

А.А. РОЖНОЙ, М.С. СОЛОВЬЕВА, Д.В. ЧЕБРОВ,  
Г.Н. КОПЫЛОВА, Г.М. КОРКИНА, Б.В. ЛЕВИН

## Сейсмо-ионосферные возмущения в распространении ОНЧ-сигнала в связи с двумя индонезийскими землетрясениями в августе и сентябре 2018 года

*Анализируется поведение очень низкочастотного (ОНЧ) электромагнитного сигнала, принимаемого на станции в Петропавловске-Камчатском, в связи с двумя сильными землетрясениями в Индонезии. Первое землетрясение ( $M = 6,9$ ,  $h = 10$  км) произошло 19 августа 2018 г. в районе о-ва Ломбок, второе ( $M = 7,5$ ,  $h = 10$  км) – 28 сентября 2018 г. вблизи о-ва Сулавеси. Выявлены аномалии в дисперсии ночной амплитуды ОНЧ-сигнала, проходящего над эпицентральной областью землетрясений за 2–3 дня перед каждым землетрясением. Результат был подтвержден тем, что подобные эффекты не наблюдались на трех остальных трассах, которые проходят далеко от сейсмически активной области. Другие возможные причины, которые могут вызывать возмущения ионосферной плазмы (космическая погода, атмосферная циркуляция), были приняты во внимание.*

*Ключевые слова:* низкочастотные электромагнитные сигналы, предвестники землетрясений, нижняя ионосфера.

**Seismo-ionospheric disturbances in VLF signal propagation in connection with two earthquakes in Indonesia in August and September 2018.** A.A. ROZHNOI, M.S. SOLOVIEVA (The Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow), D.V. CHEBROV, G.N. KOPYLOVA, G.M. KORKINA (Kamchatka Branch of Geophysical Survey, RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky), B.W. LEVIN (Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk).

*We analyse the behaviour of very low frequency (VLF) electromagnetic signal received at the Petropavlovsk-Kamchatsky station in connection with two strong earthquakes which happened in Indonesia. The first earthquake ( $M = 6.9$ ,  $h = 10$  km) took place in September 19 near the Lombok Island. The second one occurred in September 28 on the Sulawesi Island ( $M = 7.5$ ,  $h = 10$  km). The analysis revealed the anomalies in dispersion of the night amplitude of the VLF signal which propagated over the seismic area. The anomalies were observed 2-3 days before the both earthquakes. The result of analysis was confirmed by the fact that such effects were absent in signals in other three paths which were far away from the epicentres of the earthquakes. Other possible reasons that may produce disturbances in the ionosphere plasma (space weather, atmospheric circulation) were taken into consideration.*

*Key words:* low frequency electromagnetic signals, earthquake precursors, lower ionosphere.

---

\*РОЖНОЙ Александр Александрович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, СОЛОВЬЕВА Мария Сергеевна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник (Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва), ЧЕБРОВ Данила Викторович – кандидат физико-математических наук, директор, КОПЫЛОВА Галина Николаевна – доктор геолого-минералогических наук, доцент, заведующая лабораторией, КОРКИНА Галина Мугтасимовна – старший программист (Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский), ЛЕВИН Борис Вульфович – член-корреспондент РАН, председатель Сахалинского научного центра ДВО РАН, научный руководитель (Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск). \*E-mail: rozhnoi@ifz.ru

## Введение

Аномальные вариации в ионизации ионосферы в различных регионах земного шара в связи с подготовкой землетрясений широко освещены в литературе (например, работы [9, 13, 15] и ссылки в них). Такие аномалии наблюдаются во всей ионосфере начиная от нижней границы до высот 1000 км и более.

Одним из экспериментальных методов мониторинга возмущений ионизации нижней ионосферы является использование очень низкочастотных (ОНЧ) или низкочастотных (НЧ) сигналов. Электромагнитные волны в диапазоне  $\sim 10\text{--}50$  кГц распространяются в сферическом волноводе, нижней границей которого является Земля, а верхней – область D-ионосферы. Эффективная высота отражения сигнала, принимаемого обычно днем,  $\sim 70$  км, а ночью –  $\sim 90$  км [21]. Таким образом, наблюдаемые изменения в регистрируемом сигнале зависят от высоты отражения, которая определяется величиной и градиентом электронной плотности около границы атмосфера/ионосфера [4].

Применение метода ОНЧ/НЧ-мониторинга для анализа вариаций сигналов, связанных с сейсмической активностью, началось еще в конце прошлого века в России, когда впервые были обнаружены ночные возмущения в амплитуде и фазе сигнала перед несколькими сильными землетрясениями на длинных трассах [1, 2, 7]. В дальнейшем, помимо ночных возмущений, было обнаружено изменение положения характерных минимумов в ежедневном ходе фазы и амплитуды сигнала во время восхода и захода солнца (терминаторов) за несколько дней до сильных землетрясений в Японии [11, 14].

Непрерывный многолетний мониторинг ОНЧ/НЧ-сигналов, проходящих над высокосейсмоактивными Курило-Камчатским и Японским регионами, позволил установить статистически значимую зависимость между вариациями амплитуды и фазы сигнала в ночной период времени и землетрясениями с магнитудами, превышающими 5,5. Было найдено, что наиболее часто отрицательные аномалии в сигнале, связанные с сейсмической активностью, наблюдаются в течение недели до землетрясения и в течение недели после события [10, 12, 17]. Появление аномалий фиксировалось в 20–25 % всех случаев. Однако для сильных землетрясений ( $M > 6,8$ ) вероятность появления аномалий возростала до 60–70 % [18].

Различные теоретические механизмы пре- и постсейсмического влияния на атмосферу и ионосферу были проанализированы в связи с наблюдаемыми эффектами. Наиболее вероятным фактором такого влияния является выход радиоактивного газа на земную поверхность, что приводит к изменениям температуры и плотности атмосферы и вариациям плотности и распределения заряженных частиц. Обычно предполагается, что из-за малой скорости вертикальной диффузии тяжелых газов и температурных вариаций изменения происходят в близповерхностном слое мощностью несколько сотен метров. В качестве возможных механизмов распространения влияния выше приповерхностного слоя рассматриваются: наведение (другой вариант – модификация существующего) электрического поля [5, 8, 16, 20], возбуждение внутренних гравитационных волн, распространяющихся вверх и возбуждающих ионосферную плазму перед землетрясением [6, 13, 19].

В настоящей работе представлены результаты анализа данных непрерывного мониторинга ОНЧ/НЧ-сигналов в Петропавловске-Камчатском в связи с двумя сильными землетрясениями в Индонезии.

Первое землетрясение произошло 19 августа 2018 г. Магнитуда составила 6,9 (USGS/NEIC). Подземные толчки были зафиксированы в районе о-ва Ломбок. Эпицентр находился в 70 км от г. Матарам (население 319 тыс. чел.). Очаг землетрясения залегал на глубине 10 км. За несколько часов до этого землетрясения в области его очага ему предшествовало другое, с магнитудой 6,3.

Второе землетрясение имело место 28 сентября 2018 г на о-ве Сулавеси, эпицентр его находился в 79 км от г. Палу (население 335 тыс. чел.), магнитуда составила 7,5, глубина гипоцентра – 10 км. После него на г. Палу обрушилось цунами высотой до нескольких

метров. Система оповещения не сработала. Из-за этого погибли люди, в том числе туристы на пляже, которые не знали об опасности высоких волн. Цунами привело к многочисленным жертвам и разрушениям в Палу. После землетрясения последовала серия афтершоков, максимальные магнитуды которых составили 5,9 и 6,0 (1 и 2 октября соответственно). Утром 3 октября на о-ве Сулавеси начал извергаться влк. Сопутан.

### Методика наблюдений и результаты анализа

Приемник ОНЧ/НЧ-сигналов был установлен в здании Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (г. Петропавловск-Камчатский) в июне 2000 г. в рамках российско-японского проекта МНТЦ 1121. Он измеряет одновременно амплитуду и фазу ОНЧ/НЧ-сигналов от 4 передатчиков: JJY (40 кГц) и JJI (22,2 кГц) в Японии, NWC (19,8 кГц) в Австралии и NPM (21,4 кГц) на Гавайских островах.

Приемник состоит из электрической штыревой антенны с предусилителем, GPS антенны и GPS часов, специальной видеокарты и программного обеспечения. Приемник может принимать ОНЧ/НЧ-сигналы в диапазоне до 50 кГц с модуляцией MSK или ICW и с разрешением по времени в пределах от 50 мс до 60 с.

Для наших целей использовались данные с временным интервалом 20 с.

Сигнал от каждого из передатчиков оценивался для землетрясений, эпицентры которых попадали в третью зону Френеля. Координаты ее проекции на поверхность Земли рассчитывались по формуле:  $y = 3 [\lambda^2/4 + \lambda x(1 - x/D)]^{1/2}$ , где  $\lambda$  – длина волны,  $x$  – координата вдоль трассы распространения сигнала,  $D$  – расстояние между приемником и передатчиком.

В связи с тем что в дневное время ионизация ионосферы высока и она менее чувствительна к слабым воздействиям любой природы, кроме рентгеновского излучения для анализа был выбран ночной интервал времени.

При исследовании поведения амплитуды и фазы ОНЧ/НЧ-сигналов принимались в рассмотрение следующие параметры: индексы активности магнитного поля  $K_p$  и  $Dst$  (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>); данные по рентгеновским и протонным вспышкам и потокам релятивистских электронов с геостационарного спутника GOES (<https://www.goes.noaa.gov/>), который находится над Тихим океаном на высоте, равной шести радиусам Земли; данные о землетрясениях из каталога USGS/NEIC (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/epic/>).

Для анализа индонезийских землетрясений была использована амплитуда сигнала от передатчика NWC в Австралии (19,8 кГц). На рис. 1 показано взаимное положение передатчика NWC и ОНЧ/НЧ-приемника в Петропавловске-Камчатском (РТК).

Данная трасса является очень длинной (около 10 000 км). К тому же она пересекает экватор и проходит через высокосейсмоактивные регионы Японии и Курильских островов. Сложность анализа состоит в том, что землетрясения с  $M \geq 5,5$  случаются в этом регионе довольно регулярно. Например, в течение сентября 2018 г. в зоне чувствительности трассы произошло три землетрясения с  $M \geq 5,5$  (включая индонезийское от 28 сентября). Перед каждым из них наблюдались ночные отрицательные аномалии в амплитуде сигнала, наиболее значительные и длительные – до и после землетрясения с  $M = 7,5$ , которое произошло 28 сентября в районе о-ва Сулавеси.

Поэтому для анализа параметров распространения сигнала в данном случае была использована другая характеристика – дисперсия сигнала (характеристика мощности сигнала), осредненная за ночной период (рис. 2). На графике явно видно увеличение дисперсии сигнала примерно за 2–3 дня перед каждым из индонезийских землетрясений. На остальных трассах такого эффекта не наблюдалось.

Следует отметить, что не было зафиксировано каких-либо значительных возмущений космической погоды во время наблюдаемых аномалий (рис. 3). Согласно данным

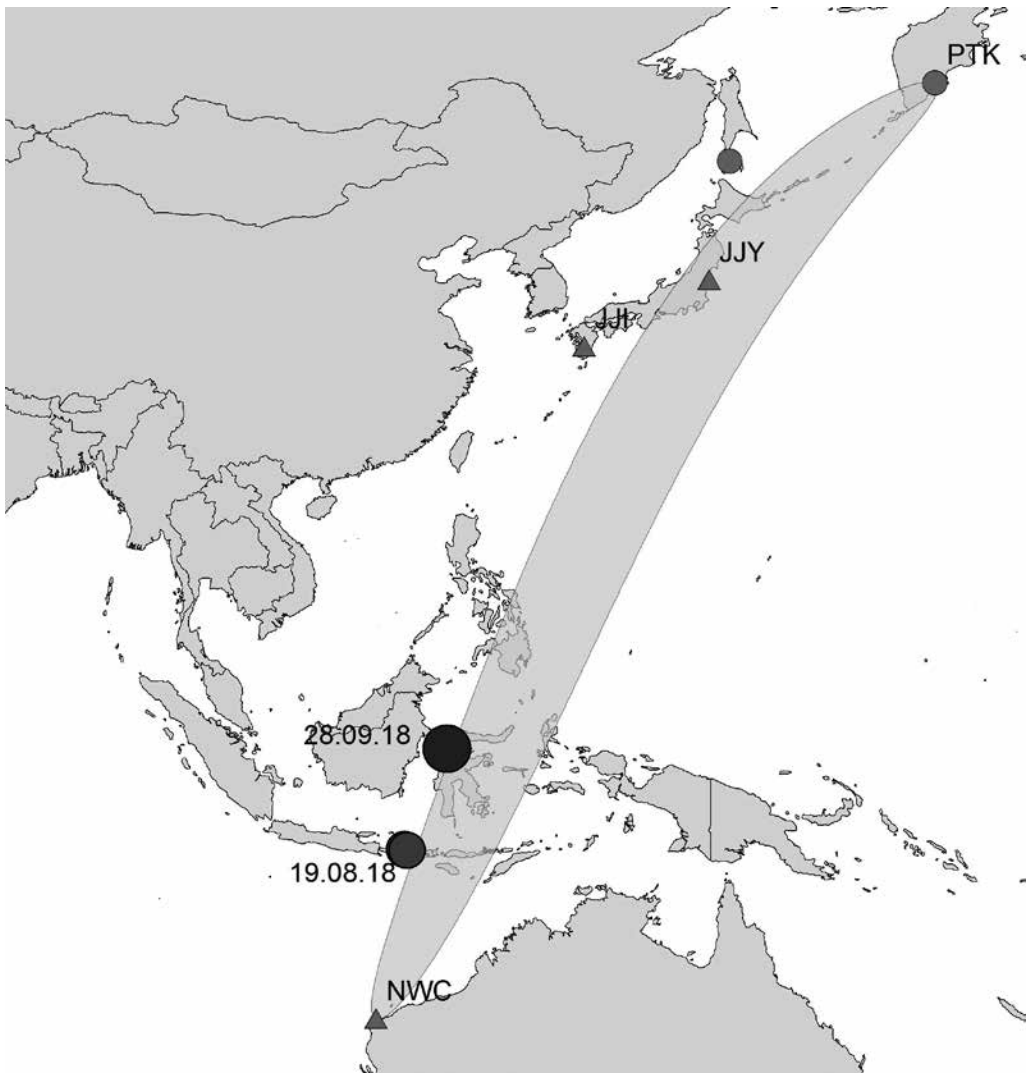


Рис. 1. Взаимное расположение передатчика NWC (19,8 кГц) и ОНЧ-приемника в Петропавловске-Камчатском (РТК). Эллипсом показана зона чувствительности трассы распространения сигнала от передатчика к приемнику. Два землетрясения в Индонезии показаны черными кружками с указанием даты

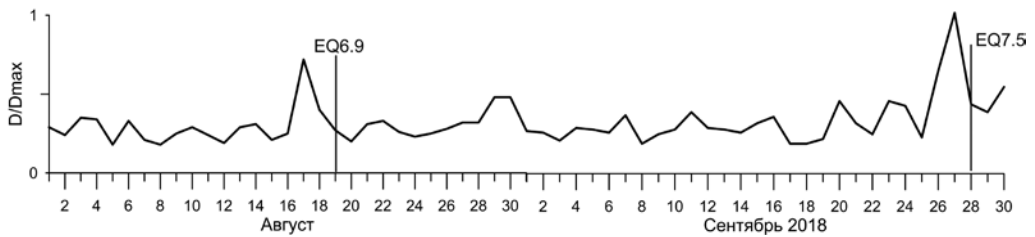


Рис. 2. Приведенная к максимальному значению дисперсия ночной амплитуды сигнала от передатчика NWC за август–сентябрь 2018 г.

Японского метеорологического агентства (JMA), в период аномалий никакие тропические циклоны или тайфуны не пересекали зоны чувствительности трассы ОНЧ-сигнала. Поэтому можно полагать, что выявленные аномалии связаны с процессами подготовки землетрясений.

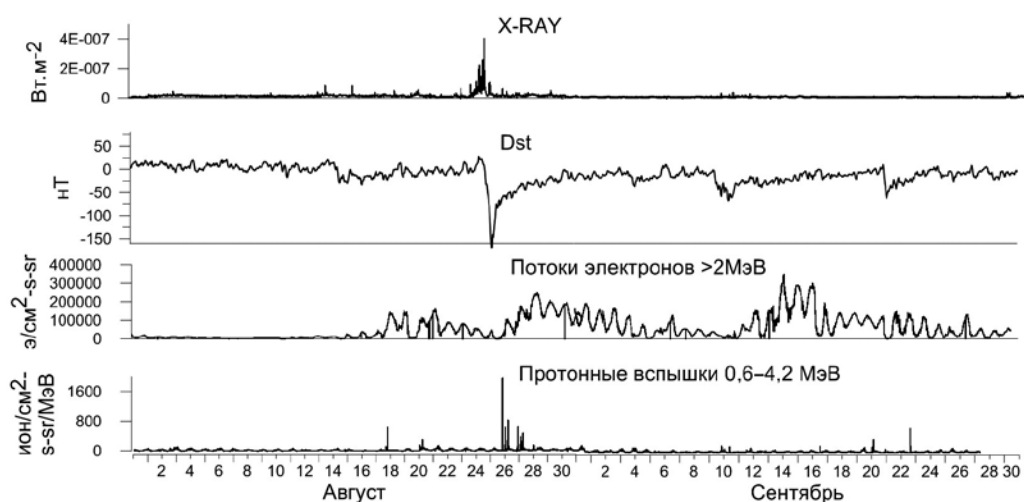


Рис. 3. Космическая погода по данным наблюдений на геостационарном спутнике GOES в августе и сентябре 2018 г.

### Заключение

Анализ очень низкочастотного электромагнитного сигнала в течение августа и сентября 2018 г. выявил аномалии, связанные с двумя сильными индонезийскими землетрясениями. Возмущения дисперсии ночной амплитуды ОНЧ-сигнала наблюдалось за 2–3 дня до каждого из землетрясений. Результат анализа подтверждается тем, что подобные эффекты не фиксировались на трех других трассах, которые проходят далеко от сейсмически активной области. Помимо этого, были приняты во внимание другие возможные причины, которые могут вызывать возмущения ионосферной плазмы: геомагнитная активность, рентгеновские и протонные вспышки, потоки релятивистских электронов, а также циркуляция ионосферы (циклоны и тайфуны).

Результаты проведенных исследований подтверждают перспективу использования ОНЧ/НЧ-метода для краткосрочного прогноза сильных землетрясений. Для локализации области, связанной с источником возмущения, необходимо использовать сеть ОНЧ/НЧ-станций со взаимно пересекающимися трассами. Такая мировая сеть была создана в последние годы благодаря инициативе А.А. Рожного, а также усилиями российских и зарубежных ученых. В настоящее время данная система наблюдений состоит из 11 приемных станций и перекрывает все высокосейсмоактивные области Северного полушария, включая Тихоокеанский и Средиземноморско-Азиатский сейсмические пояса. Первый результат с использованием данных мировой сети ОНЧ/НЧ-наблюдений был получен в связи с двумя сильными землетрясениями ( $M = 7,8$  и  $7,3$ ), которые произошли в Непале в 2015 г. Две пересекающиеся трассы, проходящие над эпицентрами землетрясений, показали аномальное поведение сигналов в течение нескольких дней перед землетрясениями [3].

### ЛИТЕРАТУРА

1. Гохберг М.Б., Гуфельд И.Л., Маренко В.Ф., Пономарев Е.А., Рожной А.А., Ямпольский В.С. Исследование возмущений естественных и искусственных электромагнитных полей источниками сейсмического происхождения // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1987. № 2. С. 17–24.
2. Гуфельд И.Л., Рожной А.А., Тюменцев С.Н., Шерстюк С.В., Ямпольский В.С. Возмущения радиоволновых полей перед Рудбарским и Рачинским землетрясениями // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1992. № 3. С.102–106.

3. Соловьева М.С., Рожной А.А., Рыбин А.К. Использование сети ОНЧ станций для анализа состояния нижней ионосферы в период сильной сейсмической активности в Непале в 2015 г. // Геофизические исследования. 2019. Т. 20, № 1 (в печати).
4. Barr R., Llanwyn Jones D., Rodger C.J. ELF and VLF radio waves // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2000. Vol. 62. P. 1689–1718.
5. Denisenko V.V., Ampferer M., Pomozov E.V., Kitaev A.V., Hausleitner W., Stangl G., Biernat H.K. On electric field penetration from ground into the ionosphere // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2013. Vol. 102. P. 341–353. DOI: 10.1016/j.jastp.2013.05.019.
6. Erokhin N.S., Mikhailovskaya L.A., Shalimov S.L. Conditions of the propagation of internal gravity waves through wind structures from the troposphere to the ionosphere // *Izvestiya. Atmos. and Oceanic Physics.* 2013. Vol. 49, iss. 7. P. 732–744. DOI: 10.1134/S0001433813070025.
7. Gokhberg M.B., Gufeld I.L., Rozhnoi A.A., Marenko V.F., Yampolsky V.S., Ponomarev E.A. Study of seismic influence on the ionosphere by super long wave probing of the Earth-ionosphere wave guide // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1989. Vol. 57. P. 64–67.
8. Harrison R.G., Aplin K.L., Rycroft M.J. Brief Communication: Earthquake–cloud coupling through the global atmospheric electric circuit // *Nat. Haz. Earth Sys. Sci.* 2014. Vol. 14, iss. 4. P. 773–777. DOI: 10.5194/nhess-14-773-2014.
9. Hayakawa M. *Earthquake prediction with radio techniques.* Singapore: Wiley, 2015. 294 p.
10. Hayakawa M., Kasahara Y., Nakamura T., Hobara Y., Rozhnoi A., Solovieva M., Molchanov O.A. On the correlation between ionospheric perturbations as detected by subionospheric VLF/LF signals and earthquakes as characterized by seismic intensity // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2010. Vol. 72. P. 982–987.
11. Hayakawa M., Molchanov O.A., Ondoh T., Kawai E. Precursory signature of the Kobe earthquake on VLF subionospheric signal // *Proc. IEEE Intern. Symp. Electromagnetic Compatibility.* Austin, USA, 1996. P. 247–257. DOI: 10.1109/ELMAGC.1997.617080.
12. Maekawa S., Horie T., Yamauchi T., Sawaya T., Ishikawa M., Hayakawa M., Sasaki H. A statistical study on the effect of earthquakes on the ionosphere, based on the subionospheric LF propagation data in Japan // *Ann. Geophysicae.* 2006. Vol. 24. P. 2219–2225.
13. Molchanov O.A., Hayakawa M. *Seismo-electromagnetics and related phenomena: History and latest results.* Tokyo: TERRAPUB, 2008. 189 p.
14. Molchanov O.A., Hayakawa M. Subionospheric VLF signal perturbations possibly related to earthquakes // *J. G. R.* 1998. Vol. 103 (A8). P. 17489–17504.
15. Pulinets S., Boyarchuk K. *Ionospheric precursors of earthquakes.* Berlin; Heidelberg: Springer-Verl., 2005. 316 p.
16. Pulinets S., Ouzounov D. Lithosphere–Atmosphere–Ionosphere Coupling (LAIC) model – An unified concept for earthquake precursors validation // *J. Asian Earth Sci.* 2011. Vol. 41. P. 371–382. DOI: 10.1016/j.jseaes.2010.03.005.
17. Rozhnoi A., Solovieva M.S., Molchanov O.A., Hayakawa M. Middle latitude LF (40 kHz) phase variations associated with earthquakes for quiet and disturbed geomagnetic conditions // *Phys. Chem. Earth.* 2004. Vol. 29. P. 589–598.
18. Rozhnoi A., Solovieva M., Hayakawa M. VLF/LF signals method for searching of electromagnetic earthquake precursors // *Earthquake prediction studies: seismo electromagnetics.* Tokyo: TERRAPUB, 2013. P. 31–48.
19. Shalimov S., Ogawa T., Otsuka Y. On the gravity wave-driven instability of E layer at mid-latitude // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2009. Vol. 71, iss. 17/18. P. 1943–1947. DOI: 10.1016/j.jastp.2009.08.004.
20. Sorokin V., Hayakawa M. Generation of seismic-related dc electric fields and lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling // *Mod. Appl. Sci.* 2013. Vol. 7, N 6. P. 1–25. DOI: 10.5539/mas.v7n6p1.
21. Wait J.R., Spices K.P. *Characteristics of the Earth ionosphere waveguide for VLF radio waves.* Washington D.C.: U.S. Govt. Print. Off., 1964. 93 p. (NBS Tech. Note N 300).