

Примеры измерения импульсной компоненты электромагнитного поля ОНЧ-диапазона на фоне сейсмической активности. Часть 2

Алексей Галахов

Данная статья является продолжением работы «Примеры измерения импульсной компоненты электромагнитного поля ОНЧ-диапазона на фоне сейсмической активности» (Современная электроника. 2025. № 7. С. 39–43), в которой приведены экспериментальные

данные импульсной компоненты естественного электромагнитного поля (И.К. Э-М. П.) ОНЧ-диапазона (600...3600 Гц), синхронно зарегистрированные на двух разнесённых по широте авроральных обсерваториях ПГИ Баренцбург (78,08°, 14,2°; арх. Шпицберген) и Ловозеро (67,97°, 35,08°; Мурманская обл., РФ).

Для сопоставления сейсмической активности с АЧХ и АВХ И.К.

ОНЧ-сигнала использованы архивные данные норвежской сети NORSAR, а также приведены некоторые характеристики гелиогеофизических факторов, влияющих на состояние нижней ионосферы: вариации магнитного поля Земли (H_x , H_y , H_z) и временные периоды освещённости Солнцем нижних слоёв ионосферы ($h < 90$ км) в пунктах регистрации ОНЧ-сигнала.

Приёмно-регистрирующая аппаратура, используемая на обсерваториях, выполнена по идентичной схеме и состоит из приёмника ОНЧ-диапазона со взаимно ортогональным расположением приёмных рамочных антенн [1] и последовательного анализатора спектра импульсных сигналов [2].

Работа является продолжением тематики изучения влияния гелиогеофизических факторов на амплитудно-частотные характеристики естественного электромагнитного поля ОНЧ-диапазона и, в частности, продолжением работы «Примеры измерения импульсной компоненты электромагнитного поля ОНЧ-диапазона на фоне сейсмической активности» (Современная электроника. 2025. № 7. С. 39–43) [3].

В статье представлены в различных временных масштабах экспериментальные данные импульсной компоненты естественного электромагнитного поля (И.К. Э-М. П.) ОНЧ-диапазона (600...3600 Гц), синхронно зарегистрированные на двух разнесённых по широте авроральных обсерваториях ПГИ Баренцбург (78,08°, 14,2°; арх. Шпицберген) и Ловозеро (67,97°, 35,08°; Мурманская обл., РФ).

Данные представлены на фоне сейсмической активности районов расположения обсерваторий и магнитограмм H_x , H_y , H_z , получен-

ных на обсерваториях сети IMAGE (The International Monitor for Auroral Geomagnetic Effects); LYR (Longyearbyen TGO 78,20°, 15,82°); MUO (Muonio FMI 68,02°, 23,53°) [4]. Использован архивный календарь сейсмической активности (<https://www.norsar.no/extranet/>) для районов с географическими координатами: ($68 \pm 10^\circ$, $35 \pm 10^\circ$) и ($78 \pm 10^\circ$, $14 \pm 10^\circ$) [5].

На рис. 1, 2 в виде цветового оттенка и в виде отдельной шкалы рис. 3, 4 обозначены отрезки времени суток, когда нижняя ионосфера ($h < 90$ км) освещена Солнцем (расчёт временных интервалов произведён без учёта оптической рефракции).

При оценке временной зависимости между э-м импульсом и началом сейсмического события из-за физической природы исследуемого сигнала и технических характеристик приёмно-регистрирующей аппаратуры необходимо учитывать следующие факторы.

Естественные э-м импульсы ОНЧ-диапазона из-за разной своей физической природы (хоры, шипения, поле

атмосфериков, сейсмические удары) имеют большой динамический диапазон и значительно по амплитуде могут отличаться друг от друга [3]. Поэтому один вид импульсного излучения может маскировать другой.

При цифровой обработке сигнала при идентификации э-м импульса как результата сейсмического удара И.К. – H_x , H_y задаётся амплитудным порогом напряжённости поля, превышение которого даёт основания предположить его сейсмическую природу.

В связи с тем, что в качестве регистратора исследуемого сигнала использовался последовательный анализатор спектра импульсного сигнала ПАС [2], для определения временных характеристик сигналов, необходимо учитывать АВХ каждой спектральной линии регистрируемого импульсного ОНЧ-сигнала.

Основные характеристики ПАС [2]:

- полоса частотного анализа $\Delta F = 600...3600$ Гц;
- значения резонансных частот перестраиваемого фильтра (Гц): 613, 750, 909, 1050, 1204, 1350, 1500, 1650, 1795, 1945, 2091, 2200, 2386, 2682, 2978, 3273, 3601;
- полоса пропускания анализирующего фильтра $2\Delta f_{0,7} = 200$ Гц;
- длительность цикла последовательного анализа: $T_a \approx 18$ с.

Если принять во внимание, что спектр исследуемого импульсного сигнала в диапазоне частот (600...3600 Гц) имеет непрерывный характер, то использование АВХ каждой спектральной линии канала ПАС при определении временных параметров сигнала позволяет оценить временной сдвиг ΔT между началом землетрясения и э-м импульсом И.К. – H_x , H_y .

В данной работе в алгоритме распознавания природы принятого импульсного сигнала был использован как одноуровневый И.К. – H_x , H_y (рис. 1, 2), так и двухуровневые И.К. – $L - H_x$, H_y и И.К. – H_x , H_y пороги распознавания (рис. 3–6).

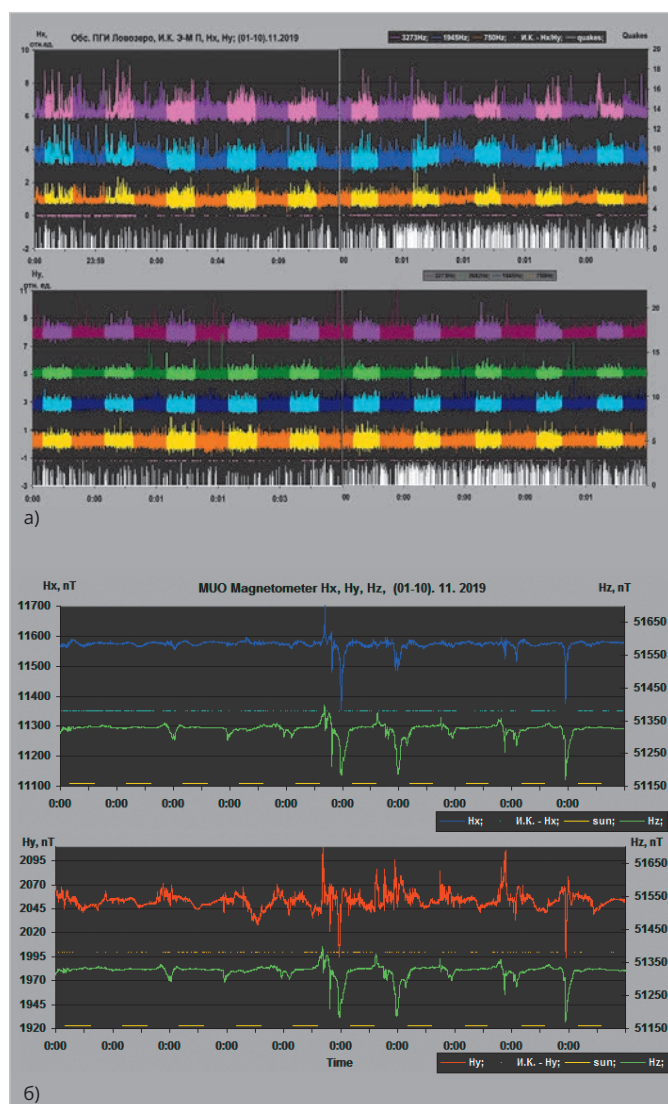


Рис. 1. Синхронная запись АЧХ И.К. – H_x , H_y э-м п ОНЧ-диапазона [обс. ПГИ Ловозеро] на фоне сейсмической активности (quakes) [сеть NORSAR] и, вариаций магнитного поля Земли H_x , H_y , H_z [обс. MUO FMI] и солнечной освещённости нижней ионосферы (sun): а) АЧХ И.К. – H_x , H_y э-м п ОНЧ-диапазона, сейсмическая активность (quakes), временные метки АВХ выделенных событий И.К. – H_x , H_y [шкала Y : 0, (–1,2)]; б) временные метки АВХ И.К. – H_x , И.К. – H_y на фоне вариаций магнитного поля (H_x , H_y , H_z) и периода времени солнечной освещённости нижней ионосферы (sun)

Ниже приведены в различных временных масштабах для разных массивов данных результаты обработки импульсной компоненты ОНЧ-сигнала, одновременно зарегистрированного на двух разнесённых по широте обсерваториях ПГИ.

1. Массив данных:
(01–10).11.2019.

Пороговые значения напряжённости поля И.К. – H_x , И.К. – H_y представлены в табл. 1, 2 (обс. ПГИ Ловозеро) и в табл. 3, 4 (обс. ПГИ Баренцбург).

2. Массив данных:
05.11.2019.

В табл. 5–8 представлены двухуровневые пороговые значения напряжённости э-м поля для каждой импульсной компоненты исследуемого сигнала [(И.К. – H_x – L, И.К. – H_x) и (И.К. – H_y – L, И.К. – H_y)] и для каждой спектральной линии ФКАН соответственно для обсерваторий Ловозеро и Баренцбург.

По результатам регистрации импульсной компоненты ОНЧ-сигнала (рис. 1–4) можно оценить значения амплитуды компонент (H_x , H_y , H_z) магнитного поля Земли и условия освещённости нижней ионосфе-

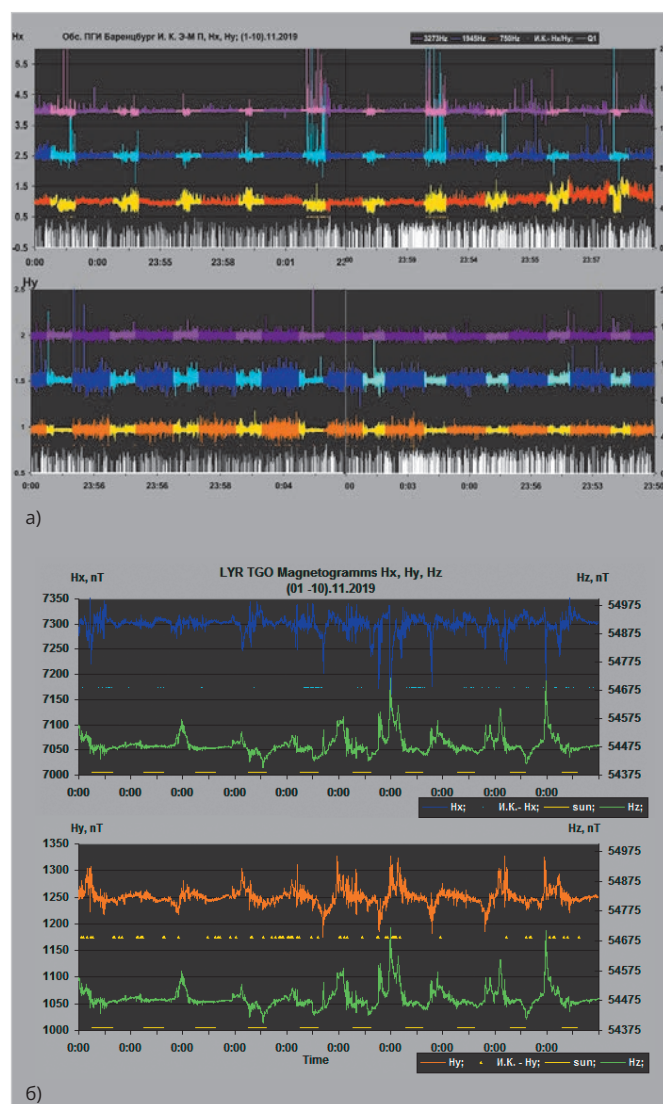


Рис. 2. Синхронная запись АЧХ И.К. – H_x , H_y э-м п ОНЧ-диапазона [обс. ПГИ Баренцбург] на фоне сейсмической активности (quakes) [сеть NORSAR], вариаций магнитного поля Земли H_x , H_y , H_z [обс. MUO FMI] и солнечной освещённости нижней ионосферы (sun): а) АЧХ И.К. – H_x , H_y э-м п ОНЧ-диапазона, сейсмическая активность (quakes), временные метки АВХ выделенных событий И.К. – H_x , H_y [шкала Y : 0, (–1,2)]; б) временные метки АВХ И.К. – H_x , И.К. – H_y на фоне вариаций магнитного поля (H_x , H_y , H_z) и периода времени солнечной освещённости нижней ионосферы (sun)

ры, при которых были зарегистрированы э-м импульсы, природа которых может быть объяснена сейсмической активностью района.

3. Массив данных:
(16:00–19:00).05.11.2019.

На основании экспериментальных данных (рис. 5, 6) ниже приводятся значения временного сдвига ΔT между началом импульса Э-М. П. и началом сейсмического события.

Обс. ПГИ Ловозеро: 67,97°, 35,08° (рис. 5).

Сектора сейсмических событий: (Latitude)°, (Longitude)°, (Magnitude) [5]

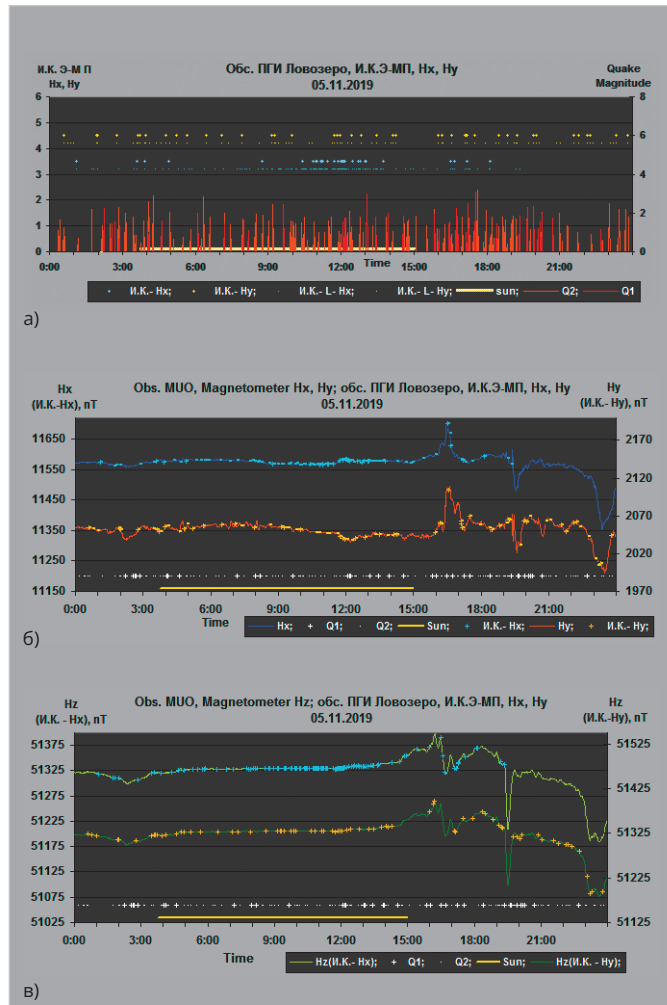


Рис. 3. Синхронная запись АВХ импульсной составляющей ОНЧ-сигнала при двухуровневом алгоритме распознавания (И.К. – Нх, Ну и И.К. – L – Нх, Ну), сейсмической активности (Q1, Q2), компонент магнитного поля Земли (Нх, Ну, Нз) и периода времени освещённости нижней ионосферы (sun) [обс. ПГИ Ловозеро]:

- а) синхронная запись АВХ импульсного сигнала при двухуровневом алгоритме (И.К. Нх, Ну и И.К. – L – Нх, Ну), сейсмической активности (Q1, Q2);
- б) синхронная запись компонентов магнитного поля Нх, Ну с метками превышения сигнала порогового уровня (И.К. – Нх и И.К. – Ну) и сейсмической активности (Q1, Q2);
- в) синхронная запись компоненты Нз магнитного поля с метками превышения сигнала порогового уровня (И.К. – Нх и И.К. – Ну) и сейсмической активности (Q1, Q2)

Q1: [(60...76)°, (30...40)°, (0,6...8,0)];
Q2: [(60...76)°, (20...50)°, (0,6...8,0)].

а) Компонента Нх:

$\Delta T_{x1} = t_{\text{И.К.}-\text{Нх}} [1640] - t_{Q1} [(1644), 73^\circ/39^\circ, 2,22] = 4 \text{ мин};$
 $\Delta T_{x2} = t_{\text{И.К.}-\text{Нх}} [1711] - t_{Q1} [(1714), 71^\circ/33^\circ, 2,50] = 3 \text{ мин};$
 $\Delta T_{x3} = t_{\text{И.К.}-\text{Л}-\text{Нх}} [1736] - t_{Q2} [(1736), 67^\circ/27^\circ, 3,17] = 0 \text{ мин};$
 $\Delta T_{x4} = t_{\text{И.К.}-\text{Л}-\text{Нх}} [1805] - t_{Q2} [(1807), 79^\circ/16^\circ, 0,77] = 2 \text{ мин};$
 $\Delta T_{x5} = t_{\text{И.К.}-\text{Нх}} [1808] - t_{Q2} [(1812), 67^\circ/20^\circ, 1,78] = 4 \text{ мин}.$

б) Компонента Ну:

$\Delta T_{y1} = t_{\text{И.К.}-\text{Ну}} [1610] - t_{Q2} [(1612), 79^\circ/15^\circ, 0,47] = 2 \text{ мин};$
 $\Delta T_{y2} = t_{\text{И.К.}-\text{Л}-\text{Ну}} [1612] - t_{Q2} [(1615), 78,3^\circ/18^\circ, 1,4] = 3 \text{ мин};$
 $\Delta T_{y3} = t_{\text{И.К.}-\text{Ну}} [1708] - t_{Q1} [(1709), 69^\circ/30^\circ, 0,99] = 1 \text{ мин};$
 $\Delta T_{y4} = t_{\text{И.К.}-\text{Ну}} [1729] - t_{Q1} [(1731), 66^\circ/34^\circ, 3,09] = 2 \text{ мин};$
 $\Delta T_{y5} = t_{\text{И.К.}-\text{Л}-\text{Ну}} [1755] - t_{Q2} [(1758), 79^\circ/37^\circ, 2,12] = 3 \text{ мин};$
 $\Delta T_{y6} = t_{\text{И.К.}-\text{Л}-\text{Ну}} [1821] - t_{Q1} [(1824), 68^\circ/35^\circ, 1,45] = 3 \text{ мин}.$
Обс. ПГИ Баренцбург 78.08°, 14.2°
 (рис. 6).

Q1: [(70...86)°, (09...19)°, (0,6...8,0)];
Q2: [(70...86)°, (05...25)°, (0,6...8,0)].

а) Компонента Нх:

$\Delta T_{x1} = t_{\text{И.К.}-\text{Нх}} [1608] - t_{Q1} [(1612), 78,7^\circ/18,6^\circ, 0,47] = 4 \text{ мин};$
 $\Delta T_{x2} = t_{\text{И.К.}-\text{Л}-\text{Нх}} [1612] - t_{Q1} [(1615), 78,6^\circ/18,1^\circ, 1,40] = 3 \text{ мин};$
 $\Delta T_{x3} = t_{\text{И.К.}-\text{Нх}} [1627] - t_{Q1} [(1629), 78,6^\circ/18,7^\circ, 0,91] = 2 \text{ мин};$
 $\Delta T_{x4} = t_{\text{И.К.}-\text{Нх}} [1645] - t_{Q1} [(1646), 79,8^\circ/13,6^\circ, 1,42] = 1 \text{ мин}.$
 б) Компонента Ну:
 $\Delta T_{y1} = t_{\text{И.К.}-\text{Ну}} [1713] - t_{Q2} [(1714), 71^\circ/33^\circ, 2,50] = 1 \text{ мин};$



Рис. 4. Синхронная запись АВХ импульсной составляющей ОНЧ-сигнала при двухуровневом алгоритме распознавания (И.К. – Нх, Ну и И.К. – L – Нх, Ну), сейсмической активности (Q1, Q2), компонент магнитного поля Земли (Нх, Ну, Нз) и периода времени освещённости нижней ионосферы (sun) [обс. ПГИ Баренцбург]:

- а) синхронная запись АВХ импульсного сигнала при двухуровневом алгоритме (И.К. – Нх, Ну и И.К. – L – Нх, Ну), сейсмической активности (Q1, Q2);
- б) синхронная запись компонентов магнитного поля Нх, Ну с метками превышения сигнала порогового уровня (И.К. – Нх и И.К. – Ну) и сейсмической активности (Q1, Q2);
- в) синхронная запись компоненты Нз магнитного поля с метками превышения сигнала порогового уровня (И.К. – Нх и И.К. – Ну) и сейсмической активности (Q1, Q2)

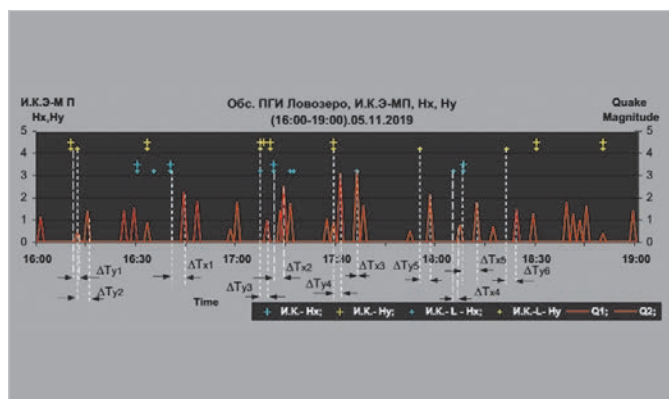


Рис. 5. Синхронная запись АВХ импульсной составляющей ОНЧ-сигнала при двухуровневом алгоритме распознавания (И.К. – Hx, Hy и И.К. – L – Hx, Hy) [обс. ПГИ Ловозеро] и сейсмической активности (Q1, Q2)

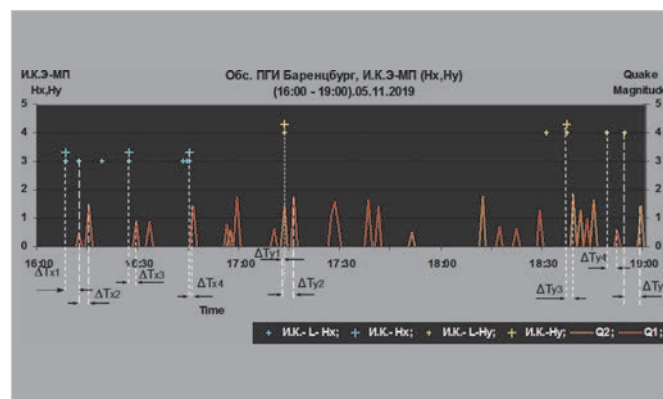


Рис. 6. Синхронная запись АВХ импульсной составляющей ОНЧ-сигнала при двухуровневом алгоритме распознавания (И.К. – Hx, Hy и И.К. – L – Hx, Hy) [обс. ПГИ Баренцбург] и сейсмической активности (Q1, Q2)

Таблица 1. И.К. – Hx; обс. ПГИ Ловозеро

F _{кан.} , Гц	750	909	1050	1204	1350	1500	1945	2200	3273
Hx·a÷m·Hz ^{0.5}	>3,2e-4	>2,55e-4	>2,05e-4	>2,28e-4	>1,56e-4	>1,7e-4	>9,81e-5	>7e-5	>5,55e-5

Таблица 2. И.К. – Hy; обс. ПГИ Ловозеро

F _{кан.} , Гц	750	1050	1945	2682	2978	3273
Hx·a÷m·Hz ^{0.5}	>1,8e-04	>1,1e-04	>2,25e-5	>2e-5	>1,89e-5	>1,87e-5

Таблица 5. Obs. ПГИ Ловозеро: И.К. – H_{x-L}; И.К. – Hx

F _{кан.} , Гц	909	1050	1204	1350	1500	1650	1795	1945
Hx _L ·a÷m·Hz ^{0.5}	>2,49e-4	>2e-4	>1,98e-4	>1,4e-4	>1,56e-4	>9,64e-5	>1,32e-4	>8,23e-5
Hx·a÷m·Hz ^{0.5}	>2,6e-4	>2,18e-4	>2,04e-4	>1,77e-4	>1,78e-4	>9,64e-5	>1,32e-4	>1,1e-4

Таблица 6. Obs. ПГИ Ловозеро: И.К. – H_{y-L}; И.К. – Hy

F _{кан.} , Гц	909	1050	1204	1350	1500	1650	1795	1945
Hx _L ·a÷m·Hz ^{0.5}	>1,48e-4	>1,11e-4	>7,95e-5	>4,92e-5	>6,63e-5	>5,32e-5	>3,61e-5	>2,1e-5
Hx·a÷m·Hz ^{0.5}	>1,55e-4	>1,13e-4	>8,73e-5	>5,16e-5	>6,63e-5	>5,34e-5	>3,77e-5	>2,21e-5
F _{кан.} , Гц	2091	2200	2386	2682	2978	3273	3601	
Hx _L ·a÷m·Hz ^{0.5}	>2,39e-5	>1,76e-5	>2,75e-5	>1,8e-5	>1,68e-5	>2e-5	>6,40e-6	
Hy·a÷m·Hz ^{0.5}	>2,78e-5	>1,94e-5	>3e-5	>2,3e-5	>2e-5	>2,3e-5	>6,45e-6	

Таблица 7. Obs. ПГИ Баренцбург: И.К. – H_{x-L}; И.К. – Hx

F _{кан.} , Гц	909	1050	1204	1350	1500	1650	1795	1945
Hx _L ·a÷m·Hz ^{0.5}	>3,03e-4	>2,08e-4	>2e-4	>1,3e-4	>1,25e-4	>6,01e-5	>3,8e-5	>3,26e-5
Hx·a÷m·Hz ^{0.5}	>3,05e-4	>2,1e-4	>2,5e-4	>1,4e-4	>1,6e-4	>1e-4	>1e-4	>4,9e-5
F _{кан.} , Гц	2091	2200	2386	2682	2978	3273	3601	
Hx _L ·a÷m·Hz ^{0.5}	>3,24e-5	>3,2e-5	>2,58e-5	>2,1e-5	>1,7e-5	>1,7e-5	>9,7e-6	
Hy·a÷m·Hz ^{0.5}	>5,9e-5	>4,8e-5	>4,6e-5	>2,3e-5	>2,2e-5	>2,9e-5	>2e-5	

Таблица 8. Obs. ПГИ Баренцбург: И.К. – H_{y-L}; И.К. – Hy

F _{кан.} , Гц	909	1050	1204	1350	1500	1650	1795	1945
Hx _L ·a÷m·Hz ^{0.5}	>1,89e-4	>1,58e-4	>1,24e-4	>9,08e-5	>1e-4	>4,71e-5	>3,06e-5	>2,18e-5
Hx·a÷m·Hz ^{0.5}	>1,92e-4	>1,62e-4	>1,25e-4	>9,17e-5	>1,01e-4	>4,8e-5	>3,1e-5	>2,2e-5
F _{кан.} , Гц	2091	2200	2386	2682	2978	3273	3601	
Hx _L ·a÷m·Hz ^{0.5}	>2,32e-05	>1,82e-5	>1,6e-5	–	>1,25e-5	>1,10e-5	>6e-6	
Hy·a÷m·Hz ^{0.5}	>2,4e-5	>1,83e-5	>1,53e-5	>1,48e-5	>1,3e-5	>1,55e-5	>6,08e-6	

$$\Delta T_{y2} = t_{\text{И.К.-Hy}} [1713] - t_{Q1} [(1716), 78,3^\circ/09,1^\circ, 1,72] = 3 \text{ мин};$$

$$\Delta T_{y3} = t_{\text{И.К.-Hy}} [1837] - t_{Q2} [(1840), 75,8^\circ/25,1^\circ, 1,80] = 3 \text{ мин};$$

$$\Delta T_{y4} = t_{\text{И.К.-L-Hy}} [1849] - t_{Q1} [(1852), 76,2^\circ/10,8^\circ, 0,54] = 3 \text{ мин};$$

$$\Delta T_{y5} = t_{\text{И.К.-L-Hy}} [1854] - t_{Q2} [(1859), 67,8^\circ/20,7^\circ, 1,42] = 5 \text{ мин}.$$

На основании приведённых измерений [(16:00–19:00).05.11.2019] на двух разнесённых по широте обсерваториях: $\Delta T \approx (0–5) \text{ мин}$.

Таблица 3. И.К. – Hx; обс. ПГИ Баренцбург

F _{кан.} , Гц	750	1945	3273
Hx·a÷m·Hz ^{0.5}	>4,5e-4	>3,26e-5	>1,52e-5

Таблица 4. И.К. – Hy; обс. ПГИ Баренцбург

F _{кан.} , Гц	750	1945	2978	3273
Hy·a÷m·Hz ^{0.5}	>2,7e-4	>2,22e-5	>2,16e-5	>1,1e-5

Хочется надеяться, что приведённые экспериментальные данные импульсной компоненты э-м поля ОНЧ-диапазона, полученные на двух разнесённых по широте авроральных обсерваториях, заинтересуют исследователей, изучающих физические процессы, протекающие в нижней ионосфере Земли.

Литература

1. Галахов А.А., Ахметов О.И. Комплекс аппаратуры для регистрации импульсной компоненты электромагнитного поля очень низкой частоты // Приборы и техника эксперимента. 2011. № 3. С. 136–142.
2. Галахов А., Косолапенко В., Ларченко А., Пильгаев С. Анализатор спектра поля атмосфериков на реконфигурируемых ПАИС Anadigm // Современная электроника. 2019. № 7. С. 62–66.
3. Галахов А. Примеры измерения импульсной компоненты электромагнитного поля ОНЧ-диапазона на фоне сейсмической активности (экспериментальные данные) // Современная электроника. 2025. № 7. С. 39–43.
4. IMAGE. URL: http://space.fmi.fi/image/www_old/index.html.
5. NORSAR.no. URL: <https://www.norsar.no/extranet/bulletins/>.

