

УДК 550.3811+550.343

О ПРОГНОЗИРОВАНИИ КАМЧАТСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПО ДАННЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Щекотов А.Ю.¹, Копылова Г.Н.², Будилова Е.А.², Серафимова Ю.К.²

¹ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, oldresident@yandex.ru

² Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский, geofizik@emsd.ru

Введение

Электромагнитные явления, возникающие накануне землетрясений [4–6], могут использоваться для их прогнозирования. Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (КФ ФИЦ ЕГС РАН) совместно с Институтом физики Земли РАН, г. Москва с 2000 г. проводит геомагнитные наблюдения на территории комплексной геофизической обсерватории (КГО) «Карымшина» (52.827° с.ш., 158.132° в.д.) с использованием трехкомпонентного индукционного магнитометра. Магнитометр оборудован тремя датчиками для регистрации горизонтальных компонент магнитного поля Н и D, ориентированных вдоль магнитного меридиана и перпендикулярно к нему, и вертикальной компоненты Z. На основе регистрируемых данных выполняются оценки величин магнитуды, положения эпицентра и времени ожидаемых землетрясений.

Основу сейсмопрогностического метода составляют эмпирически установленные свойства электромагнитных явлений, возникающих в процессе подготовки землетрясений:

- 1) УНЧ ионосферной депрессии [3, 7, 8];
- 2) УНЧ-КНЧ излучения [9].

Описание методики

Методика прогнозирования землетрясений основана на зависимости свойств электромагнитных полей от параметра «ожидаемой локальной сейсмичности». УНЧ депрессия статистически связана с магнитудой предстоящего события, а источник КНЧ-УНЧ излучения – с положением эпицентра. Даты максимумов наблюдаемой депрессии и ΔS статистически связаны с временным интервалом до предстоящего землетрясения.

Локальная сейсмичность характеризуется индексом K_{LS} [8], величина которого пропорциональна энергии землетрясения и обратно пропорциональна эпицентральному расстоянию:

$$K_{LS} = \frac{10^{0.75M_L}}{10^{(R+100)}} \quad (1)$$

где M_L – локальная магнитуда, R – эпицентральное расстояние, км.

Суточная депрессия определяется, как максимальное значение часовых депрессий за сутки. Часовая депрессия равна максимальному значению обратной величины векторного произведения частотного вектора и спектральной плотности регистрируемого сигнала, усредненной за час. Для горизонтальных компонент поля она выражается как:

$$Dep_H = \max \left(\frac{1}{f \langle P_{hh} \rangle_t} \right)_f \quad (2)$$

$$Dep_D = \max \left(\frac{1}{f \langle P_{dd} \rangle_t} \right)_f \quad (3)$$

где P_{hh} и P_{dd} – спектральные плотности сигнала на Н и D компонентах, f – вектор частот спектральных компонент.

Для расчета величины депрессии, суточный файл разделяется на 47 часовых интервалов с 30-ти минутным перекрытием. Для каждого такого интервала рассчитываются спектральные плотности. При этом спектры предварительно выстраиваются путем умножения спектральных компонент на их центральные частоты. Затем вычисляются часовые депрессии в соответствии с (2) и (3). Максимум значений часовых депрессий является суточной депрессией.

Важным свойством K_{LS} является его связь с характеристиками УНЧ магнитного поля перед землетрясением. Это дает возможность оценивать магнитуду будущего землетрясения. Выражение для определения локальной магнитуды M_L^{pr} будущего землетрясения, оцениваемой с учетом характеристик УНЧ и КНЧ/УНЧ, вычисляется по (1) с использованием величин K_{LS}^r и R^r (определяются через характеристики излучений), подставляя их в (1), вместо величины K_{LS} и R :

$M_L^{pr} = (\log_{10}(K_{LS}^r) + 1 + (\log_{10}(100 + R^r))/0.75$, где K_{LS}^r и R^r – векторы (см. рис. 1, 2): $K_{LS}^r = [K_{LSmin}^r K_{LSmean}^r K_{LSmax}^r]$, $R^r = [R_{max}^r R_{mean}^r R_{min}^r]$.

При оценке R^r используется обратный порядок распределения расстояний, полагая, что минимальные и максимальные K_{LS}^r соответствуют максимальным и минимальным расстояниям от обсерватории до источника излучения.

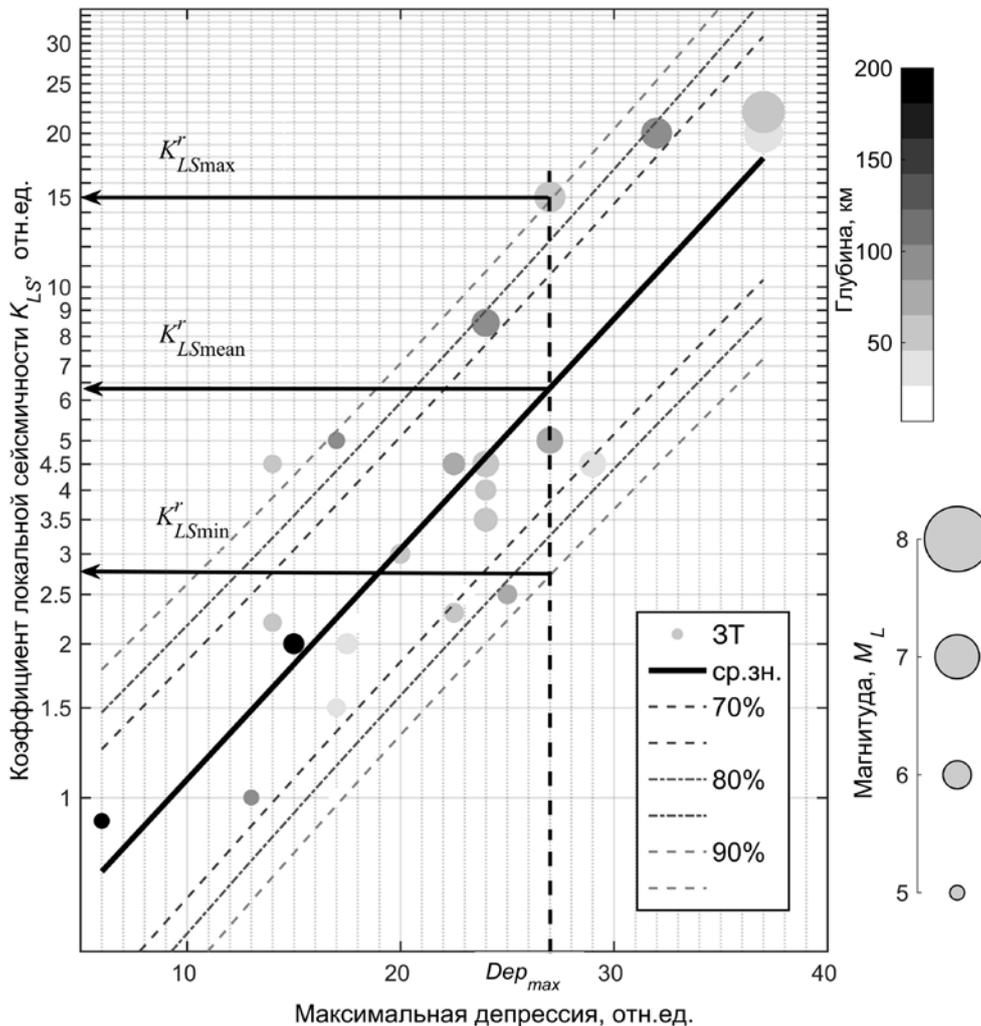


Рис. 1. Статистическая зависимость между логарифмом коэффициента локальной сейсмичности ожидаемого землетрясения от максимальной величины предшествующей депрессии: ЗТ – землетрясение

Для обнаружения УНЧ-КНЧ излучения используются комбинированные характеристики поля для ортогональных направлений:

$$\Delta S_{EW} = \frac{\left(\frac{P_{hh}}{P_{dd}} - 1\right)}{\text{rms}(\tan \beta)} \quad (4)$$

$$\Delta S_{NS} = \frac{\frac{P_{dd}}{P_{hh}}}{\text{rms}(\tan \beta)} \quad (5)$$

где P_{hh} , P_{dd} – спектральные плотности горизонтальных компонент поля. В знаменателе – среднеквадратическое (rms) значение эллиптичности поля $\tan \beta$, равной отношению малой и большой осей эллипса поляризации [9]. Здесь β – характеристика сигнала, чувствительная к типу поляризации, которая вычисляется следующим образом:

$$\beta = \frac{1}{2} \arcsin \left\{ \frac{\text{Im}(P_{dh} - P_{hd})}{[(P_{hh} - P_{dd})^2 + 4 \times P_{hh} \times P_{dd}]^{1/2}} \right\} \quad (6)$$

где P_{dh} и P_{hd} – кросс-спектры горизонтальных компонент, а Im обозначает мнимую часть. Тип поляризации определяется знаком β : при $\beta > 0$, поляризация правая, при $\beta < 0$ – левая поляризация, $\beta = 0$ для линейной поляризации [2].

Предполагается, что излучение вызывается эмиссией газов (радона) из района очага будущего землетрясения. Имеющиеся данные глубинных геохимических исследований дают основание полагать, что газовая эмиссия происходит в областях глубоководных желобов и в атмосфере над ними. Расположение источника излучения определяется пересечением главных лепестков азимутального распределения УНЧ-КНЧ излучения с Курило-Камчатским и/или Алеутским желобами (рис. 2).

Азимут α источника излучения определяется как угол между направлением на север и перпендикуляром к главной оси эллипса поляризации: $\alpha = 180 - \theta$, где θ – угол между направлением D-компоненты поля и главной осью эллипса поляризации, который вычисляется следующим образом:

$$\tan(2\theta) = \frac{2A_d A_h}{A_d^2 - A_h^2} \cos(\phi_h - \phi_d) \quad (7)$$

где A_h, A_d – мгновенные амплитуды, ϕ_h, ϕ_d – фазы компонент поля в полосе частот 2-6 Гц.

Плотность потока импульсов N определяется, как количество импульсов за час, амплитуды которых превышают пороговое значение не менее чем в одном отсчете. Пороговое значение выбирается таким, чтобы оно было в 2–3 раза больше стандартного отклонения сигнала в самый спокойный день на предшествующем интервале наблюдений.

На рис. 3 показано соотношение времен от момента регистрации предвестника до землетрясений с учетом величины их локальной магнитуды за период наблюдений с 23 декабря 2014 по 11 мая 2017 гг.

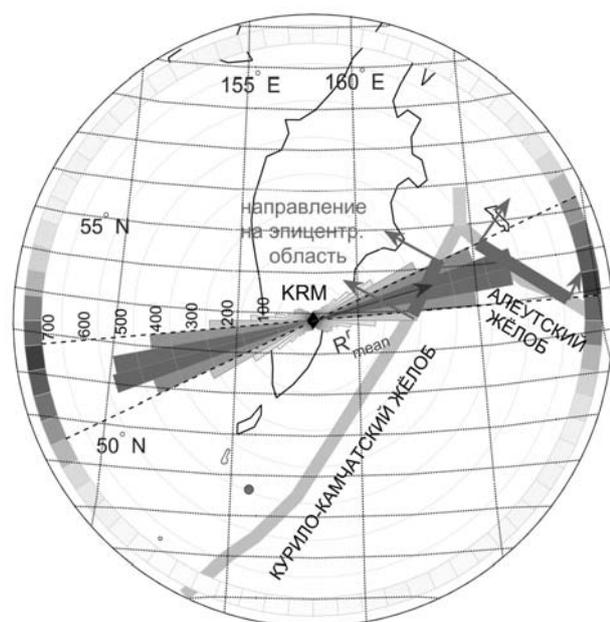


Рис. 2. Процедура оценки положения эпицентра

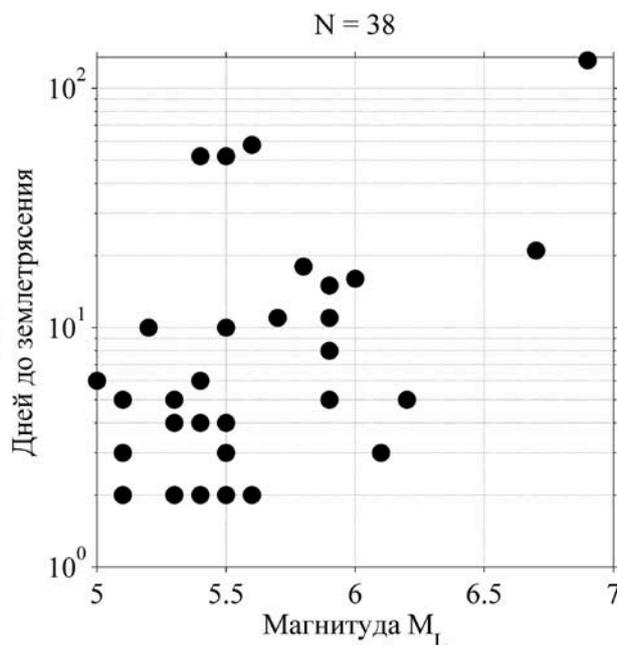


Рис. 3. Оценка времени событий

Оценка сейсмопрогностической эффективности методики

С целью оценки эффективности методики проведен анализ прогнозных заключений по наблюдениям УНЧ/СНЧ вариаций магнитного поля, которые регулярно подавались в советы по прогнозу землетрясений. За период с 01 апреля 2015 по 01 мая 2017 гг. по изложенной выше методике А.Ю. Щекотовым было сделано 41 прогнозов землетрясений с магнитудами $M_L = 4.6-6.9$ в диапазоне широт $48.0^\circ-56.5^\circ$ с.ш. В прогнозах значения пространственно-энергетических параметров землетрясений были различными, поэтому для расчета эффективности J использовать формула [1]:

$$J = \frac{N_+}{\sum_i^I N(i) \cdot \frac{T_{alarm}(i)}{T}} \quad (8)$$

где i – один из I различных вариантов «пространственно-энергетической» формулировки прогноза. Соответственно, все величины с индексом i относятся именно к этому варианту. В таком случае выражение под знаком суммы дает среднее число случайных успешных реализаций прогноза с соответствующими параметрами, а их суммирование по i дает суммарное число случайных угадываний. N_+ – количество произошедших землетрясений, соответствующих успешному прогнозу; N – общее количество произошедших землетрясений с параметрами (местоположение – энергия), соответствующими прогнозу, т. е. землетрясения, которые произошли и могли бы предсказываться; T_{alarm} – общее время тревоги, равное суммарной длительности всех прогнозов в сутках; T – общее время наблюдений, сут.

Для рассматриваемого периода времени были составлены два каталога землетрясений с использованием данных Регионального каталога Камчатки КФ ФИЦ ЕГС РАН: каталог «А» для всего времени наблюдений и каталог «Б» для времени исправной работы магнитометра.

Каталог «А» – $K_S \min = 11.0$, широты 48.0° – 56.5° с.ш., долготы 151.4° – 169.0° в.д., содержит 154 землетрясения, $t_{набл} = 761$ сут.

Каталог «Б» – $K_S \min = 11.0$, широты 48.0° – 56.5° с.ш., долготы 151.4° – 169.0° в.д., исключены периоды неисправной работы магнитометра – 21.12.2015–27.02.2016 и 16.06.2016–03.09.2016, содержит 124 землетрясения, $t'_{набл} = 619$ сут.

41 различных вариантов пространственно-энергетической формулировки прогноза рассматривались в трех вариантах: «мягком» и «жестком» для каталога «А» и в «мягком» варианте для каталога «Б». В случае «жесткого» варианта, пространственно-энергетические параметры и время тревоги T_{alarm} определялись формулировкой прогноза с учетом правил округления до целого (например, если в прогнозе широтный диапазон указывался как 52 – 54° с.ш., то рассматривался диапазон широт 51.6 – 54.4° с.ш., таким же образом оценивался диапазон прогнозируемых магнитуд).

В случае «мягкого» варианта, прогнозируемый диапазон энергии ожидаемого события, его пространственные параметры и время тревоги T_{alarm} изменялись в соответствии с параметрами произошедшего события, примерно соответствующего прогнозу. В случае отсутствия события, прогнозируемые пространственно-энергетические параметры варьируются таким образом, чтобы i -тое слагаемое под знаком суммы было минимальным.

Значения эффективности J рассчитаны в трех вариантах: $J_{ж} = 1.38$ (каталог «А», «жесткий» вариант для всего периода наблюдений $t_{набл} = 761$ сут), $J_{м} = 2.12$ (каталог «А», «мягкий» вариант для всего периода наблюдений $t_{набл} = 761$ сутки) и $J_{м} = 2.24$ (каталог «Б», «мягкий» вариант для времени исправной работы магнитометра $t'_{набл} = 619$ сут).

Также, были выполнены оценки J для событий с $M > 5$ и $M > 5.9$, результаты которых приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты оценки эффективности прогноза для событий с различной магнитудой.

Магнитуда	Общее кол-во землетрясений	Кол-во спрогнозированных землетрясений	Общее время наблюдений, суток	Время тревоги, суток	Эффективность J
>5	69	43	619	462	0.84
>5.9	8	5	619	148	2.6

Результаты применения методики

В качестве примера рассмотрим два события, информация о которых представлена в таблице 2.

Предвестники этих событий проявлялся в максимуме депрессии (24 и 29 ноября) и в ΔS (20 и 30 ноября) (рис. 4). На основе этих признаков 13 декабря 2018 г. было сделано заключение о возможности события с $M_L = 6.1 \pm 0.5$ в Камчатской сейсмофокальной зоне в диапазоне широтах $49.5^\circ \pm 1.5^\circ$. Предвестники появились с интервалом в несколько дней, как и сами события.

Таблица 2. Параметры землетрясений, произошедших 7 и 9 мая 2019 г. (<http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php>)

Дата	Широта	Долгота	K_S	M_L
2019-05-07	49.33	156.79	13.0	5.8
2019-05-09	49.39	156.38	13.3	5.9

На верхней прямоугольной панели рис. 4 показана индексом K_{LS} эволюция локальной сейсмичности для землетрясений с магнитудой $M_L > 5$. На следующих двух прямоугольных панелях показана эволюция максимальных суточных значений депрессии в полосе частот 0.01–0.05 Гц в Н-компоненте и D-компоненте соответственно. На 4-й и 5-й панелях – максимальные (суточные и трехчасовые) значения ΔS в полосе частот 2–30 Гц также для двух компонент поля. Два ряда круглых нижних панелей справа внизу показывают азимутальные распределения источников сигнала в полосе частот 2–6 Гц и эпицентры всех зарегистрированных в этот день землетрясений с $K_S > 8.5$ в интервале -7 – -1 сут. На большой круглой панели аналогичным образом продемонстрировано азимутальное распределение для последнего отображаемого дня. По краю круглых панелей расположено кольцо, на котором интенсивностью цвета отражены моды азимутальных распределений за последние 7 суток. Более темные участки соответствуют направлениям наиболее интенсивного излучения. Как следует из опыта наблюдений, эпицентры землетрясений обычно смещены относительно положения источника излучения, при этом амплитуда смещения зависит от глубины очага. Зеленым цветом показано расположение источника излучения. В заголовке большой круглой панели указывается максимальная локальная магнитуда землетрясения, зарегистрированная в этот день. Справа от нее расположены две панели, показывающие соответствие магнитуды и размера кружка (нижня), а также цвет кружка в зависимости от глубины гипоцентра (верхняя).

Увеличение задержки по времени более мощного события не противоречит наблюдаемой тенденции (см. рис. 2).

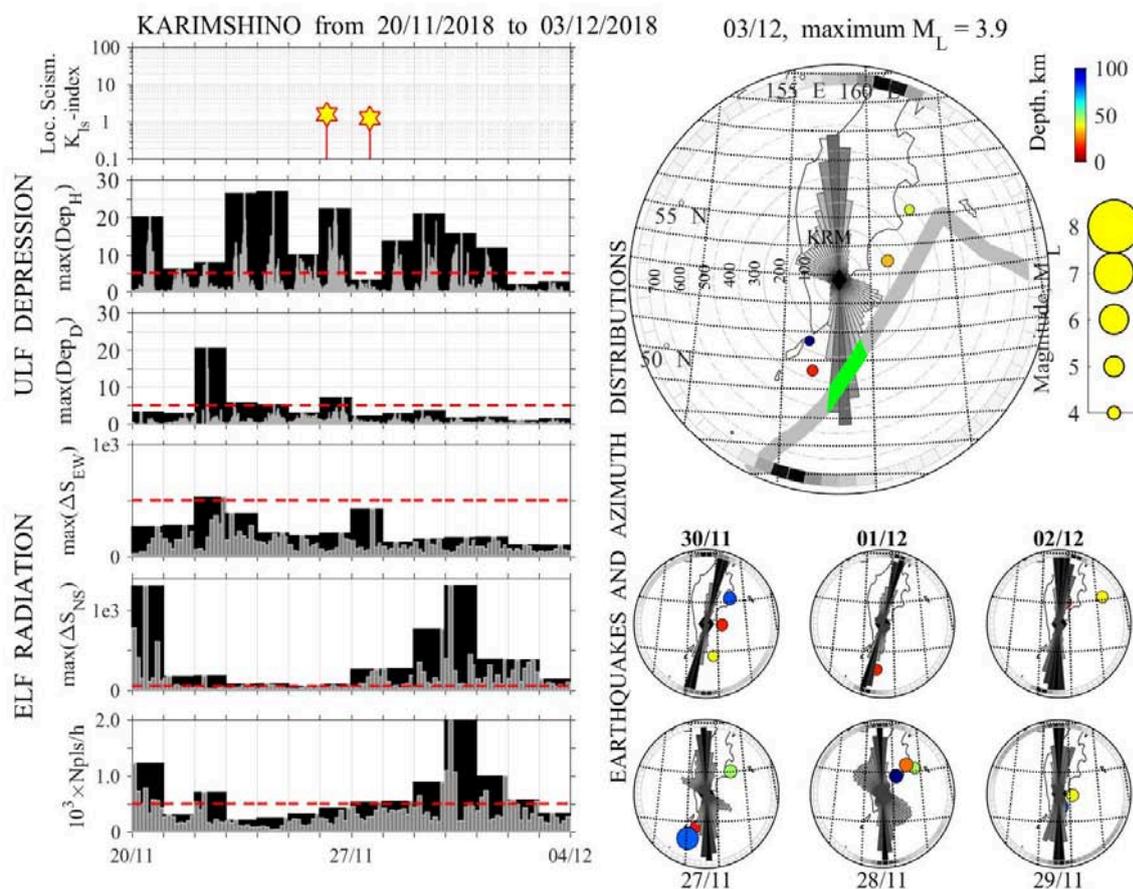


Рис. 4. Эволюция локальной сейсмичности и характеристик магнитного поля, зарегистрированных на КГО «Карымшина» с 20.11 по 03.12.2018 г.

Заключение

Развитие представленного сейсмопрогностического метода связано с более точным определением положения эпицентра будущего землетрясения. Для этого необходимо увеличить количество пунктов наблюдений, которые должны располагаться в местах, не подверженных воздействию внешних помех. В настоящее время (июль–август 2019 г.) в геомагнитных данных, получаемых на КГО «Карымшина», присутствуют помехи, которые, по-видимому, вызваны усилением

техногенного воздействия в районе наблюдений. Это усложняет процесс прогнозирования землетрясений, делая его временами невозможным. Кроме этого, повышению точности прогноза будет способствовать повышение качества регистрации данных за счет применения современного оборудования.

Благодарность

Авторы выражают благодарность В.А. Кобзеву за техническое обслуживание магнитометра.

Список литературы

1. Чебров В.Н., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К. Прогнозирование землетрясений на Камчатке. По материалам работы Камчатского филиала Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска в 1998–2009 гг. М.: Светоч Плюс, 2011. 304 с.
2. Fowler R.A., Kotick B.J., Elliot R.D. Polarization analysis of natural and artificially induced geomagnetic micropulsations // J. Geophys. Res. 1967. No. 72. P. 2871–2875.
3. Fraser-Smith A.C. et al. Low-frequency magnetic field measurements near the epicenter of the Ms = 7.1 Loma Prieta earthquake // Geophys. Res. Lett. 1990. No. 17. P. 1465–1468.
4. Hayakawa M. Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes // Transworld Research Network. Trivandrum (India). 2008. P. 279.
5. Hayakawa M. The Frontier of Earthquake Prediction Studies // Nihonsenmontosho-Shuppan. 2012. Tokyo. P. 794.
6. Hayakawa M. Earthquake Prediction Studies: Seismo Electromagnetic // TERRAPUB. Tokyo. 2013. P. 168.
7. Molchanov O.A. et al. Preseismic ULF electromagnetic effect from observation at Kamchatka // Nat. Hazards. Earth Syst. Sci. 2003. No. 3. P. 1–7.
8. Schekotov A. et al. Seismo-ionospheric depression of the ULF geomagnetic fluctuations at Kamchatka and Japan // Physics and Chemistry of the Earth. 2006. No. 31. P. 313–318.
9. Schekotov A. et al. ULF/ELF magnetic field variations from atmosphere induced by seismicity // Radio Science. 2007. No. 42. doi:10.1029/2005RS003441.