

## **Исследование влияния сейсмической активности на коэффициент полупрозрачности спорадического слоя Es над Камчаткой**

***В. В. Богданов, А. В. Павлов***

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

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

Мелкомасштабная турбулизация спорадического слоя Es (десятки метров) оценивается коэффициентом полупрозрачности  $\Delta fbEs$ , а крупномасштабная турбулизация (сотни метров) выражается в Es-рассеянии. Перед крупными землетрясениями с магнитудами  $M \geq 5.0$  может наблюдаться формирование аномальных спорадических слоев в области E: увеличение электронной концентрации и коэффициента полупрозрачности на интервале от 14 до 3 суток до момента землетрясения и последующее резкое уменьшение значений этих параметров за 1 сутки до землетрясения. В данной работе проведён анализ изменений коэффициента полупрозрачности спорадического слоя Es, предшествующих наступлению землетрясений с магнитудой  $M \geq 5.0$ , произошедших в Камчатском регионе за период 2015–2019 гг. Произведена оценка прогностической эффективности параметра  $\Delta fbEs$  по методикам А. А. Гусева и Г. М. Молчана.

*Ключевые слова: ионосфера, литосфера, вертикальное радиозондирование, землетрясение, предвестник землетрясений.*

DOI: 10.26117/2079-6641-2020-33-4-157-165

Поступила в редакцию: 21.10.2020

В окончательном варианте: 23.11.2020

**Для цитирования.** Богданов В. В., Павлов А. В. Исследование влияния сейсмической активности на коэффициент полупрозрачности спорадического слоя Es над Камчаткой // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2020. Т. 33. № 4. С. 157-165. DOI: 10.26117/2079-6641-2020-33-4-157-165

*Контент публикуется на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>)*

© Богданов В. В., Павлов А. В., 2020

### **Введение**

Область E ионосферы расположена на высотах от 90 до 160 км. На ионограммах в области E могут наблюдаться два слоя: регулярный, создающийся солнечным излучением и нерегулярный спорадический Es-слой. Спорадические слои Es – это

**Финансирование.** Работа выполнялась в рамках государственного задания по теме «Динамика физических процессов в активных зонах ближнего космоса и геосфер» (Пер.№ АААА-А17-117080110043-4).

облака повышенной ионизации, расположенные преимущественно на высотах: 96, 103-107, 111-112, 117-118 и 128 км [1], в которых преобладают ионы металлов метеорного происхождения ( $\text{Fe}^+$ ,  $\text{Mg}^+$ ,  $\text{Na}^+$  и др.) [2]. Толщина спорадических слоев может изменяться от нескольких сотен метров до нескольких километров, а их горизонтальные размеры могут составлять несколько сотен километров.

Механизм формирования стандартных спорадических слоев связан с явлением ветрового сдвига [3], а процесс их расплывания происходит за счет турбулентной и амбиполярной диффузии [4]. Кроме стандартных спорадических слоев существуют также аномальные спорадические слои, образование которых вызвано модификацией атмосферного электрического поля. Аномальные спорадические слои возникают когда электрическое поле на поверхности Земли направлено сверху вниз. Образование аномальных спорадических слоев, в отличие от стандартных, происходит на высоте 120 км [5].

Исследования сейсмоионосферных связей показывают, что акустические и электромагнитные возмущения, возникающие в процессе подготовки землетрясений, могут быть существенной причиной турбулизации ионосферы в диапазоне масштабов от десятков метров до десятков километров и характерных времен существования порядка нескольких десятков минут. Одним из ионосферных параметров, характеризующих нерегулярные турбулентные процессы, является коэффициент полупрозрачности спорадического слоя. Аномальное изменение значения коэффициента полупрозрачности спорадического слоя  $E_s$  в период подготовки сильных землетрясений наблюдались в различных сейсмоактивных регионах Земли [6, 7].

В данной работе будет произведена оценка прогностической эффективности коэффициента полупрозрачности спорадического слоя  $E_s$  для землетрясений с магнитудой  $M \geq 5.0$ , произошедших в Камчатском регионе за период 01.08.2015-31.12.2019 гг.

## Методика исследования

В данной работе использованы данные радиофизических наблюдений, полученные с помощью автоматической ионосферной станции (АИС) вертикального радиозондирования, расположенной в с. Паратунка ( $\varphi = 52.97^\circ$  с.ш.,  $\lambda = 158.24^\circ$  в.д.). Наблюдения проводились один раз в 15 минут в импульсном режиме на частотах от 1 до 15 МГц. Для анализа использован каталог землетрясений Камчатского филиала Федерального исследовательского центра "Единая геофизическая служба РАН". Ионосферный слой  $E_s$  характеризуется двумя частотами зондирующих радиоволн – частотой экранирования  $fbEs$ , которая соответствует максимальной плотности ионизации в спорадическом слое ( $fbEs \sim \sqrt{N_{\max}}$ ), и предельной частотой отражения  $foEs$ , превышающей  $fbEs$ . Частотные параметры спорадического слоя  $E_s$  информируют о структуре и содержании концентрации электронов в  $E_s$ . Коэффициент полупрозрачности  $\Delta fbEs$  характеризует рассеяние радиоволн на мелкомасштабных (десятки метров) неоднородностях  $E_s$  и определяется по формуле [8]:

$$\Delta fbEs = (foEs - fbEs) / fbEs \quad (1)$$

где  $foEs$ ,  $fbEs$  - соответственно предельная частота и частота экранирования спорадического слоя в (МГц). Увеличение значений коэффициента полупрозрачности

$\Delta fbEs$  свидетельствует об образовании неоднородностей спорадических слоев. Увеличение степени неоднородности свидетельствует о возникновении турбулентности в спорадическом слое Es. На рис. 1 представлены ионограммы, содержащие спорадический слой Es при значениях коэффициента полупрозрачности  $\Delta fbEs = 0$  (рис. 1а) и  $\Delta fbEs = 5.54$  (рис. 1б).

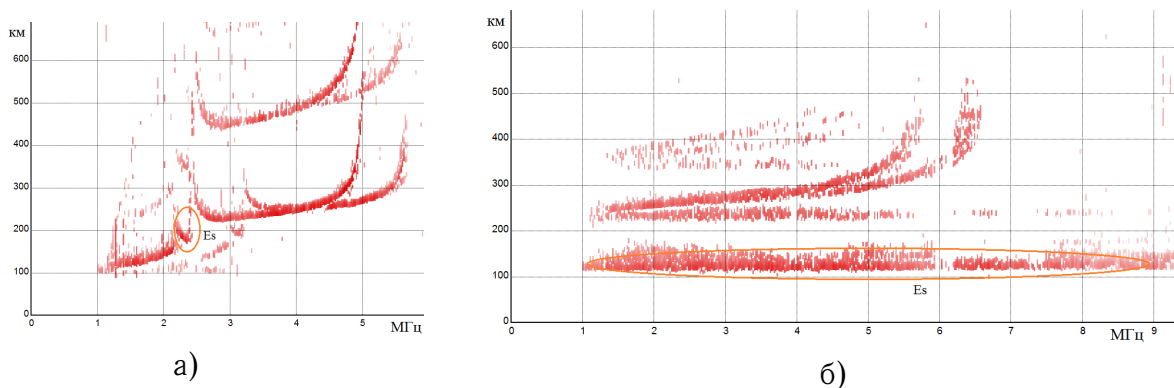


Рис. 1. Ионограммы с отмеченным спорадическим слоем Es при различных значений коэффициента полупрозрачности  $\Delta fbEs$ : а)  $\Delta fbEs = 0$ ; б)  $\Delta fbEs = 5.54$ .

На рис. 2 представлены часовые значения коэффициента полупрозрачности  $\Delta fbEs$  за период 01.08.2015–31.12.2019 гг.

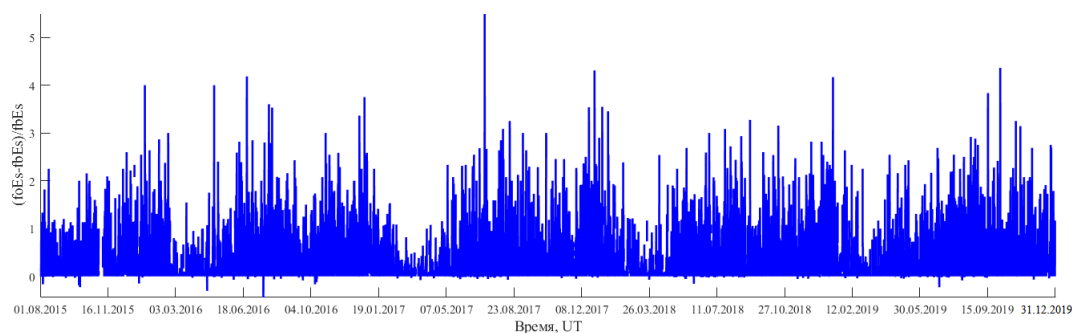


Рис. 2. Временной ряд значения коэффициента полупрозрачности  $\Delta fbEs$  за период 01.08.2015–31.12.2019 гг.

Для выделения аномальных возмущений в ионосфере в период подготовки землетрясений расчет коэффициента полупрозрачности Es-слоя  $\Delta fbEs$  выполнялся для значений  $foEs > fbEs$  по формуле (1), на следующем этапе полученные значения коэффициента полупрозрачности осреднялись за сутки местного времени по формуле

$$\Delta fbEs_{\text{ср}} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k fbEs_i \quad (2)$$

где  $k$  – количество значений коэффициента полупрозрачности Es-слоя за сутки. На рис. 3 представлены значения коэффициента полупрозрачности  $\Delta fbEs$  за период 01.08.2015–31.12.2019 гг., осредненные за сутки местного времени.

В качестве примера, на рис. 4 представлены значения  $\Delta fbEs_{\text{ср}}$  за период 05.11.2015–21.11.2015 гг., предшествовавшие землетрясениям с  $M \geq 5.0$ . Как видно из рисунка, наступлению землетрясений с магнитудами  $M \geq 5.0$  предшествовало увеличение значений коэффициента полупрозрачности  $\Delta fbEs_{\text{ср}}$ .

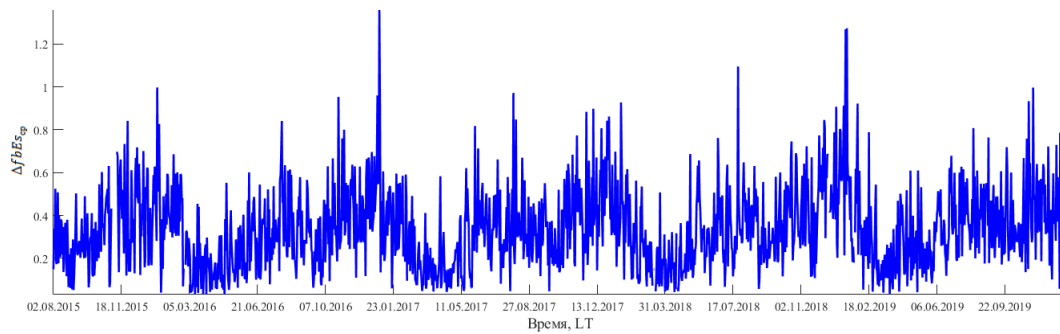


Рис. 3. Временной ряд средних за сутки значения коэффициента полупрозрачности  $\Delta fbEs_{ср}$  за период 01.08.2015–31.12.2019 гг.

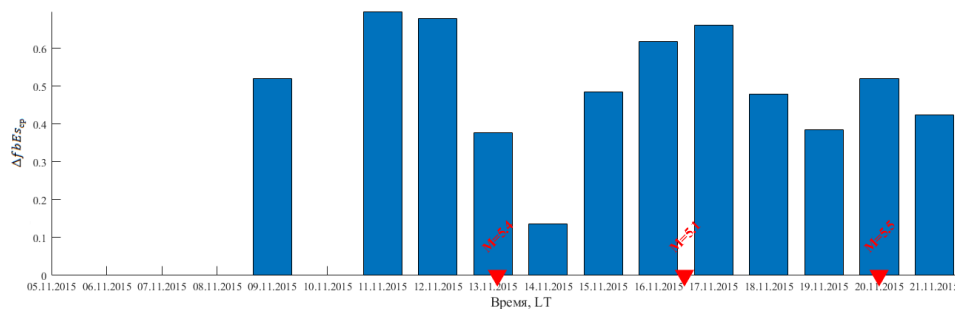


Рис. 4. Значения коэффициента полупрозрачности  $\Delta fbEs_{ср}$  за период 05.11.2015–21.11.2015 гг. перед наступлением сейсмических событий: 13.11.2015 г. ( $M = 5.4$ ,  $h = 51$  км), 16.11.2015 г. ( $M = 5.1$ ,  $h = 50$  км) и 19.11.2015 г. ( $M = 5.5$ ,  $h = 51$  км).

Для оценки прогностической эффективности параметра  $\Delta fbEs_{ср}$  использовались следующие характеристики: надёжность  $R$  и достоверность  $V$  [9], а также эффективности  $J_G$  и  $J_M$ , вычисленные соответственно по методикам А.А. Гусева [10] и Г.М. Молчана [11].

Надёжность предвестника  $R$  определяется как отношение количества землетрясений  $N_+$ , для которых был выделен предвестник, к числу всех землетрясений  $N$ :

$$R = \frac{N_+}{N} \quad (3)$$

Достоверность предвестника  $V$  определяется как отношение числа предвестниковых аномалий  $n(A_E)$  к общему числу выделенных аномалий  $n(A)$ :

$$V = \frac{n(A_E)}{n(A)} \quad (4)$$

Эффективность прогностического признака на основе методики А.А. Гусева вычисляется по формуле [10]:

$$J_G = \frac{N_+/T_{тр}}{N/T} \quad (5)$$

где  $T$  – общее время мониторинга сейсмической обстановки,  $N_+$  – количество землетрясений, соответствующих успешному прогнозу за время  $T$ ,  $N$  – общее количество произошедших землетрясений,  $T_{тр}$  – общее время тревоги (суммарная длительность всех промежутков времени, в которых действовал прогноз по

оцениваемому методу в течение общего времени мониторинга). Статистическая значимость  $\alpha$  определяется вероятностью получения значений эффективности  $J_G$  в отсутствие связи "землетрясение–предвестник" исходя из гипергеометрического распределения  $N_+$ .

Согласно характеристике информативности прогностических признаков [12], при  $J_G < 1.2$  прогностический признак считается неинформативным и его использование не приведёт к заметному улучшению прогноза, при  $1.2 < J_G \leq 1.5$  прогностический признак может оказаться эффективным в сочетании с другими признаками, а при  $J_G > 1.5$  прогностический признак считается информативным и может быть использован в алгоритмах прогноза землетрясений.

Эффективность прогностического признака на основе методики Г. М. Молчана вычисляется по формуле [11]:

$$J_M = 1 - \nu - \tau \quad (6)$$

где  $\nu = 1 - \frac{N_+}{N}$  – доля пропусков цели,  $\tau = \frac{T_{тр}}{T}$  – относительный объём тревог.

Для случайного прогноза  $J_M = 0$ , а для идеального (без пропуска цели и с нулевым временем тревоги) –  $J_M = 1$ . На диаграмме Молчана диагональ  $\tau + \nu = 1$ , соединяющая точки (0; 1) и (1; 0) соответствует "случайному" прогнозу. Для этой диагонали можно построить доверительный интервал с заданной значимостью  $\alpha$ . Если экспериментальные точки  $(\tau, \nu)$  лежат под нижней границей доверительного интервала с заданной значимостью  $\alpha$ , то это интерпретируется как высокая степень надежности выявленной связи рассматриваемого предвестника с прогнозируемыми землетрясениями.

Оценка прогностической эффективности рассматриваемого параметра  $\Delta fbEs_{cp}$  производилась для четырех периодов ожидания  $T_{ож}$  равных 3, 5, 7 и 14 суток. В качестве прогнозируемых землетрясений рассматривались сейсмические события с магнитудой  $M \geq 5.0$  и глубиной гипоцентра  $h \leq 100$  км, произошедших на эпицентральных расстояниях  $r \leq 300$  км от пункта ионосферных наблюдений в с. Паратунка. Период ожидания длительностью  $T_{ож}$  объявлялся при условии превышения значений параметра  $\Delta fbEs_{cp}$  значения  $M(\Delta fbEs_{cp}) + \sigma(\Delta fbEs_{cp}) = 0.6$ , где  $M(\Delta fbEs_{cp})$  и  $\sigma(\Delta fbEs_{cp})$  соответственно математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение параметра  $\Delta fbEs_{cp}$ .

В таблице и на рис. 5 представлены результаты оценки прогностической эффективности коэффициента полупрозрачности слоя  $E_s$ .

При увеличении значений периода ожидания землетрясения  $T_{ож}$  возрастают значения параметров надёжности  $R$  и достоверности  $V$  прогностического признака, но снижаются значения эффективности  $J_G$  и  $J_M$ . Для периода ожидания  $T_{ож} = 3$  суток эффективность прогноза  $J_G = 1.78$ , т.е. прогностический признак можно считать информативным. Точка прогноза  $(\tau, \nu)$  для  $T_{ож} = 3$  суток лежит ниже 99% доверительного интервала (рис. 5а), что можно интерпретировать как достаточно высокую степень надёжности выявленной связи рассматриваемого предвестника с землетрясениями данного диапазона магнитуд. Для периодов ожидания  $T_{ож}$  равных 5, 7 и 14 суток эффективность прогноза  $J_G$  снижается соответственно с 1.47 до 1.25. При таких значениях  $J_G$  прогностический признак считается не очень полезным, но для увеличения эффективности прогноза землетрясений может быть использован совместно с другими предвестниками. Точка прогноза  $(\tau, \nu)$  при  $T_{ож} = 5$  суток лежит на границе 99% доверительного интервала (рис. 5б), а для  $T_{ож} = 7$  суток и  $T_{ож} = 14$  суток – на границы 95% доверительного интервала (рис. 5в,г).

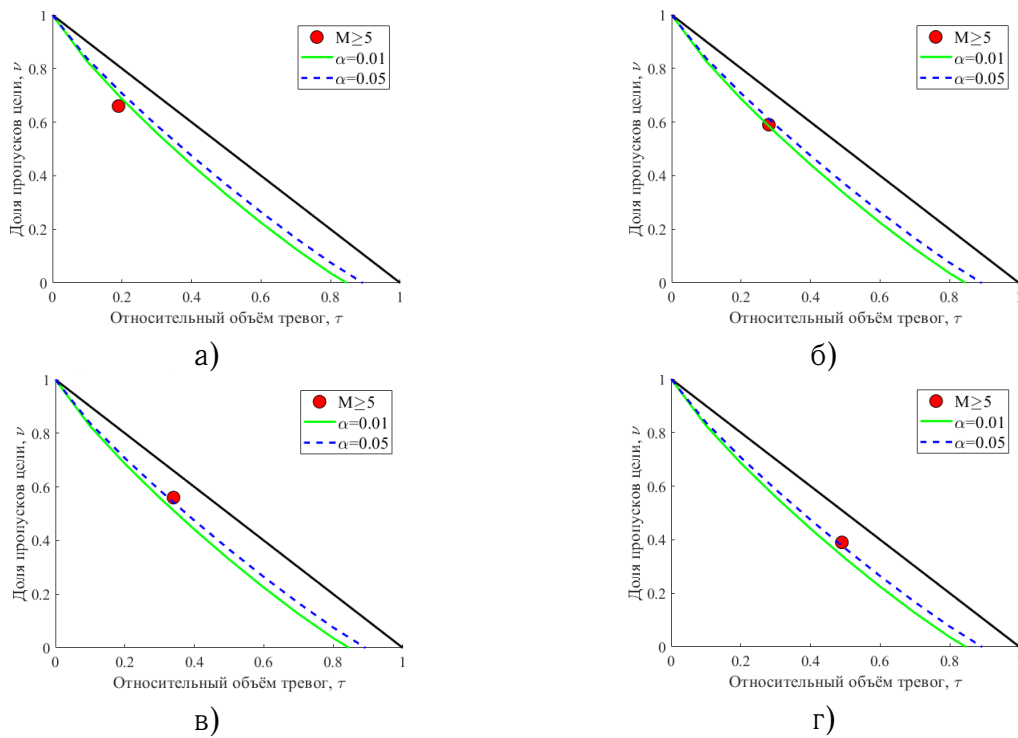


Рис. 5. Диаграммы ошибок для коэффициента полупрозрачности  $\Delta fbEs_{cp}$  для периодов ожидания: а)  $T_{ож} = 3$ ; б)  $T_{ож} = 5$ ; в)  $T_{ож} = 7$  суток; г)  $T_{ож} = 14$  суток.

При значениях длительности периода ожидания  $T_{ож}$  равных 5, 7 и 14 суток связь рассматриваемого ионосферных предвестника с землетрясениями с магнитудами  $M \geq 5.0$  не возможно однозначно интерпретировать как надёжную.

Таблица

**Прогностическая эффективность коэффициента полупрозрачности  $\Delta fbEs_{cp}$  для землетрясений с  $M \geq 5.0$ .**

$T_{ож}$ (сутки)	3	5	5	14
$N_+$	20	24	26	36
$N$	59	59	59	59
$n(A_E)_+$	19	22	24	29
$n(A)$	115	115	115	115
$T_{тр}$ (сутки)	307	449	554	787
$T$ (сутки)	1614	1614	1614	1614
$V$	0.17	0.19	0.21	0.25
$R$	0.34	0.41	0.44	0.61
$J_G$	1.78	1.46	1.28	1.25
$\alpha$	0.01	0.04	0.12	0.06
$\tau$	0.19	0.28	0.34	0.49
$\nu$	0.66	0.59	0.56	0.39
$J_M$	0.15	0.13	0.1	0.12

## Заключение

Проведён анализ изменений коэффициента полупрозрачности спорадического слоя Es, предшествующих наступлению землетрясений с магнитудой  $M \geq 5.0$ , произошедших в Камчатском регионе за период 01.08.2015–31.12.2019 гг. Произведенная оценка прогностической эффективности усреднённого за сутки местного времени параметра  $\Delta fbEs$  для периодов ожидания землетрясений различной длительности показала, что наибольшая эффективность  $J_G = 1.78$  и  $J_M = 0.15$  достигается при  $T_{ож} = 3$  суток. При этом появление аномальных значений прогностического параметра предшествовало 34% землетрясений рассматриваемого диапазона магнитуд (надёжность предвестника  $R = 0.34$ ). При значении периода ожидания  $T_{ож} = 3$  суток прогностический признак  $\Delta fbEs_{ср}$  можно считать информативным. Увеличение длительности периода ожидания землетрясения  $T_{ож}$  приводит к снижению эффективности прогноза по данному прогностическому признаку.

**Конкурирующие интересы.** Авторы заявляют, что конфликтов интересов в отношении авторства и публикации нет.

**Авторский вклад и ответственность.** Все авторы участвовали в написании статьи и полностью несут ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать. Окончательная версия рукописи была одобрена всеми авторами.

## Список литература/References

- [1] Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А., *Физика ионосферы*, Наука, М., 1988, 528 с. [Bryunelli B.E., Namgaladze A.A., *Fizika ionosfery*, Nauka, M., 1988 (in Russian), 528 pp.]
- [2] Liperovsky V.A. et al., “Modification of sporadic E-Layers caused by seismic activity”, *Surveys in geophysics*, **21** (2000), 449–486
- [3] Гершман Б.Н., Игнат'ев Ю.А., Каменецкая Г.Х., *Механизмы образования ионосферного спорадического слоя Es на различных широтах*, Наука, М., 1976, 108 с. [Gershman B.N., Ignat'ev Yu.A., Kamenetskaya G.Kh., *Mekhanizmy obrazovaniya ionosfernogo sporadicheskogo sloya Es na razlichnykh shirotakh*, Nauka, M., 1976 (in Russian), 108 pp.]
- [4] Gurevich A.V., Borisov N.D., Zypin K.P., “Ionospheric turbulence induced in the lower part of the E region by the turbulence of the neutral atmosphere”, *JGR Space Physics*, **102** (1997), 379–388
- [5] Пулинец С.А. и др., “Атмосферное электрическое поле как источник изменчивости ионосферы”, *Успехи физических наук*, **168**:5 (1998), 582–589. [Pulinets S.A. et al., “Atmosfernoe elektricheskoe pole kak istochnik izmenchivosti ionosfery”, *Uspekhi fizicheskikh nauk*, **168**:5 (1998), 582–589 (in Russian)].
- [6] Liperovskaya E.V. et al., “Variability of sporadic E-layer semi transparency (foEs - fbEs) with magnitude and distance from earthquake epicenters to vertical sounding stations”, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **3** (2003), 279–284.
- [7] Liperovsky V.A. et al., “On spread - Es effects in the ionosphere before earthquakes”, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **5** (2005), 59–62.
- [8] Липеровский В.А. и др., “Физические модели связей в системе литосфера-атмосфера-ионосфера перед землетрясениями”, *Геоматематизм и аэрономия*, **48**:6 (2008), 831–843. [Liperovskiy V.A. et al., “Fizicheskie modeli svyazey v sisteme litosfera-atmosfera-ionosfera pered zemletryasenyami”, *Geomagnetizm i aeronomiya*, **48**:6 (2008), 831–843 (in Russian)].
- [9] Салтыков В.А., “О возможности использования приливной модуляции сейсмических шумов в целях прогноза землетрясений”, *Физика Земли*, 2017, №2, 84–96.

- [Saltykov V.A., "O vozmozhnosti ispol'zovaniya prilivnoy modulyatsii seysmicheskikh шумов v tselyakh prognoza zemletryaseniya", *Fizika Zemli*, 2017, № 2, 84–96 (in Russian)].
- [10] Гусев А.А., "Прогноз землетрясений по статистике сейсмичности", *Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом Камчатки*, Наука, Новосибирск, 1974, 109–119. [Gusev A.A., "Prognoz zemletryaseniya po statistike seysmichnosti", *Seysmichnost' i seysmicheskie prognoz, svoystva verkhney mantii i ikh svyaz' s vulkanizmom Kamchatki*, Nauka, Novosibirsk, 1974, 109–119 (in Russian)].
- [11] Molchan G.M., "Strategies in strong earthquake prediction", *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **61** (1990), 84–98.
- [12] Завьялов А.Д., *Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация*, Наука, М., 2006, 254 с. [Zav'yalov A.D., *Srednesrochnyy prognoz zemletryaseniya: osnovy, metodika, realizatsiya*, Nauka, M., 2006 (in Russian), 254 pp.]



## **Investigation of the influence of seismic activity on the semi transparency coefficient of the sporadic Es layer over Kamchatka**

***V. V. Bogdanov, A. V. Pavlov***

Institute of Cosmophysical Researches and Radio Wave Propagation Far-Eastern Branch  
Russian Academy of Sciences, 684034, Kamchatskiy Kray, Paratunka, Mirnaya st., 7  
E-mail: vbogd@ikir.ru, pavlov@ikir.ru

Small-scale turbulization of the sporadic Es layer (tens of meters) is estimated by the semi transparency coefficient  $\Delta fbEs$ , and large-scale turbulization (hundreds of meters) is expressed in Es scattering. It is known that before large earthquakes with magnitudes  $M \geq 5.0$ , the formation of abnormal sporadic layers in the E region can be observed: an increase in the electron concentration and semi transparency coefficient at the interval from 14 to 3 days before the earthquake and a subsequent sharp decrease in the values of these parameters 1 day before the earthquake. This paper analyzes changes in the semi transparency coefficient of the sporadic Es layer preceding the onset of earthquakes with a magnitude  $M \geq 5.0$  that occurred in the Kamchatka region during the period 2015–2019. The prognostic efficiency of the parameter  $\Delta fbEs$  was evaluated using the methods of A. A. Gusev and G. M. Molchan.

*Key words: ionosphere, lithosphere, vertical radio sounding, earthquake, earthquake precursor.*

DOI: 10.26117/2079-6641-2020-33-4-157-165

Original article submitted: 21.10.2020

Revision submitted: 23.11.2020

**For citation.** Bogdanov V. V., Pavlov A. V. Investigation of the influence of seismic activity on the semi transparency coefficient of the sporadic Es layer over Kamchatka. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2020, **33**: 4, 157-165. DOI: 10.26117/2079-6641-2020-33-4-157-165

**Competing interests.** The authors declare that there are no conflicts of interest regarding authorship and publication.

**Contribution and Responsibility.** All authors contributed to this article. Authors are solely responsible for providing the final version of the article in print. The final version of the manuscript was approved by all authors.

*The content is published under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>)*

© Bogdanov V. V., Pavlov A. V., 2020

**Funding.** The work was carried out within the framework of the state assignment on the topic "Dynamics of physical processes in active zones of near space and geospheres" (Reg. No. AAAA-A17-117080110043-4).