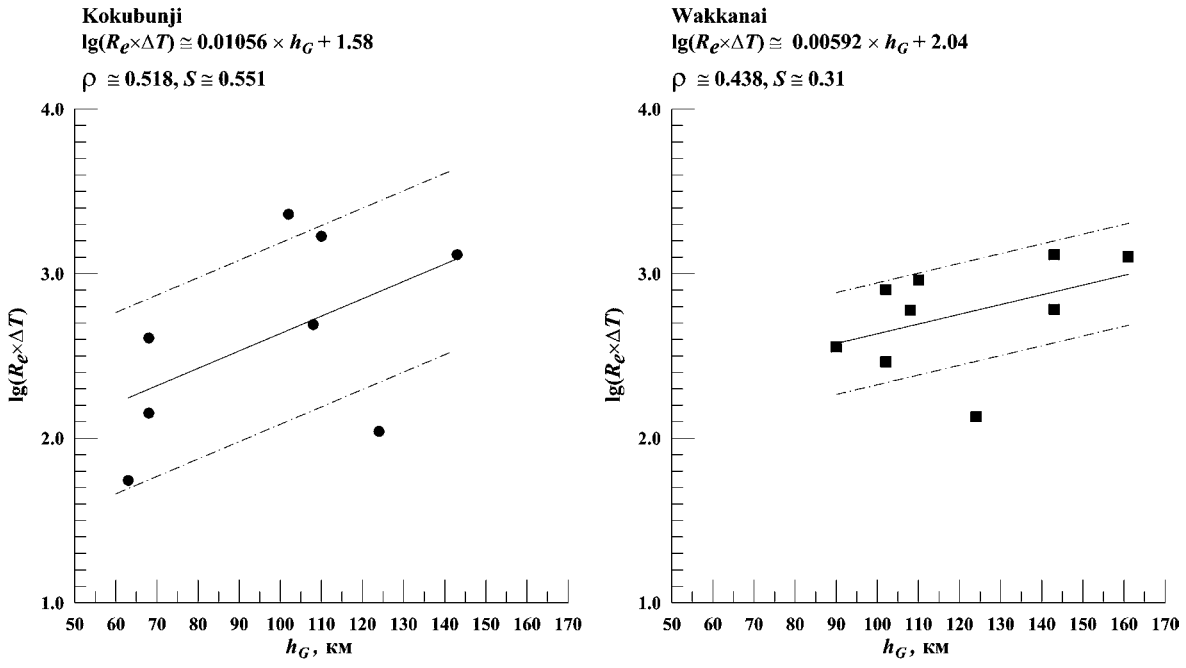

Рис. 3. Линейные регрессии (сплошные линии) для логарифмов произведений $\Delta T_{h'Es} \times R_e$ (R_e – эпицентральное расстояние до ионосферной станции в км, $\Delta T_{h'Es}$ — в сут) для возможных КИПЗ, наблюдаемых на ст. Kokubunji (левые панели, крупные черные точки) и ст. Wakkanai (правые панели, черные "квадратики") в зависимости от глубин гипоцентров очагов (h_G) рассмотренных промежуточных землетрясений, построенные по данным этих станций. Линии регрессии, получены методом наименьших квадратов, а штрихпунктирными линиями указаны величины стандартных ошибок этих регрессий (разброс зависимой переменной вокруг линии регрессии). Под уравнением каждой регрессии указан коэффициент корреляции (ρ) и стандартная ошибка регрессии (S).

построены по данным табл., приведенной выше, при этом случай землетрясения с $h_G = 245$ км исключен из рассмотрения, т.к. в промежутке глубин гипоцентров очага $h_G \in [162; 245]$ км нет других промежуточных землетрясений, и интерполяция в этом достаточно широком диапазоне слишком ненадежна (из-за отсутствия данных внутри него). Левая панель отображает регрессию (сплошная линия) для данных по ст. Kokubunji (крупные черные кружки), штрихпунктирные линии отмечают диапазон стандартной ошибки регрессии (разброс данных). Под названием станции приведено уравнение регрессии, коэффициент корреляции (ρ) и величина стандартной ошибки регрессии (S). На правой панели такое же представление дано для данных по ст. Wakkanai, единственное отличие состоит в том, что данные отображаются черными "квадратиками".

Из рассмотрения рисунка следует, что выявленные КИПЗ с ростом глубины гипоцентра его очага для промежуточных землетрясений появляются раньше при одинаковых расстояниях от эпицентра до точки наблюдения на поверхности земли, так как $\Delta T_{h'Es}$ (время упреждения) при этом будет возрастать.

В работе [Михайлов, 2007] приведена табл. 2, в которой содержатся данные по характеристикам краткосрочных предвестников землетрясений — аномалий в приземном квазистатическом атмосферном электрическом поле сейсмического происхождения для ряда землетрясений в изучаемом нами Тихоокеанском регионе (Япония, Камчатка): их времена упреждения подземного толчка (Δt), эпицентральные расстояния до пункта наблюдения (R), магнитуды (M) и глубины гипоцентров (D). В пяти случаях глубина гипоцентра землетрясения соответствует промежуточным землетрясениям.

С целью обобщения данных по предвестникам промежуточных землетрясений нами построена единая линейная регрессия по данным ст. Kokubunji (8 случаев), ст. Wakkanai (9 случаев) и тех данных, которые есть в табл. 2 работы [Михайлов, 2007] в диапазоне глубин гипоцентров очагов землетрясений $h_G \in [60; 102]$ км (т.е. добавлено еще 5 случаев), всего 22 случая в диапазоне $h_G \in [60; 161]$ км. Эта обобщенная линейная регрессия, аналогично рис. 3, представлена на рис. 4 (данные ст. Kokubunji — крупные точки, ст. Wakkanai — черные "квадратики", из табл. 2 работы [Михайлов, 2007] — шестиконечные звездочки).

Как видно из рисунка, увеличение массива данных привело к существенному увеличению коэффициента корреляции, что видно из сравнения $\rho_{Wakkanai} \cong 0.438 < \rho_{Kokubunji} \cong 0.518 < \rho \cong 0.568$, таким образом, теснота связи между $\lg(\Delta T \cdot R_e)$ и h_G по шкале Чеддока выросла от умеренной ($0.3 < \rho < 0.5$) до заметной ($0.5 < \rho < 0.7$), что свидетельствует в пользу большей надежности выявленной тенденции.

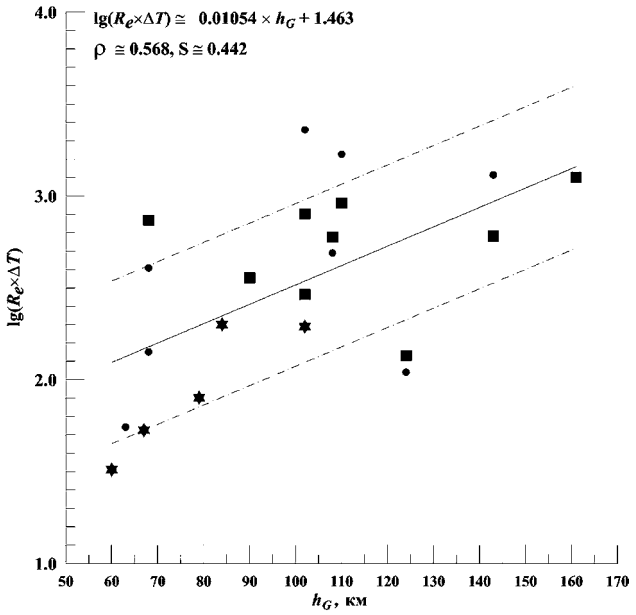

Рис. 4. То же, что и рис. 3, но для совокупности всех данных по промежуточным землетрясениям (данные ст. Kokubunji — крупные точки, ст. Wakkanai — черные "квадратики", из табл. 2 работы [Михайлов, 2007] — шестиконечные звездочки).

4. ВЫВОДЫ

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Для промежуточных землетрясений зона подготовки больше, чем для коровых, и для Тихоокеанского региона (Япония, Камчатка) удовлетворительно описывается радиусом ρ_{DS}.

2. Величина отклонений в $foEs$ перед промежуточными землетрясениями сравнима с полученными для коровых землетрясений, но изменения виртуальных высот Es ($h'Es$) существенно меньше.

3. Время упреждения КИПЗ момента толчка для промежуточных землетрясений в диапазоне магнитуд $M = 6.5$—7.6 изменяется от нескольких часов до нескольких суток в зависимости от магнитуды землетрясения.

4. Выявленные КИПЗ промежуточных землетрясений при одинаковых расстояниях от эпицентра до точки наблюдения с ростом глубины гипоцентра землетрясения появляются раньше, т.е. от момента подземного толчка назад по времени отстоят дальше.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность National Institute of Information and Communications Technology (NICT, Japan) ионосферные данные которого были использованы в данной работе, а также United States Geological Survey's (USGS) Earthquake Hazards Program за предоставление доступа к данным по землетрясениям.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных научных исследований государственной академии наук по теме: Исследование солнечной активности и физических процессов в системе "Солнце—Земля" (№ 0037-2014-0003).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

—*Бычков В.В., Корсунова Л.П., Смирнов С.Э., Хегай В.В.* Аномалии в ионосфере и электричестве приземного слоя атмосферы перед Камчатским землетрясением 30.01.2016 г. по данным обсерватории "ПАРАТУНКА" // Геомагнетизм и аэрономия. 2017. Т. 57. № 4. С. 532—540.
http://dx.doi.org/10.7868/S0016794017040058

—*Корсунова Л.П., Легенька А.Д.* Обнаружение возможных краткосрочных ионосферных предвестников сильных землетрясений по изменениям ежесуточных характеристик *Es* // Геомагнетизм и аэрономия. 2021. Т. 61. № 6. С. 803—811.
http://dx.doi.org/10.31857/S0016794021050060

—*Корсунова Л.П., Хегай В.В.* Возможные краткосрочные предвестники сильных коровых землетрясений в Японии по данным наземных станций вертикального зондирования ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия. 2018. Т. 58. № 1. С. 94—101.
http://dx.doi.org/10.7868/S001679401801008X

—*Корсунова Л.П., Хегай В.В.* Оценка эффективности использования интегральных суточных характеристик *Es* для выделения краткосрочных ионосферных предвестников сильных землетрясений // Геомагнетизм и аэрономия. 2023. Т. 63. № 2. С. 227—237.
http://dx.doi.org/10.31857/S0016794022600417

—*Михайлов Ю.М.* О свойствах предвестников землетрясений в электростатическом поле в приземной атмосфере // Физика Земли. 2007. № 4. С. 76—80.

—*Пулинец С.А., Узунов Д.П., Давиденко Д.В., Дудкин С.А., Цадиковский Е.И.* Прогноз землетрясений возможен?! М.: Трован, 2014. 144 с.

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

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

—*Dabas R.S., Das R.M., Sharma K., Pillai K.G.M.* Ionospheric precursors observed over low latitudes during some of the recent major earthquakes // J. Atmos. Sol.-Terr. Phy. 2007. V. 69. № 15. P. 1813—1824.
https://doi.org/10.1016/j.jastp.2007.09.005

—*Dobrovolsky I.P., Zubkov S.I., Miachkin V.I.* Estimation of the size of earthquake preparation zones // Pure Appl. Geophys. 1979. V. 117. № 5. P. 1025—1044.
https://doi.org/10.1007/BF00876083

—*Hegai V., Zeren Z., Pulinets S.* Seismogenic field in the ionosphere before two powerful earthquakes: possible magnitude and observed ionospheric effects (Case study) // Atmosphere. 2023. V. 14. № 5. ID819.
https://doi.org/10.3390/atmos14050819

—*Liu J.Y., Chen Y.I., Chuo Y.J., Chen C.S.* A statistical investigation of pre-earthquake ionospheric anomaly // J. Geophys. Res. Space. 2006. V. 111. № 5. ID A05304.
https://doi.org/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. 1979. V. 32. № 4. P. 443—446.

—*Perevalova N.P., Sankov V.A., Astafyeva E.I., Zhupityaeva A.S.* Threshold magnitude for ionospheric TEC response to earthquakes // J. Atmos. Sol.-Terr. Phy. 2014. V. 108. P. 77—90.
http://dx.doi.org/10.1016/j.jastp.2013.12.014

—*Perrone L., Korsunova L.P., Mikhailov A.V.* Ionospheric precursors for crustal earthquakes in Italy // Ann. Geophys. 2010. V. 28. № 4. P. 941—950.
https://doi.org/10.5194/angeo-28-941-2010

—*Pulinets S.A., Boyarchuk K.A.* Ionospheric precursors of earthquakes. Berlin: Springer, 2005. 315 p.
https://doi.org/10.1007/b137616

—*Pulinets S., Ouzounov D.* The Possibility of Earthquake Forecasting: Learning from nature. Bristol, UK: IOP Publishing Ltd., 2018. 167 p.
https://doi.org/10.1088/978-0-7503-1248-6

—*Sarkar S., Gwal A.K., Parrot M.* Ionospheric variations observed by the DEMETER satellite in the mid-latitude region during strong earthquakes // J. Atmos. Sol.-Terr. Phy. 2007. V. 69. № 13. P. 1524—1540.
https://doi.org/10.1016/j.jastp.2007.06.006

—*Sharma D.K., Israil M., Chand R., Rai J., Subrahmanya P., Garg S.C.* Signature of seismic activities in the *F*2 region ionospheric electron temperature // J. Atmos. Sol.-Terr. Phy. 2006. V. 68. № 6. P. 691—696.
https://doi.org/10.1016/j.jastp.2006.01.005

—*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. 2011. V. 22. № 2. P. 177—185.
https://doi.org/10.3319/TAO.2010.08.13.01(TibXS)

Identification of Possible Short-Term Ionospheric Earthquake Precursors for Seismic Events with Intermediate Hypocentrals Depths by Measuring the Standard Parameters of the Mid-Latitude *Es* Layer

L. P. Korsunova[1], *, V. V. Hegai[1], **

[1] *Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation, Moscow, Troitsk, Russia*
**e-mail: lpkors@rambler.ru*
***e-mail: hegai@izmiran.ru*

Changes in deviations from the background values of the parameters of the sporadic *E* ionosphere (*Es*) are studied: the effective (virtual) height *h'Es* and limiting reflection frequency (*foEs*). Basically, the analysis was carried based on hourly measurement data from several Japanese ground stations for vertical sounding of the ionosphere in order to identify possible short-term ionospheric earthquake precursors with intermediate (from 60 to 300 km) hypocentral depths. All known events (12 earthquakes, from 1969 to 2022) are considered for which the necessary ionospheric data in the Japan region and magnitudes (*M*) ranging from 6.5 to 7.6 are available. From coincidence of the maxima in changes in the considered *Es* characteristics on the same day at pairs of stations separated by hundreds of kilometers, the time of appearance of possible ionospheric earthquake precursors was recorded. According to the ionospheric data available during the preparation period for the studied earthquakes, a tendency has been identified according to which the time the moment of the main influence is anticipated depends on the magnitude of the impending earthquake. Similarities and differences in the responses of the ionosphere to the preparation of surface (crustal) earthquakes and earthquakes with an intermediate hypocentral depth are revealed. Another tendency is also revealed: earlier appearance of the identified earthquake precursors with increasing hypocentral depth for earthquakes with an intermediate hypocentral depth at the same distances from the epicenter to the observation point.