

## **Анализ вариаций геомагнитной возмущенности при нагреве ионосферы над Тромсё**

**Тертышников А.В.**

Оценивается возможность использования нагревного стенда в Тромсё для инициирования возмущений магнитного поля Земли и регулирования радиационной обстановки в ОКП.

Эксперименты по воздействию на состояние ионосферы коротковолновым излучением нагревных стендов, особенно в Тромсё, на Суре и HAARP на Аляске, увеличили поток публикаций о результатах исследований сопутствующих и инициируемых эффектов в ионосферной плазме. Основная (2/3) доля публикаций касается результатов генерации низкочастотных радиоволн в ионосфере, их распространения в волноводе Земля-ионосфера и инъекции КВ-излучения в магнитосферу. Остальная часть публикаций связана с генерацией УНЧ волн (возмущений магнитного поля Земли и магнитных пульсаций) [1, 2].

История исследований инициируемых магнитных пульсаций связана с результатами экспериментов на нагревном стенде в Тромсё в 1981 г., когда была выявлена генерация сверхмалых вариаций магнитного поля Земли в диапазоне частот  $10^{-3}$ - $10^1$  с<sup>-1</sup> с амплитудой в доли пТл. Эти эффекты были подтверждены в последние годы по данным КА DEMETER, CHAMP, Ресурс-ДК, в том числе по интенсивности потоков высыпаний энергичных частиц радиационных поясов Земли [1, 2].

Особый интерес к исследованиям инициированных магнитных пульсаций обусловлен тем, что нагревные стенды предполагалось использовать для регулирования радиационной обстановки в ОКП путем модификации морфологии термодинамических и электромагнитных характеристик облучаемых областей ионосферы. Эти области становятся вторичными источниками возмущений космической плазмы и радиационных поясов Земли.

К тому же энергия искусственного нагрева ионосферы значительно меньше энергии, выделяемой в результате эволюции инициируемого ионосферного возмущения. Поэтому в ходе экспериментов проводится активный поиск резонансных эффектов в эволюции инициируемых плазменных возмущений с помощью подбора режимов мощности, частоты, поляризации и продолжительности электромагнитного излучения нагревных стендов.

Одним из важных результатов экспериментов с нагревными стендами является создание аномальной проводимости в силовой трубке магнитного поля, опирающейся на область нагретой ионосферы. При этом меняется структура магнитных пульсаций и ионосферных токов. Поэтому

практическая значимость воздействия мощного коротковолнового излучения нагревных стенов на характеристики магнитных пульсаций может определяться эффектами в диапазоне порядка  $10^{-5} \text{ с}^{-1}$ , где диагностируются индексы возмущенности магнитного поля Земли.

Известно более двух десятков разных подходов к оцениванию индексов геомагнитной активности [3]. Среди планетарных индексов геомагнитной активности наибольшее распространение получили индексы Kp, Dst и AL-индекс. Для вычисления планетарных индексов геомагнитной активности в основном используются данные геомагнитных обсерваторий, расположенных в субавроральной зоне.

Планетарная геомагнитная активность, характеризуемая Kp индексом, определяется, в основном, вариациями z-компоненты межпланетного магнитного поля (ММП), плотностью и скоростью солнечного ветра. Кроме суточного планетарного индекса геомагнитной активности используется также трёхчасовой планетарный индекс геомагнитной активности – k<sub>p</sub>, который также характеризует изменение солнечной корпускулярной вариации, под действием которой происходит формирование и распад токовых систем в ионосфере.

K-индекс выражается в баллах и принимает значения от 0 до 9. Величина 9 соответствует очень сильному геомагнитному возмущению. Амплитуда геомагнитного возмущения зависит от широты места наблюдения. Максимальная амплитуда наблюдается в зоне полярных шапок.

K-шкала является квазилогарифмической. Значению K=9 соответствует возмущение около 2500γ в зоне полярных сияний и около 300γ в низких широтах (исключая экватор). Верхний предел амплитуды для балла K=0 получается путём умножения нижнего предела амплитуды балла K=9 на коэффициент 0.01. Верхние пределы амплитуд от 2 до 8 баллов получаются путём умножения верхнего предела амплитуды балла K=0 на множители 2, 4, 8, 16, 24, 40, 64.

Всего существует 12 различных шкал с разными нижними пределами для K=9. Каждая обсерватория обязательно указывает нижний предел для K=9, выделяя одну из двенадцати шкал, которая используется для вычисления K-индекса.

Учитывая изменение проводимости атмосферы в области нагрева над стеном, а также инициирование магнитных пульсаций, k<sub>p</sub> индекс представляет особый интерес для оценки практической значимости и исследования геофизических приложений нагревных эффектов в ОКП. Если эффект будет обнаружен, то его можно верифицировать по базам данных региональных k<sub>p</sub> индексов, которые, к сожалению, не полны. К тому же геомагнитные обсерватории находятся достаточно далеко от существующих нагревных стенов.

При анализе вариаций k<sub>p</sub> индекса во время нагрева использовался метод «наложения эпох» [4-6]. Интервал наблюдения каждого нагревного эксперимента составлял 60 часов (30 часов до нагрева и 30 часов после

нагрева). Даты и время проведения нагрева были сформированы по данным имеющихся отечественных и зарубежных публикаций (табл. 1).

Табл. 1 - Даты и время проведения экспериментов по нагреву на стенде EISCAT (г. Тромсе, Норвегия)

№ п/п	Дата	Время (UT)
1	22.02.1999	21.20 – 22.20
2	24.02.1999	00.00 – 00.40
3	29.03.1999	21.40 – 22.20
4	09.04.1999	02.00 – 02.40
5	24.04.1999	02.20 – 03.10
6	07.05.1999	00.00 – 01.00
7	16.02.1996	21.00 – 22.20
8	07.10.1998	17.00 – 19.20
9	18.10.2000	16.16 – 16.30
10	19.10.2000	16.03 – 16.30
11	06.03.2003	20.10 – 21.30
12	07.03.2003	20.00 – 21.20
13	07.10.1999	19.00 – 20.00
14	30.10.1996	12.30 – 13.00
15	17.02.1996	20.00 – 22.30
16	16.02.1996	20.00 – 23.00

Для временных интервалов, выбранных относительно событий нагрева, анализировалось поведение  $kr$  индекса, обобщенный портрет которого приведён на рис. 1.

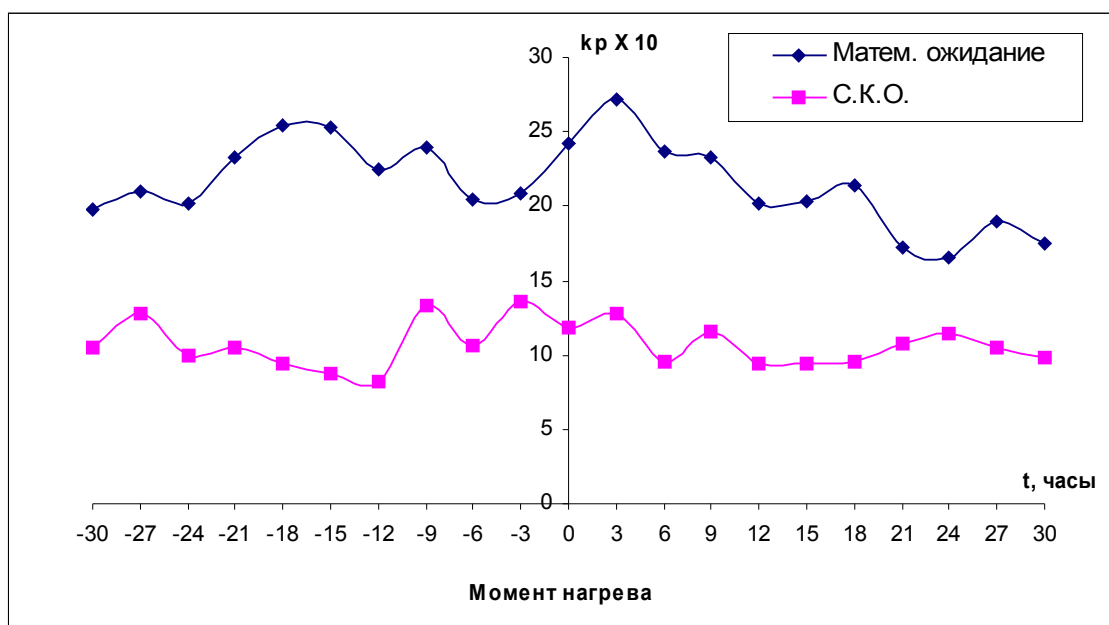


Рис. 1 – Изменение осредненных оценок  $kr$  индекса по 16 случаям нагрева

В течение трех часов после нагрева увеличивается значение  $kr$  индекса с последующей тенденцией к снижению и упорядочиванием вариаций. Как в

момент нагрева, так и в ближайшие 18 часов после нагрева оценка дисперсии не увеличивается, а оценка коэффициента вариации (рис. 2) минимальна.

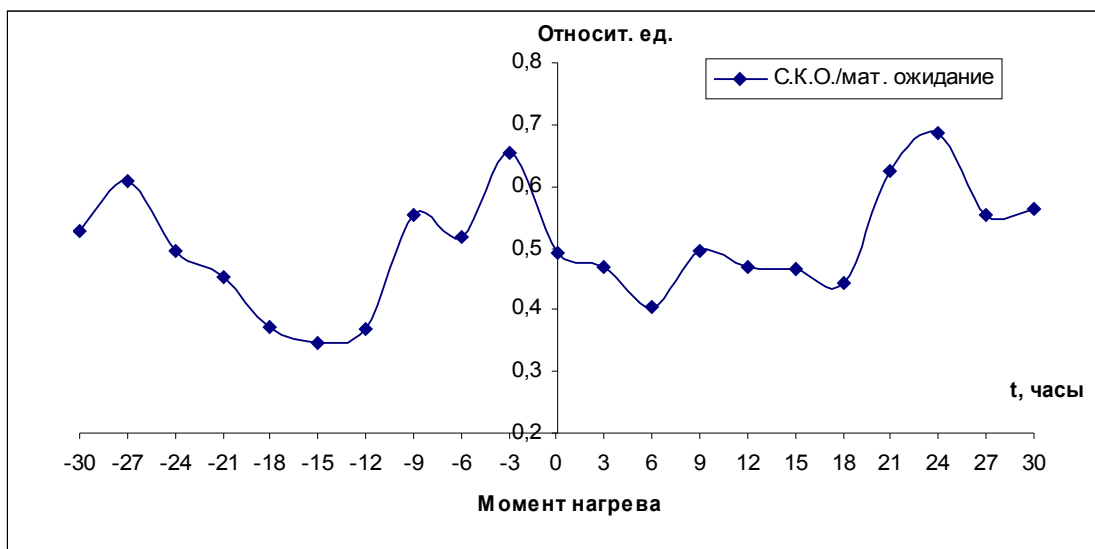


Рис. 2 – Оценки коэффициента вариации  $k_p$  по 16-и случаям нагрева

Кроме того, меняется структура регулярных вариаций, обусловленная, скорее всего, особенностями планирования и проведения экспериментов.

Для диагностики регулярных вариаций с помощью быстрого преобразования Фурье оценивался амплитудный спектр  $S(k_p)$  до и после начала нагрева. Для анализа периодичностей временных процессов удобнее пользоваться не амплитудным спектром, а спектром мощности исследуемой величины. Возведение амплитудного спектра в квадрат и его осреднение по анализируемому временному интервалу позволяет построить периодограмму

мощности:  $G(K_p) = \frac{|S(K_p)|^2}{\tau}$ , где  $\tau$  - длительность временного окна.

Периодограммы вариаций амплитуды и мощности  $k_p$  индекса приведены соответственно на рис. 3.

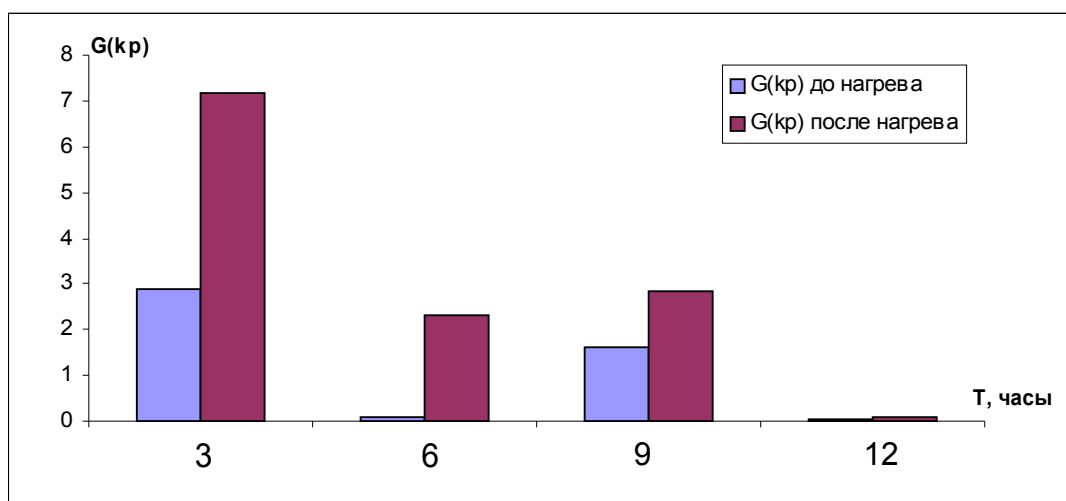


Рис. 3 – Периодограмма осредненных оценок вариаций мощности  $k_p$  индекса до и после нагрева

Наиболее значимые изменения в спектре связаны с вариацией шестичасовой гармоник. Её амплитуда после нагрева увеличивается более чем в 3 раза. Понятно, что этот результат требует дополнительной проверки.

Для анализа статистической значимости выявленных различий в амплитудах спектральных гармоник до и после нагрева использовались методы непараметрической статистики и критерии Уилкоксона и Sign-теста.

Критерий Уилкоксона относится к ранговым критериям и предназначен для проверки гипотезы о том, что две выборки извлечены из общей генеральной совокупности. Данную гипотезу отвергают, если полученное значение статистики значимо отклоняется (влево или вправо) от своего ожидаемого значения. Sign-тест представляет собой разновидность t-теста, применяемого в случае, когда закон распределения случайной величины не известен. Потеря информации, которая происходит при переходе к рангам или знакам наблюдений, компенсируется широтой применений и устойчивостью статистических выводов относительно выводов грубых ошибок, неточностей моделей и т.п.

С использованием критериев Уилкоксона и sign-тест было установлено, что амплитуды спектральных гармоник до и после нагрева не выходят за порог статистической значимости. Для повышения однородности сравниваемых данных был применен метод типизации анализируемых данных. Метод типизации заключался в переводе значения  $k_p$  в значение 3 – если предыдущее значение меньше, 1 – если предыдущее значение больше и 2 – если предыдущее значение равно последующему. Полученные результаты представлены на рис. 4.

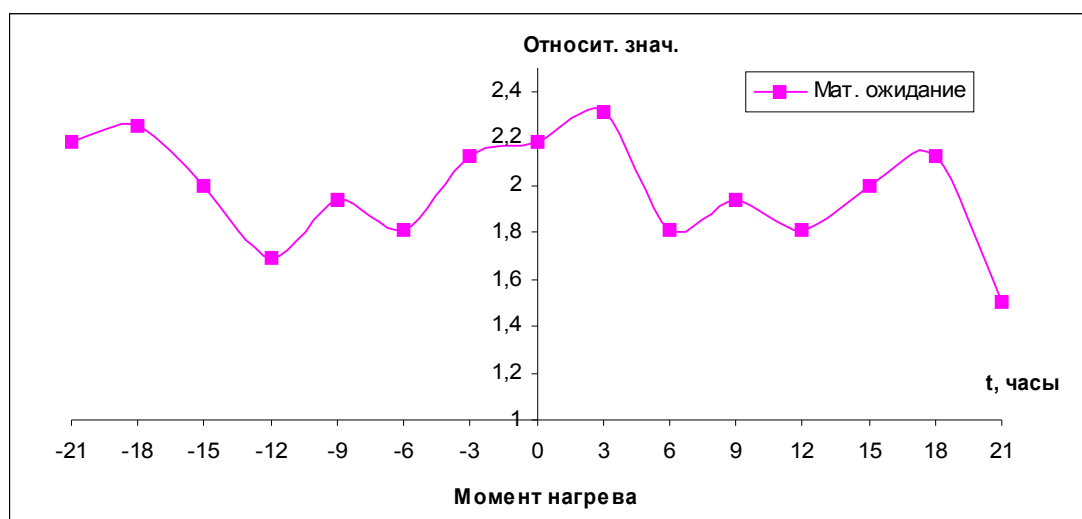


Рис. 4 – Обобщённый портрет поведения  $k_p$  индекса по 16 случаям нагрева, рассчитанный по типизированным значениям

Статистическая значимость различия значений амплитуд спектральных гармоник после типизации с помощью критерия Уилкоксона и sign-теста возросла. Сравнение шестичасовой гармоник до и после нагрева показало

уровень значимости, равный 0,19! По результатам корреляционного анализа вариаций  $Kp$  индексов до и после нагрева и сравнения их с аналогичными коэффициентами корреляций, полученными для случайного набора геомагнитных индексов, подтвердилось выявленное рассогласование на шестой час после начала нагрева.

Полученные результаты соответствуют нагревам в условиях низкой и средней геомагнитной активности, а также для вечернего/ночного времени суток. В случае нагрева в возмущенных геомагнитных условиях меняется физика взаимодействия КВ-излучения станда с ионосферой. Но нагревных экспериментов в условиях геомагнитной возмущённости мало.

На рис. 5 приведён обобщенный портрет поведения  $Kp$  индекса при нагреве в условиях возмущенной геомагнитной активности.

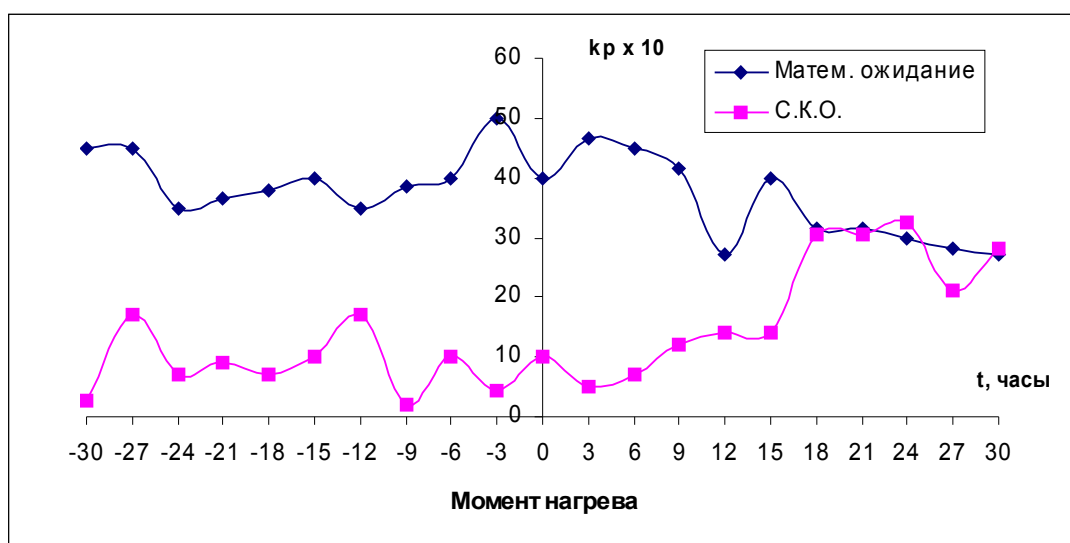


Рис. 5 – Обобщённый портрет поведения  $Kp$  индекса по двум случаям нагрева в условиях высокой геомагнитной возмущённости

К сожалению двух случаев нагрева конечно же мало для анализа возможных эффектов. Требуется тщательная проверка полученных результатов и отличия от невозмущённых условий. Спад геомагнитной активности на рис. 5 начинается на третий час после нагрева. Этот эффект непонятен. Одной из возможных причин данного спада может быть затухание геомагнитных возмущений из-за воздействия на ионосферу и радиационные пояса Земли.

Оценка изменения  $Kp$  индекса в результате нагрева ограничена долями одной градации и оценивается около 5-50  $\gamma$  для слабой магнитной активности и 40-400  $\gamma$  в условиях магнитной возмущенности преимущественно для частотного диапазона  $\sim 6$  часов. Амплитуда сигналов под работающим стандом «Сура» регистрировалась на уровне обнаружения в диапазоне 0,02—0,08 нТ.

Это малые величины, но вместе с сопутствующими инициированными высыпаниями энергичных частиц из радиационного пояса они могут оказать существенное влияние на термодинамическое состояние тропосферы,

особенно при совместном включении нагревных стенов.

Полученные оценки соответствуют результатам экстраполяции имеющихся результатов исследований инициированных магнитных пульсаций над нагревным стеном Тромсё (рис. 6).

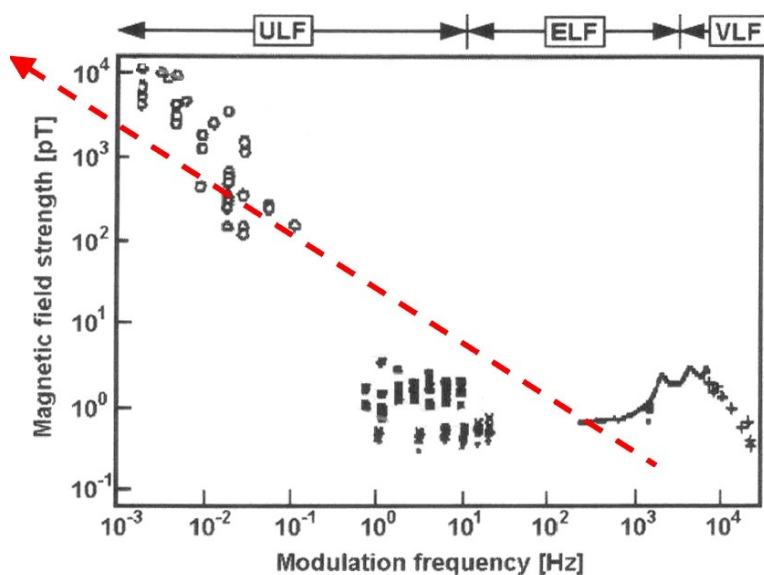


Рис. 6 – Экспериментальные данные (+, o,  $\uparrow$ ) по исследованию спектра низкочастотных вариаций над стеном Тромсё и экстраполяция (красная стрелка) подобранной степенной зависимости

Полученные результаты не отрицают возможности использования нагревного стенов в Тромсё для инициирования возмущений магнитного поля Земли и регулирования радиационной обстановки в ОКП. Если это подтвердится, то можно предположить реальность корректировки морфологии блокирующих ситуаций в тропосфере с помощью работы нагревных стенов.

#### Выводы.

Проведен анализ вариаций геомагнитной возмущенности при нагреве ионосферы над стеном в Тромсё. Несмотря на скудные экспериментальные данные, выявлены значимые изменения в вариациях шестичасовой гармонике характеристик магнитной возмущенности. Её амплитуда после нагрева увеличивается более чем в 3 раза. Однако этот результат требует дополнительной проверки.

#### Благодарности.

Автор выражает особую благодарность Платонову Василию Валентиновичу за подготовку данных, помощь в проведении расчетов и полезные дискуссии.

## Список литературы

1. Тертышников А.В., Большаков В.О., Скрипачев В.О. Эксперименты по диагностике плазменных возмущений в трубке магнитного силового поля Земли по сигналам навигационных космических аппаратов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 7, № 3. – М.: ООО «ДоМира», 2010. С. 110-114.
2. Тертышников А.В., Смирнов В.М., Фролов В.Л. и др. Оценивание восстановленных по сигналам НКА ГЛОНАСС/GPS профилей электронной концентрации в ионосфере // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 7, № 3. – М.: ООО «ДоМира», 2010. С.115-119.
3. Заболотная Н.А. Индексы геомагнитной активности: Справочное пособие. – М.: Издательство ЛКИ, 2007. 88 с.
4. Тертышников А.В. Основы мониторинга чрезвычайных ситуаций. Учебное пособие. – Москва, 2011. 261 с.
5. Тертышников А.В. Сейсмоозонные эффекты и проблема прогнозирования землетрясений. – СПб.: ВИКА, 2000. 304 с.
6. Тертышников А.В. Организация прогнозирования природных чрезвычайных ситуаций. Учебное пособие. – Москва, 2011. 268 с.