

УДК: 537.87, 537.862

DOI: 10.26907/rwp29.2025.464-467

## ВОЗМУЩЕННОСТЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ФОНА КРАЙНЕ НИЗКИХ ЧАСТОТ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД ПО ДАННЫМ МНОГОЛЕТНИХ ИЗМЕРЕНИЙ В ТОМСКЕ

С.А. Колесник, А.А. Колмаков, И.Е. Проваренко, И.Е. Родионов

Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36  
E-mail: kolmakov@mail.tsu.ru

**Аннотация.** Работа посвящена статистическому анализу возмущений электромагнитного крайне низкочастного фона в зимний период. В работе получены статистические оценки возмущенности ЭМ КНЧ-фона в Томске, связанных со слабыми внутриоблачными электрическими разрядами в отсутствии региональной грозовой активности, в зимних сезонах 2018–2025 гг.

**Ключевые слова:** электромагнитный фон; крайне низкие частоты; шумановские резонансы; возмущенность электромагнитного фона; облачность

### DISTURBANCE OF THE ELECTROMAGNETIC BACKGROUND OF EXTREMELY LOW FREQUENCIES IN WINTER BASED ON LONG-TERM MEASUREMENTS IN TOMSK

S.A. Kolesnik, A.A. Kolmakov, I.Ye. Provarenko, I.Ye. Rodionov

**Abstract.** The work is devoted to the statistical analysis of disturbances of the electromagnetic extremely low-frequency background in the winter period. The work obtained statistical estimates of the disturbance of the EM ELF background in Tomsk, associated with weak intra-cloud electrical discharges in the absence of regional thunderstorm activity, in the winter seasons of 2018–2025.

**Keywords:** electromagnetic hum; extremely low frequencies; Schumann resonances; electromagnetic disturbance of background; cloudiness

#### Введение

Основным физическим механизмом, определяющим глобальное распределение электромагнитной энергии в окружающей среде в диапазоне крайне низких частот (3–30 Гц) являются Шумановские резонансы (ШР) [1]. Этот механизм впервые был теоретически предсказан В. О. Шуманом в 1952 году, в силу чего и получил свое название. Впоследствии М. Бальсер и Ч. Вагнер обнаружили это явление экспериментально [2]. К настоящему времени достаточно глубоко исследованы регулярные вариации компонент ЭМ-фона и влияние на них гелиофеофизических факторов. По современным представлениям шумановские резонансы – явление интерференции волн, длина которых соизмерима с геометрическими размерами Земли, вызванное излучением от импульсных источников глобальной грозовой активности [3].

Было установлено, что в ряде случаев появляются характерные сигналы повышенного уровня с широкой полосой спектра (перекрывающей несколько первых мод ШР), не связанные с техногенными источниками [4]. Такие сигналы имеют длительность от нескольких минут до десятков часов. В зимнем сезоне такие возмущения не могут быть вызваны локальной грозовой активностью (носящей в Сибири сезонный – причем, летний характер).

Ранее было показано [4], что маркером появления сигналов ВР является пониженное атмосферное давление в пункте регистрации. При этом было отмечено, что появление таких сигналов, как правило, связано с присутствием в пункте регистрации облачности, которая, как известно, тесно связана с атмосферными электрическими явлениями [5, 6], например, внутриоблачными электрическими разрядами (ВР) [6, 4]. Исследование возмущенности ЭМ КНЧ-фона может оказаться полезным для объяснения эффекта метеочувствительности [7], наблюдаемого в человеческой популяции.

Целью данной работы является получение статистических оценок возмущенности ЭМ КНЧ-фона в отсутствии местной грозовой активности на протяжении зимних сезонов 2018–2025 гг.

### Алгоритм выделения возмущений на спектрограммах

На кафедре космической физики и экологии ТГУ создан и эксплуатируется измерительно-вычислительный комплекс [8], который регистрирует вертикальную электрическую компоненту ( $Ez$ ) КНЧ ЭМ-фона с 1997 года. В результате работы комплекса данные измерений уровня ЭМ-фона в полосе частот до 40 Гц сохраняются в памяти ПК в двух формах: 1) Результаты цифровой регистрации временных реализаций вертикальной электрической компоненты ЭМ-фона  $Ez$ ; 2) Спектрограммы в графическом формате (JPEG).

Особенность применяемого в данном исследовании подхода заключается в работе с графическими файлами – спектрограммами, которые представляют собой изображения уровня КНЧ ЭМ-фона в виде цветового рельефа, в зависимости от частоты и времени суток. Цвет на спектрограмме соответствует уровню сигнала. Росту уровня сигнала соответствует последовательность цветов от темно-синего цвета к голубому, зеленому, розовому и далее к белому, включая промежуточные оттенки цвета. При таком подходе единичным элементом анализа является пиксель изображения, который соответствует объему данных размером – 3мин\*0.1 Гц. Тождественность уровня сигнала и цвета изображения позволяет использовать пороговые методы выделения сигналов [9] на спектрограммах, исключая этап повторной спектральной обработки исходных временных реализаций сигнала  $Ez$ .

Работа алгоритма по выделению возмущений (ВР) выполняется в несколько этапов. Для получения итогового результата требуется на спектрограмме выделить сигналы повышенного уровня, потенциально связанные с облачностью (то есть, устраниТЬ слабые сигналы и техногенные помехи). Результат обработки необходимо сохранить в удобном виде для анализа и последующей обработки. Подробнее этапы обработки представлены в работе [4].

Цвет на спектрограмме кодируется 24 битами в цветовой схеме RGB (red/green/blue), для которой итоговый цвет задается 3 байтами – по одному байту для каждого цвета: красного, зеленого и синего. Вводя пороговые значения для каждого из 3 байтовых величин, можно устранять различные комбинации оттенков в итоговом цвете выбранного пикселя. Далее результат обнаружения является бинарным (выше порога/ниже порога). Или иначе – есть сигнал или нет сигнала. Как и в классическом пороговом обнаружении [9], в зависимости от величины порога, можно получить ситуацию «ложной тревоги» или «пропуска цели». Для решения данной задачи желательно устраниТЬ как можно больше шумов и не пропустить полезные сигналы. Опытным путем был выбран порог 155/64/0 (RGB), что соответствует уровню исходного сигнала ~8 единиц АЦП, что перекрывает регулярные вариации амплитуд мод ШР [1, 6], которые рассматриваются здесь и далее как помеха.

Кроме мод ШР на спектрограммах присутствуют и другие помехи, имеющие техногенное происхождение, от которых требуется качественно избавиться. Для решения данной задачи принималось в расчет следующее: 1) Сигналы ВР – вертикально ориентированные на спектрограммах, их уровень уменьшается с частотой; 2) Помехи – узкополосные, горизонтально ориентированные на спектрограммах.

Были введены следующие критерии устранения таких помех: а) длина линии <3 Гц; б) пропуск в линии >1 Гц; в) длительность менее 6 мин; г) плотность точек в линии  $\rho < 0.55$  (см. (1)). Поясним, что под «линией» здесь понимается вертикальный разрез (соответствующий каждым 3-м минутам) от точки с минимальной частотой  $f_h$  до точки с максимальной частотой  $f_b$ . Значения частот определяются в герцах. Для определенности «точка» – пиксель с заданным цветом-маркером (121212).

Плотность вводится согласно следующему выражению ( $N$  – количество пикселей в линии):

$$\rho = 10 * (f_b - f_h) / N. \quad (1)$$

### Результаты выделения и обработки возмущений

Полученные параметры возмущенности сохраняются в специализированной базе данных. В проводимой работе для каждого суток вычислялось суммарная возмущенность (максимально возможное значение возмущенности для суток составляет 192000) [4], при этом каждые сутки рассматривались единичным элементом для дальнейшего статистического оценивания [9, 10]. Полученные для каждого сезона статистические оценки представлены на рисунке 1. Начиная с сезона 2018/19 средняя величина возмущенности монотонно снижалась от 15300 до 4500 (в

2018/19) после чего вновь выросла (в сезоне 2018/19) почти до исходных значений. Максимальное изменение возмущенности за рассматриваемый период составило 3.4 раза.

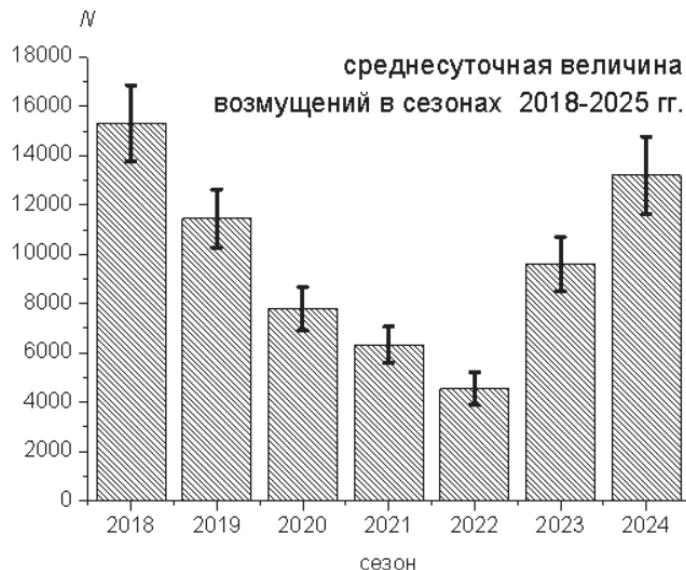


Рис. 1. Возмущенность КНЧ ЭМ-фона за 7-ми зимних сезонов. По вертикальной оси – среднесуточная величина возмущений, по горизонтальной оси – сезон с указанием года его начала

Далее для каждого суток полученная величина возмущённости ранжировалась. Вводились пороговые уровни: ниже 200 – возмущённость считалась слабой, выше 10000 – значительной. При этом слабая возмущённость включает дни вообще без возмущений, а значительная включает в себя в качестве подкласса сильную (более 50000). Для каждого сезона вычислялась относительная частота появления возмущённости ЭМ КНЧ-фона (в процентах) с учётом её величины см. таблицу 1.

Таблица 1. Относительная частота появления возмущенности ЭМ КНЧ-фона, %

Уровень возмущённости	Зимний сезон						
	2018/19	2019/20	2020/21	2021/22	2022/23	2023/24	2024/25
Без возмущений	7.69	3.83	13.19	19.23	30.77	18.03	13.11
Незначительная	9.89	9.29	25.27	30.22	39.56	28.96	22.40
Умеренная	45.60	55.74	49.45	48.35	47.80	43.72	43.72
Значительная	44.51	34.97	25.27	21.43	12.64	27.32	33.88
Сильная	7.69	3.83	1.65	1.10	0.00	2.73	6.56

За рассматриваемый период значительная возмущённость монотонно уменьшалась с ~44% в сезоне 2018/19 до ~13% в 2022/23 и далее выросла до ~27%. Напротив незначительная возмущённость увеличивалась с ~10% в сезоне 2018/19 до ~40% в сезоне 2022/23, затем немного снизилась до ~29%.

Поведение сильной возмущённости (табл. 1) качественно повторяет временной ход значительной. Аналогично для дней без возмущений качественно повторяется тенденция, описанная для незначительной возмущённости. Для умеренной возмущённости (интервал значений от 200 до 10000) изменения от года к году колеблются около значения  $\sim 50 \pm 6\%$  без явной тенденции.

Таким образом, статистический анализ возмущенности ЭМ КНЧ-фона в многолетнем цикле наблюдений показал изменение значительной возмущённости от ~40% до ~13%, при этом установлено, что эти изменения происходят монотонно. Напротив незначительная возмущённость в это время меняется зеркально от ~9% до ~40%.

### Заключение

В работе на большом экспериментальном материале проведено тестирование созданного алгоритма выделения на спектrogramмах возмущений ЭМ КНЧ-фона в отсутствии местной грозовой активности.

Для зимних сезонов 2018–2025 гг. получены статистические оценки возмущенности ЭМ КНЧ-фона. Установлено, что средняя величина возмущенности за рассмотренный период снижалась  $\square 3.4$  раза (в сезоне 2018/19) от исходных значений в начале периода, а затем вернулась к прежнему уровню. Эти изменения вызваны в основном поведением значительной возмущённости (снижение от  $\sim 40\%$  до  $\sim 13\%$ ). Умеренная возмущённость (интервал значений от 200 до 10000) от года к году сохраняет свои свойства – колеблется около значения  $\sim 50 \pm 6\%$  без видимой тенденции.

Реализованные методы и подходы по мнению авторов могут быть практически использованы для более качественного определения основных регулярных характеристик шумановских резонансов.

### Список литературы

1. Колесник А.Г., Колесник С.А., Побаченко С.В. Электромагнитная экология : учебное пособие. – Томск: Изд-во ТМЛ-Пресс, 2009. – 336 с.
2. Balser M. Diurnal power variations of the earth-ionosphere cavity modes and their relationship to worldwide thunderstorm activity / M. Balser, C. A. Wagner // J. Geophys.Res. – 1962. – V. 67. – P. 619–625.
3. Колесник С.А. Математическое моделирование шумановских резонансов // Распространение радиоволн: сборник докладов XXVIII Всероссийской открытой научной конференции, Йошкар-Ола, 16–19 мая 2023 года. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2024. – С. 309–312.
4. Белоногов С.А. [и др.]. Местная облачность как причина возмущенности электромагнитного крайне низкочастотного фона в зимний период по данным измерений в Томске // Распространение радиоволн. I Всероссийская молодежная научной школы-конференции, посвященной памяти Д. С. Лукина, Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2024. – С. 35–38.
5. Ковриго П.А. Метеорология и климатология : учебник. – 2-е изд, испр. – Минск : Высшая школа, 2022. – 414 с.
6. Betz H.D., Schumann U., Laroche P. Lightning: Principles, Instruments and Applications. – Springer Science, 2009. – 641 p.
7. Иванова Е.Г., Потемина Т. Е. Предикторы метеочувствительности у пациентов с артериальной гипертонией в условиях Крайнего Севера // Вестник новых медицинских технологий. – 2023. – Т. 30. – № 4. – С. 6–11. <https://doi.org/10.24412/1609-2163-2023-4-6-11>.
8. Колесник А.Г., Колесник С.А., Колмаков А.А., Шинкевич Б.М. Шумановские резонансы // Изв. вузов. Физика. – 2003. – № 2. – С. 69–73.
9. Пономарев Г.А., Пономарева В.Н., Якубов В.П. Статистические методы в радиофизике. – Томск : Издательство Томского университета, 1989. – 235 с.
10. Закс Л. Статистическое оценивание. – М. : СТАТИСТИКА, 1976. – 598 с.