УДК 534.23:537.87:550.34

Научная статья

Аномалии перед камчатскими землетрясениями ($M_L \geq 4.75$) в сигналах электромагнитного излучения и геоакустической эмиссии в 2013 году

О. О. Луковенкова, Е. И. Малкин, М. А. Мищенко, А. А. Солодчук

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

E-mail: micle@ikir.ru

В работе рассматриваются предсейсмические аномалии сигналов электромагнитного излучения в диапазоне очень низких частот (ОНЧ) и геоакустической эмиссии, зарегистрированных на Камчатке в 2013 году. Выявлены признаки возникновения аномальных возмущений в исследуемых сигналах и особенности их проявления. Проведен совместный анализ предсейсмических аномалий в сигналах электромагнитного ОНЧ-излучения и геоакустической эмиссии методом наложения эпох. Представлены оценки вероятности возникновения таких аномалий в рассматриваемых геофизических сигналах.

Ключевые слова: электромагнитное излучение, геоакустическая эмиссия, предсейсмическая аномалия, метод наложения эпох

DOI: 10.26117/2079-6641-2021-34-1-137-149

Поступила в редакцию: 17.12.2020

В окончательном варианте: 05.03.2021

Для цитирования. Луковенкова О.О., Малкин Е.И., Мищенко М.А., Солодчук А.А. Аномалии перед камчатскими землетрясениями ($M_L \geq 4.75$) в сигналах электромагнитного излучения и геоакустической эмиссии в 2013 году // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки.* 2021. Т. 34. № 1. С. 137-149. DOI: 10.26117/2079-6641-2021-34-1-137-149

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

© Луковенкова О.О. и др., 2021

Введение

Результаты ранее проведенных исследований [1, 2, 3, 4] показывают, что перед сильными землетрясениями на полуострове Камчатка наблюдаются аномалии электромагнитного ОНЧ-излучения (ЭИ) и геоакустической эмиссии (ГАЭ). В указанных выше работах аномалии в электромагнитных и геоакустических сигналах рассматривались независимо друг от друга. Авторы настоящей работы полагают, что предсейсмические аномалии электромагнитного ОНЧ-излучения и геоакустической эмиссии могут быть связаны между собой. Данная работа посвящена исследованию предсейсмических аномалий сигналов ЭИ и ГАЭ и проверке гипотезы об их связи.

Финансирование. Исследование выполнялось без финансовой поддержки фондов.

Признаки аномалий

Под аномалией будем понимать существенное изменение параметров принимаемого сигнала. В исследуемых геофизических сигналах аномалии проявляются по-разному.

Аномалии в электромагнитных сигналах. Источником естественного электромагнитного излучения атмосферно-грозового происхождения являются молниевые разряды. Электромагнитный импульс, генерируемый молниевым разрядом (далее атмосферик), представляет собой периодическое колебание с крутым передним фронтом. Для оценки плотности потока электромагнитной энергии атмосферика вычисляется вектор Умова-Пойнтинга $\mathbf{S}$, который равен векторному произведению

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} = i(E_y H_z - E_z H_y) + j(E_z H_x - E_x H_z) + k(E_x H_y - E_y H_x),$$

где $\mathbf{E}$ и $\mathbf{H}$ — векторы напряжённости электрического и магнитного полей соответственно; $E_x, E_y, E_z, H_x, H_y, H_z$ — проекции векторов $\mathbf{E}$ и $\mathbf{H}$ на координатные оси.

Расчет $\mathbf{S}$ выполняется для фрагментов сигнала длительностью 0.01–0.1 с, содержащих атмосферик. По полученным значениям $\mathbf{S}$ составляется временной ряд из среднесекундных значений модуля вектора Умова-Пойнтинга $I(t)$.

При распространении атмосфериков в волноводе Земля — Ионосфера наблюдается их затухание. Наиболее сильное затухание возникает при отражении атмосфериков от дневного D -слоя ионосферы. Таким образом, появление D -слоя приводит к появлению суточных периодических колебаний во временном ряде $I(t)$.

Рис. 1. Пример ряда среднесекундных значений модуля вектора Умова-Пойнтинга $I(t)$

На рис. 1 изображен пример ряда $I(t)$, вычисленного для электромагнитного сигнала, зарегистрированного в условиях хорошей погоды. Серыми точками обозначены рассчитанные значения $I(t)$, а черной линией — ряд $\bar{I}(t)$, полученный наложением суточных интервалов за год и нормированием на количество суток.

Результаты анализа $I(t)$ показывают, что иногда в ряде возникают нарушения нормальной суточной периодичности. Первым типом аномалий электромагнитного

сигнала являются сигналы с резким изменением периода суточного хода $I(t)$, данные аномалии обозначаются *EDD* (рис. 2а).

Вторым типом аномалий являются сигналы с нестандартными значениями дисперсии $I(t)$ относительно $\bar{I}(t)$. Аномалии этого типа — сигналы со значением дисперсии $I(t)$ более 0.8, обозначаются *EDS* (рис. 2б).

Рис. 2. Примеры аномалий электромагнитного сигнала: а — аномалия типа *EDD*, б — аномалия типа *EDS*

Для выявления аномалий в сигналах электромагнитного излучения выделены следующие признаки: 1) нестандартная величина периода суточного хода ряда среднесекундных значений модуля вектора Умова-Пойнтинга $I(t)$ (у обычных сигналов равна 1440 мин); 2) превышение значения дисперсии $I(t)$ (значение дисперсии более 0.8).

Аномалии в геоакустических сигналах. Сигналы геоакустической эмиссии складываются из последовательности релаксационных импульсов различной амплитуды и длительности, с крутым передним фронтом и частотой заполнения от единиц до десятков килогерц [5]. Результаты анализа геоакустических сигналов показывают, что в фоновый период наблюдаются незначительные по амплитуде геоакустические импульсы с частотой следования до единиц импульсов в секунду (рис. 3).

Рис. 3. Пример сигнала ГАЭ, зарегистрированного в сейсмически спокойный период: а — шум, б — импульс

В период подготовки землетрясения во время роста напряжений и скорости деформирования пород наблюдается увеличение как амплитуды импульсов, так и их количества в единицу времени, при этом частота следования импульсов достигает десятков и даже сотен в секунду (рис. 4).

Рис. 4. Пример серии импульсов сигнала ГАЭ, зарегистрированного в период подготовки землетрясения

Аномальные возмущения присутствуют и в обработанных накопленных сигналах ГАЭ. Обработка сигналов ГАЭ включает цифровую фильтрацию в семи частотных поддиапазонах: 0.1–10 Гц, 30–60 Гц, 70–200 Гц, 200–600 Гц, 600–2000 Гц, 2000–6500 Гц и более 6500 Гц, детектирование, интегрирование и синхронную запись отсчетов с частотой 1 Гц.

В периоды подготовки землетрясений аномалии в накопленных сигналах ГАЭ проявляются либо в виде характерного увеличения среднего уровня сигнала в

несколько раз (обозначаются *AS*, рис. 5), либо в виде групп квазипериодически появляющихся импульсов небольшой длительности (обозначаются *AI*, рис. 6).

Рис. 5. Пример обработанного накопленного сигнала ГАЗ. На графиках а, б, в, г, д, е, ж — акустическое давление P_a , накопленное в частотных поддиапазонах: 0.1–10 Гц, 30–60 Гц, 70–200 Гц, 200–600 Гц, 600–2000 Гц, 2000–6500 Гц, больше 6500 Гц соответственно. Прямоугольником выделены предсейсмические аномалии сплошного типа *AS* (графики д, е, ж)

С учетом вышесказанного, были определены следующие признаки аномалий в геоакустических сигналах: 1) по амплитуде — амплитуда накопленного сигнала более чем в четыре раза превышает фоновые значения; 2) по длительности — аномалия длится более 15 минут; 3) по типу — аномалия в накопленном сигнале ГАЗ имеет сплошной (*AS*) или импульсный характер (*AI*).

Рис. 6. Пример обработанного накопленного сигнала ГАЭ. На графиках а, б, в, г, д, е, ж — акустическое давление P_a , накопленное в частотных поддиапазонах: 0.1–10 Гц, 30–60 Гц, 70–200 Гц, 200–600 Гц, 600–2000 Гц, 2000–6500 Гц, больше 6500 Гц соответственно. Прямоугольником выделены предсейсмические аномалии импульсного типа AI (графики е и ж). Стрелкой указано время регистрации серии импульсов, изображенной на рис. 4

Совместный анализ предсейсмических аномалий ЭИ и ГАЭ

Анализ проводился на основе данных наблюдений за 2013 год. Была сформирована выборка аномалий электромагнитных и геоакустических сигналов, зарегистрированных в этот период (всего 794 аномалии: 158 аномалий геоакустических сигналов, зарегистрированных в пункте наблюдений “Мижижа”,

и 636 аномалий электромагнитных сигналов, зарегистрированный в пункте наблюдений “Карымшина”). Для каждой аномалии приводились ее тип (*EDD*, *EDS*, *AI*, *AS*), время начала и длительность (с точностью до минут). За период года наблюдений на основе данных об аномалиях были сформированы два формализованных по времени ряда с разрешением 1 мин (далее ряды аномалий). Каждому элементу этих рядов присваивалось значение 1 (наличие аномалии) или 0 (отсутствие аномалии). Пример построения ряда аномалий приведен на рис. 7.

Рис. 7. Пример построения ряда аномалий: а — выборка, б — формализованный ряд аномалий

В исследовании использовались данные о землетрясениях из регионального сейсмического каталога (Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, Каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов (1962 г. – наст. вр.), <http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php>). Выбирались землетрясения с локальной магнитудой M_L не менее 4.75 (всего 200 землетрясений). Землетрясения были разделены на четыре группы: Q_1 , Q_2 , Q_3 , Q_4 . В группу Q_1 были включены землетрясения, для которых выполнялось условие $R_Q/R_D \leq 1$, где $R_D = 10^{0.43 \cdot M_L}$ — радиус зоны Добровольского [6], R_Q — расстояние от пункта наблюдений “Микижа” до эпицентра землетрясения; в группу Q_2 — землетрясения, для которых $1 < R_Q/R_D \leq 2$; в Q_3 — $2 < R_Q/R_D \leq 3$; в Q_4 — $R_Q/R_D > 3$. Зоны, в которых фиксируются землетрясения из перечисленных групп, отмечены на карте Камчатского региона, изображенной на рис. 8.

С учетом высокой скорости распространения электромагнитных сигналов в волноводе Земля — Ионосфера расстоянием между пунктами наблюдений “Микижа” и “Карымшина” (приблизительно 20 км) при расчете дистанции до эпицентра землетрясения можно пренебречь. Поэтому эпицентральное расстояние для землетрясений рассчитывалось относительно пункта наблюдений “Микижа”.

Для оценки времени появления предсейсмического эффекта отдельно для каждого из рассматриваемых рядов аномалий использовался метод наложения эпох [7]. Для каждого землетрясения выбирались фрагменты рядов аномалий длиной 50 суток (25 суток до и 25 суток после землетрясения), которые впоследствии усреднялись.

Рис. 8. Зоны, в которых фиксируются землетрясения из групп Q_1 , Q_2 , Q_3 , Q_4 , на карте Камчатского региона

Результаты анализа методом наложения эпох показали, что перед землетрясениями группы Q_4 аномалии в электромагнитных и геоакустических сигналах отсутствуют, поэтому они были исключены из выборки, и дальнейший анализ проводился с использованием землетрясений из групп Q_1 , Q_2 и Q_3 (всего 151 землетрясение).

Установлено, что предсейсмические аномалии в сигналах ЭИ и ГАЭ наблюдаются перед землетрясениями в разные периоды времени. На рис. 9а, 10а представлены усредненные ряды аномалий сигналов ЭИ и ГАЭ, построенные для временных периодов 25 суток до и 25 суток после землетрясений. В сигналах ЭИ предсейсмические аномалии наблюдаются за 9–13 дней перед землетрясениями, максимальное значение усредненного ряда аномалий фиксируется за 10.6 дней (рис. 9а).

В сигналах ГАЭ предсейсмические аномалии регистрируются за 5–21 день до землетрясения (рис. 10а), максимальное значение усредненного ряда аномалий — за 7 дней. При этом график ряда имеет более сложную форму и содержит несколько пиков, основной из которых проявляется на интервале 5–9 дней до землетрясения.

Для проверки корректности полученных временных оценок был проведен вычислительный эксперимент. Был сгенерирован искусственный ряд землетрясений, расположенных случайным образом на временной шкале исследуемого года наблюдений.

Методом наложения эпох оценивалось время появления предсейсмических аномалий в окрестности “искусственных” землетрясений. Установлено, что в таком случае предсейсмические аномалии отсутствуют (рис. 9б, 10б). Таким образом показано, что эффект возникновения предсейсмических аномалий в сигналах ЭИ и ГАЭ неслучаен.

Совместный анализ рядов аномалий сигналов ЭИ и ГАЭ (рис. 9а, 10а), показывает, что предсейсмические аномалии в электромагнитных и геоакустических сигналах наблюдаются со смещением по времени, поэтому была произведена оценка

взаимной корреляционной функции (ВКФ) усредненных рядов. Максимальное значение ВКФ составило 0.025 при уровне статистической значимости 0.05, что свидетельствует об отсутствии линейной статистической связи.

Рис. 9. Накопленные ряды аномалий электромагнитного ОНЧ-излучения в окрестности а — реальных и б — “искусственных” землетрясений

Рис. 10. Накопленные ряды аномалий геоакустической эмиссии в окрестности а — реальных и б — “искусственных” землетрясений

Оценка вероятности совместного проявления предсейсмических аномалий геоакустических и электромагнитных сигналов

Для оценки вероятности возникновения совместных предсейсмических аномалий в сигналах ЭИ и ГАЭ, рассматривались аномалии, зарегистрированные в течение 15 суток перед землетрясениями. Такой временной интервал соответствует периоду появления предвестников в исследуемых полях. Для поиска скрытых закономерностей использовались методы интеллектуального анализа (поиск последовательностей и ассоциативных правил).

Таблица 1

Значения поддержки и вероятностей для правил размера 1 и 2

Правило	Поддержка, k	Вероятность, P (общее число транзакций 151)
Размер правила 1		
$AI \rightarrow Q$	38	25.17%
$AS \rightarrow Q$	9	5.96%
$EDD \rightarrow Q$	14	9.27%
$EDS \rightarrow Q$	55	36.42%
Размер правила 2		
$AI - EDD \rightarrow Q$	7	4.64%
$AI - EDS \rightarrow Q$	30	19.87%
$AS - EDD \rightarrow Q$	2	1.32%
$AS - EDS \rightarrow Q$	5	3.31%
$EDD - AI \rightarrow Q$	10	6.62%
$EDD - AS \rightarrow Q$	0	0.00%
$EDS - AI \rightarrow Q$	31	20.53%
$EDS - AS \rightarrow Q$	6	3.97%

Оценка вероятности возникновения предсейсмических аномалий выполняется следующим образом:

1) Правилom размера n будем называть условие “аномалии $A_1, \dots, A_n$ предшествуют землетрясению Q ” ($A_1 - \dots - A_n \rightarrow Q$).

2) Для каждого землетрясения строится цепочка аномалий, зарегистрированных не более, чем за 15 суток до землетрясения. Если в 15-дневном временном интервале перед землетрясением Q наблюдается другое землетрясение Q^* , то во избежание многократного учета одного и того же правила, каждая аномалия соотносится с ближайшим по времени землетрясением. Таким образом, 15-дневный интервал перед землетрясением Q сокращается до времени наступления землетрясения Q^* . Построенные цепочки аномалий образуют множество транзакций для процедуры поиска ассоциативных правил.

3) Формируется набор правил размера 1 (правила типа $A \rightarrow Q$) и предполагается, что поддержка k каждого из них равна 0.

4) Если в 15-дневном временном интервале перед Q наблюдаются аномалии $A_1, \dots, A_n$ (в той же временной последовательности), то поддержка правила $A_1 - \dots - A_n \rightarrow Q$ увеличивается на 1.

5) Для каждого правила рассчитывается вероятность P , равная отношению поддержки k к общему количеству транзакций.

6) Правила размера $n + 1$ формируются путем объединения правил размера n с уровнем поддержки, превышающим заданный.

По результатам применения метода к сформированным выборкам аномалий (794 аномалии) и землетрясений (151 землетрясение) были получены следующие оценки (табл. 1): вероятность, что в 15-дневный период перед землетрясением будет зарегистрирована аномалия *EDD* сигнала ЭИ составляет около 9%, аномалия *EDS* сигнала ЭИ — около 36%, импульсная аномалия *AI* сигнала ГАЭ — около 25%, сплошная аномалия *AS* сигнала ГАЭ — около 6%. Вероятность того, что перед землетрясением будут зарегистрированы и импульсная аномалия *AI* сигнала ГАЭ, и аномалия *EDS* сигнала ЭИ в среднем составляет около 20%.

Заключение

В результате исследования определены признаки возникновения предсейсмических аномалий в электромагнитных и геоакустических сигналах, согласно которым отобраны предсейсмические аномальные проявления сигналов ЭИ и ГАЭ, зарегистрированных в 2013 году. В результате совместного анализа рядов аномалий сигналов ЭИ и ГАЭ установлено отсутствие линейной статистической связи между ними. Аномалии в сигналах обоих типов вызваны динамикой сейсмотектонического процесса и между собой могут быть связаны опосредованно. Установлено, что вероятность возникновения предсейсмических аномалий в рассматриваемых геофизических сигналах составляет не более 36%. Дальнейшие исследования предполагают использование описанных в работе методов для анализа рядов данных, охватывающих больший временной период.

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] Купцов А. В., Марапулец Ю. В., Шевцов Б. М., “Анализ изменений геоакустической эмиссии в процессе подготовки сильных землетрясений на Камчатке”, *Исследовано в России*, **7** (2004), 2809–2818. [Kupcov A. V., Marapulets Yu. V., Shevtsov B. M., “Analiz izmenenij geoakusti-cheskoj ehmissii v processe podgotovki sil’nyh zemletryasenij na Kamchatke”, *Issledovano v Rossii*, 2004, № 7, 2809–2818 (Russian)].
- [2] Мищенко М. А., “Статистика возникновения предсейсмических аномалий в геоакустической эмиссии и атмосферном электрическом поле”, *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 2016, № 3(14), 47–52. [Mishchenko M. A., “Statistika vozniknoveniya predseismicheskikh anomalij v geoakusticheskoy emissii i atmosfernom elektricheskom pole”, *Vestnik KRAUNTs. Fiz.-mat. nauki.*, **14**:3 (2016), 47:52 (in Russian)].
- [3] Marapulets Yu., Solodchuk A., Shcherbina A., “Changes of geoaoustic emission directivity at “Mikizha” site associated with earthquakes in Kamchatka”, *E3S Web of Conferences*, **11** (2016), 00014.
- [4] Дружин Г. И. и др., “Акустические и электромагнитные излучения перед землетрясением на Камчатке”, *ДАН*, **472**:5 (2017), 584–589. [Druzhin G. I. et al., “Acoustic and electromagnetic emissions preceding the earthquake in Kamchatka”, *Doklady Earth Sciences*, **472**:2 (2017), 215–219].

- [5] Марапулец Ю. В., Шевцов Б. М., *Мезомасштабная акустическая эмиссия*, Дальнаука, Владивосток, 2012, 126 с. [Marapulets Yu. V., Shevtsov B. M., *Mezomasshtabnaya akusticheskaya emissiya*, Dal'nauka, Vladivostok, 2012 (in Russian), 126 pp.]
- [6] Добровольский И. П., *Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения*, Физматлит, М., 2009, 240 с. [Dobrovol'skiy I. P., *Matematicheskaya teoriya podgotovki i prognoza tektonicheskogo zemletryaseniya*, Fizmatlit, Moskva, 2009 (in Russian), 240 pp.]
- [7] Мищенко М. А., “Статистический анализ возмущений геоакустической эмиссии, предшествующих сильным землетрясениям на Камчатке”, *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 2011, № 1(2), 56–64. [Mishchenko M. A., “Statisticheskiy analiz vozmushcheniy geoakusticheskoy emissii, predshestvuyushchikh sil'nym zemletryaseniya na Kamchatke”, *Vestnik KRAUNTs. Fiz.-mat. nauki.*, 2011, № 1(2) (in Russian), 56-64 pp.]

MSC 86-05

Research Article

Anomalies in electromagnetic and geoacoustic emission signals before Kamchatka earthquakes ($M_L \geq 4.75$) in 2013

O. O. Lukovenkova, E. I. Malkin, M. A. Mishchenko, A. A. Solodchuk

Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, FEB RAS, 684034 Kamchatka region, Paratunka, Mirnaya str., 7, Russia

E-mail: micle@ikir.ru

The paper considers pre-seismic anomalies in the signals of electromagnetic radiation in a very low frequency range and geoacoustic emission recorded in Kamchatka in 2013. Signs of anomaly occurrence in the studied signals and peculiarities of their manifestation were revealed. Using the epoch folding method, joint analysis of the detected pre-seismic electro-magnetic and geoacoustic anomalies was carried out. The estimates of occurrence probability for such anomalies of the considered geophysical fields are presented.

Key words: electromagnetic radiation, geoacoustic emission, pre-seismic anomaly, epoch folding method

DOI: 10.26117/2079-6641-2021-34-1-137-149

Original article submitted: 17.12.2020

Revision submitted: 05.03.2021

For citation. Lukovenkova O. O., Malkin E. I., Mishchenko M. A., Solodchuk A. A. Anomalies in electromagnetic and geoacoustic emission signals before Kamchatka earthquakes ($M_L \geq 4.75$) in 2013. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2021, **34**: 1, 137-149. DOI: 10.26117/2079-6641-2021-34-1-137-149

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>)

© Lukovenkova O. O. et al., 2021

Funding. The study was carried out without financial support from foundations.