

# **РАСПРОСТРАНЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ СТЕНДА SPEAR И ЕГО ВОЗДЕЙСТВИЕ НА СРЕДУ ОБЛАСТИ НАГРЕВА**

***К.И. Горелый***

Для разных геофизических условий исследована динамика принимаемых геофизической обсерваторией (ГФО) ИДГ РАН «Михнево» сигналов от нагревного стенда SPEAR (арх. Шпицберген) и вариации магнитного поля в окрестностях работающего нагревного стенда. Показано, что прохождение радиоволн от стенда на трассе Шпицберген–Михнево наблюдается только в магнитно-спокойных условиях. Во время работы нагревного стенда по границе области нагрева в ионосфере генерируется поляризационный ионосферный ток.

## **Введение и постановка задачи**

На сайте [<http://www.ion.le.ac.uk/spear/>] представлены протокольные данные проведения работ по нагреву ионосферы на стенде SPEAR в октябре 2008 г., которые использованы как исходные документы при исследовании нагревных эффектов в ионосфере.

Задача настоящей работы состоит из двух частей:

- изучение влияния естественного состояния среды на прохождение радиоволн нагревного стенда на трассе арх. Шпицберген–Михнево;
- изучение влияния нагревных радиоволн на среду.

**Часть 1 задачи.** Как показано в ссылке [<http://www.ion.le.ac.uk/spear/technical.html>], при работе стенда в режиме нагрева греющие радиоволны достаточно быстро ослабевают на территории арх. Шпицберген и его ближней акватории, что связано с максимальным излучением передатчика в околосенитную область и ослаблением излучения в боковые лепестки антенны. Географические координаты стенда  $\varphi = 78,154\text{N}$ ,  $\lambda = 16,055\text{E}$ , рабочая частота 4450 кГц, дальность от ГФО «Михнево» 2750 км, азимут от «Михнево» на стенд составляет  $350^\circ$ . Это односкачковая трасса с вершиной над севером Скандинавии, которая ограничена верхним и нижним лучом излученных радиоволн. Геофизическая обстановка на этой территории определяет прохождение радиоволн нагревного стенда на используемой трассе. Для контроля состояния ионосферы в области вершины скачка использованы данные ионосферного зондирования в Тромсо.

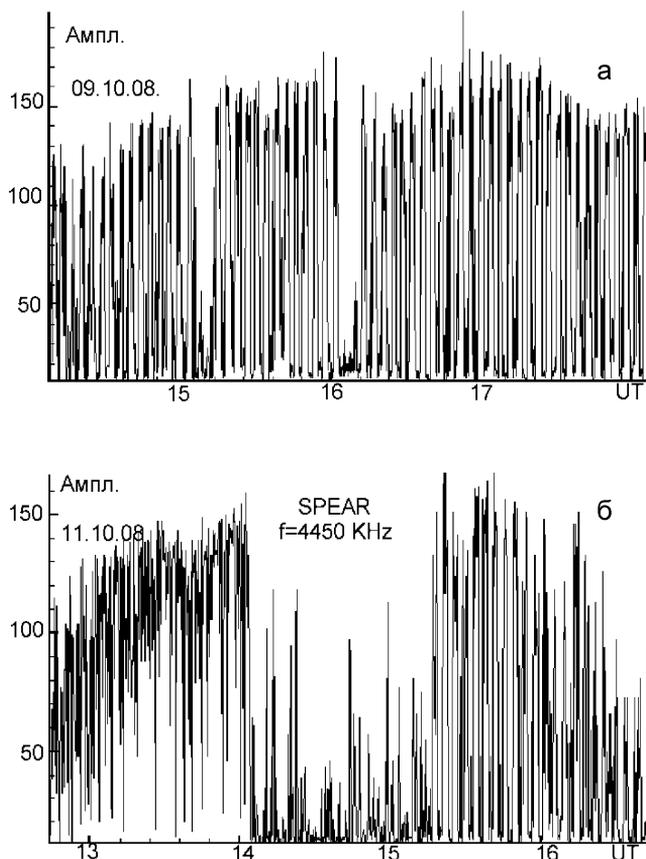
**Часть 2 задачи.** Понятие среды включает в себя высокоширотную ионосферу, возмущенную естественным и техногенным источниками. Практически все естественно возмущенные ионосферные параметры взаимосвязаны и характер их связи достаточно известен. Это позволяет использовать для описания состояния возмущенной среды один из имеющихся и доступных параметров. Таким параметром состояния среды являются вариации магнитного поля на магнитометрах Hornsund (HOR) и Longyearbyen (LYR) – арх. Шпицберген.

## Влияние среды на прохождение радиоволн нагревного стенда SPEAR

Для контроля уровня сигналов нагревных стендов в ГФО «Михнево» используется сканирующий радиоприемник IC R75, управляемый программой радиомониторинга. Приемная антенна представляет собой вертикальный штырь высотой 10 м с круговой диаграммой направленности. Все известные рабочие частоты нагревных стендов занесены в банк частот приемника R-75, работающего в патрульном режиме со сканированием банка частот каждые 15 секунд. В предлагаемом анализе использованы результаты измерения уровня сигналов на приемнике R-75, полученные во время нагрева ионосферы стендом SPEAR.

Для анализа динамики принимаемого в «Михнево» сигнала нагревного стенда в разных геофизических условиях отобраны данные измерений при двух однотипных режимах нагрева. Нагрев производился О-модой с включением/выключением передатчиков (+2/–2 мин) на частоте  $f = 4450$  кГц 09 октября 2008 г. с 14:00 UT до 18:12 UT и 11 октября 2008 г. с 12:44 UT до 16:35 UT. Результаты измерений уровня принятых сигналов приведены на рис. 1.

Геофизическую обстановку 09.10.08. можно характеризовать как спокойную – АЕ-индекс не превышал 30 нТ, ( $\Sigma Kp = 1$ ), вариации магнитного поля ( $dX$ ) на арх. Шпицберген были в пределах  $\pm 20$  нТ и наблюдались на начальном этапе нагрева. На этом этапе наблюдались пониженные амплитуды принятых сигналов нагрева, хотя, согласно протоколу, мощность излучения передатчиков нагревного стенда была неизменной (два провала амплитуды сигнала относятся к документированным технологическим отключениям передатчиков) (рис. 1, а).



**Рис. 1.** Регистрограммы уровня сигналов, принятых ГФО «Михнево» в спокойных (а) и возмущенных (б) геофизических условиях

Ионосфера в области отражения греющего сигнала (Тромсо) за весь период нагрева схожа со среднеширотной: классические слои F2 с групповым запаздыванием и наличием кратных отражений, что является признаком слабого ионосферного поглощения (рис. 2, а, на котором приведен типичный для сеанса образец ионограммы в Тромсо).

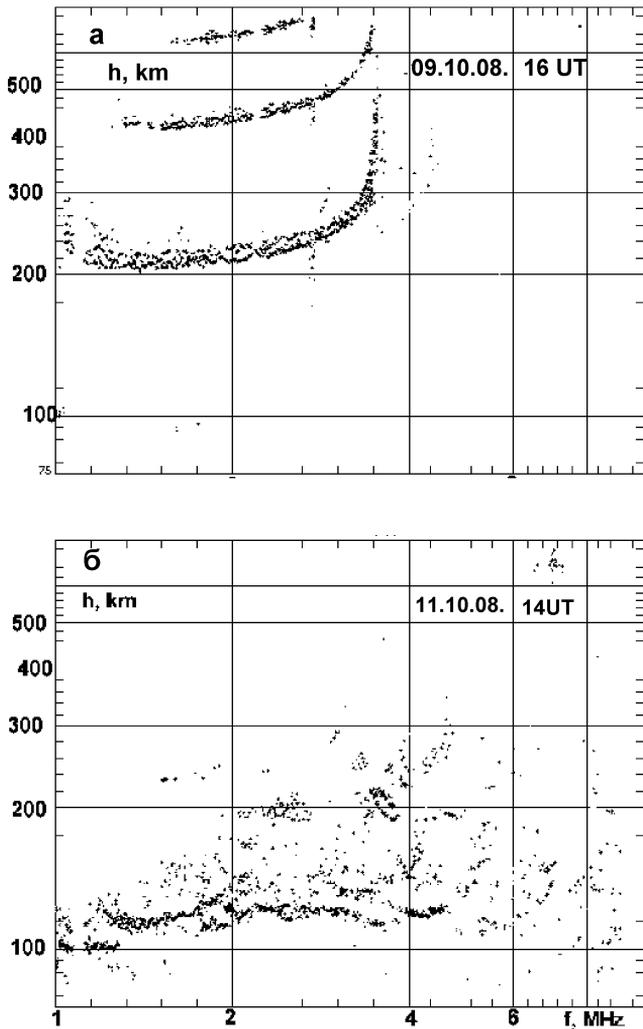
Спокойная ионосферная обстановка в этот день наблюдалась и на ионозонде SPEAR – критическая частота  $f_0F_2 \sim 4,5$  МГц с появлением после 16:42 UT плоского полупрозрачного E-слоя.

День 11.10.08. был умеренно возмущенный: AE-индекс превышал 700 нТ, ( $\Sigma Kp = 30$ ), возмущение на скандинавской сети магнитометров наблюдалось в интервале 13–15 UT ( $dX = 100\text{--}300$  нТ), на арх. Шпицберген  $dX$  было отрицательным и достигало  $-350$  нТ. Смена знака  $dX$  указывает на развитие ионосферной токовой системы, состоящей из восточной струи над Скандинавией и западной – над арх. Шпицберген (светлая и темная заливка на рис. 3, соответственно), разделенных «дневным» разрывом Харанга.

Геомагнитная обстановка во время этого сеанса (рис. 3) определялась полным развитием суббури [Акасофу, 1971] с максимумом в 14 UT, заключительной фа-

зой и подготовительной фазой следующей суббури, которая получила полное развитие после 17 UT. Известно, что на заключительной фазе суббури в авроральную ионосферу обычно высыпаются жесткие частицы, способные ионизовать D-область ионосферы и приводящие к росту поглощения радиоволн. Последующая подготовительная фаза следующей суббури характеризуется мягкими высыпаниями и слабым поглощением, что позволило обнаружить сигналы стенда на последней трети сеанса нагрева.

Ионограммы, полученные в Тромсо (образец на рис. 2, б), характеризуются наличием сильно рассеянных отражений от E-области, которые экранируют слой F. При этом минимальная частота слоя E не превышает 1,5 МГц, что исключает наличие сильного поглощения радиоволн.



**Рис. 2.** Пример ионограмм Тромсо для двух сеансов нагрева стенда SPEAR в спокойных (а) и возмущенных (б) геомагнитных условиях

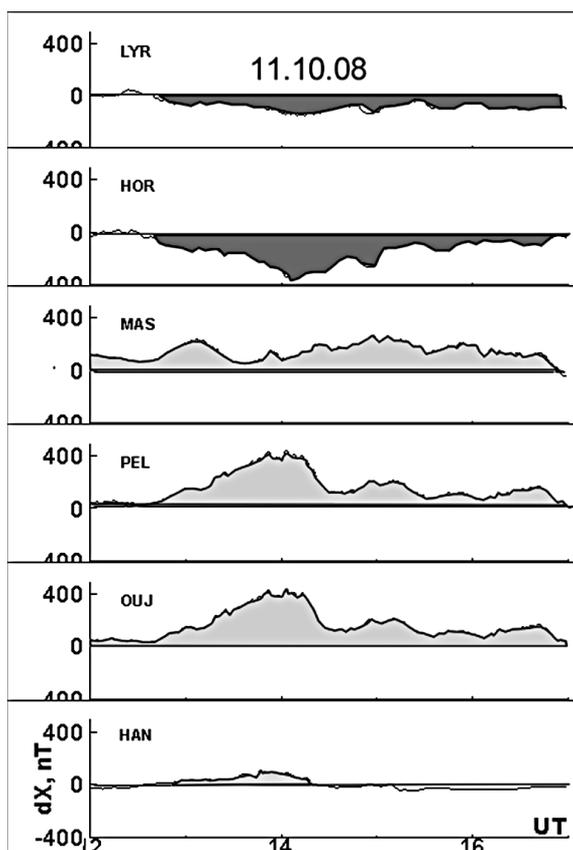


Рис. 3. Вариации горизонтальной составляющей ( $dX$ ) на меридиане станда SPEAR во время нагрева 11.10.08

На ионограммах SPEAR до 16:10 UT (с перерывом от 13:38 до 15:14 UT) отражения полностью отсутствовали, что, с учетом высокой геомагнитной активности, можно считать результатом полного ионосферного поглощения. В остальное время сеанса на ионограммах SPEAR наблюдался слой  $f_oF_2 \sim 4,5$  МГц.

Режим работы станда 11.10.08. строго выдерживался на протяжении всего сеанса, но манипулированный сигнал на приемнике R-75 обнаруживался (рис. 1, б) только на заключительной трети сеанса с 15:15 до 16:00 UT. Математическая обработка сигнала методом наложения эпох (эпоха 240 с – цикл нагрева) не помогла обнаружить цикличность работы станда на первых двух третях сеанса.

Из рассмотренных двух ситуаций можно заключить, что уверенное прохождение радиоволн нагревного станда на частоте 4450 кГц вдоль трассы длиной 2750 км, проходящей через авроральный овал, обеспечивается только в спокойных геофизических условиях и на подготовительной фазе суббури. Малейшие возмущения среды приводят к ослаблению принимаемого сигнала и его структуры. На фоне главной и, особенно, заключительной фазы суббури наблюдается полное про падание сигнала нагревного станда, что соответствует классическому развитию ионосферной суббури. Причиной про падания сигнала в рассматриваемом случае является ионосферное рассеяние и уход сигнала в волновод между слоями E и F.

## Влияние излучения нагревного стенда на среду

В настоящем разделе анализируются данные вариаций магнитного поля двух станций на арх. Шпицберген–LYR (в непосредственной близости от нагревного стенда SPEAR) и HOR (в 130 км к югу от стенда). Исходя из геометрии области нагрева (азимут  $184^\circ$  и зенитный угол  $8^\circ$ ) центр пятна нагрева находился на середине отрезка прямой, соединяющего два магнитометра.

По данным измерений вариаций магнитного поля построены эквивалентные токи, представляющие собой тонкий токовый провод с величиной тока, его направлением и удалением от магнитометра, соответствующие трем компонентам ( $dX$ ,  $dY$  и  $dZ$ ) магнитограмм в нТл. Алгоритм вычисления параметров однопроводного эквивалентного тока в ионосфере (высота  $h = 110$  км) базируется на правиле правого винта – ток в прямом проводе создает магнитное поле вокруг провода. По трем измеренным компонентам вариаций магнитного поля на наземном магнитометре вычисляются направление тока ( $\alpha$ , в градусах), отсчитываемое от геомагнитного севера, зенитный угол на ток ( $\beta$ , в градусах), отсчитываемый от зенита и сила эквивалентного тока ( $I$ , в А). По заданной высоте тока и зенитного угла на ток вычисляется дальность по земле до проекции эквивалентного тока ( $L$ , км). Расчетные формулы:

$$\alpha = 90^\circ + \arctg(dY/dX) \text{ при } dX > 0 \quad (1a)$$

$$\alpha = 270^\circ + \arctg(dY/dX) \text{ при } dX < 0 \quad (1б)$$

$$\beta = \arctg(dZ/(dY^2 + dX^2)^{1/2}) \quad (2)$$

$$I = 20\pi((dY^2 + dX^2 + dZ^2)^{1/2})/\cos\beta \quad (3)$$

$$L = (\pi R/180) * (\beta - \arcsin(R * \sin\beta)/(R + h)), \text{ где } R - \text{ радиус Земли} \quad (4)$$

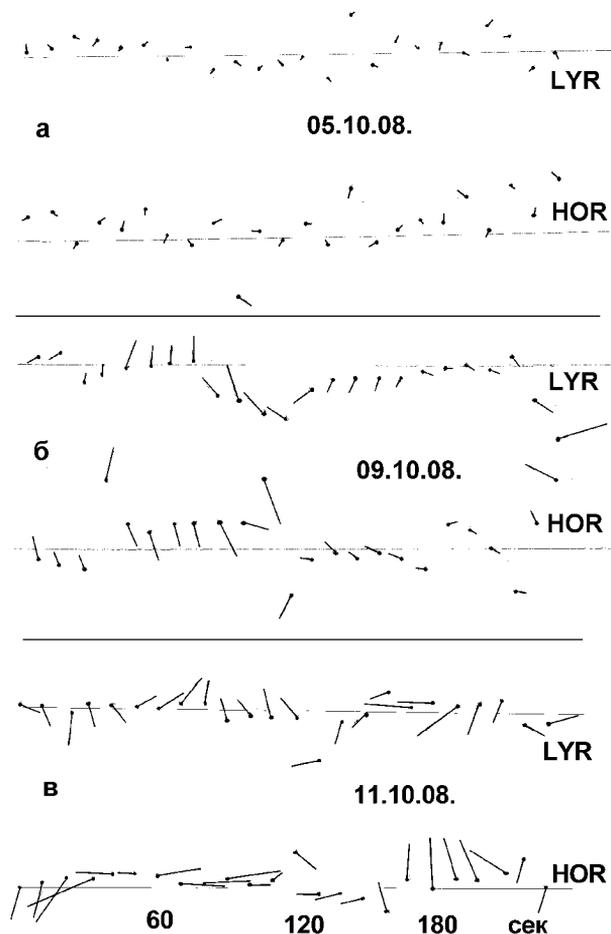
Данные трехкомпонентных магнитометров с шагом опроса 10 сек. и точностью отсчета 0,1 нТ, полученные от [<http://www.space.fmi.fi/image/>], предварительно обработаны методом скользящего медианного сглаживания. Для дальнейшего анализа использовались остатки сглаживания с применением метода наложения эпох, результаты показаны в пространственно-временном виде (рис. 4). Жирной точкой в начале каждого токового вектора, показывающего величину и направление тока, обозначено положение эквивалентного тока на пространстве между магнитометрами LYR и HOR.

Для построения рисунка обрабатывались 75 эпох в спокойный день 09.10.08. и 60 эпох в возмущенный день 11.10.08. Аналогичной обработке был подвергнут массив данных за день 05.10.08. со слабой возмущенностью ( $\Sigma Kp = 9$ ), когда нагрев ионосферы не производился (рис. 4, а) – контрольный день.

Результирующие графики в спокойный день без нагрева (рис. 4, а) не проявляют никакой закономерности, отмеченной для следующих дней с нагревом. В дни с нагревом (рис. 4, б, в) по сравнению с невозмущенным днем возрастает величина токовых векторов.

В спокойный день с нагревом (рис. 4, б) наблюдается смена направления токовых векторов во время нагрева (0–120 с) и после его прекращения (120–240 с) на каждом магнитометре. При этом направление тока для двух магнитометров во время нагрева противоположно, что указывает на существование токов растекания из нагретой области. Заметим, что токовые векторы располагаются в околозенитной

области над магнитометрами, что свидетельствует о широкой токовой полосе над регионом. На момент смены режима нагрева (120 с) формируется токовая струя, стремящаяся занять положение в центре пятна нагрева, а пространственная смена знака векторов в этот момент указывает, что токовая система имеет вихреобразную структуру.



**Рис. 4.** Токовые векторы над арх. Шпицберген в контрольный день (а) и во время работы нагревного стенда SPEAR в спокойных (б) и возмущенных (в) условиях

Для магнитно-возмущенного дня (рис. 4, в) описанная выше картина (рис. 4, б) проявляется только во время смены режима нагрева, что может быть связано с тем, что измерения производились на фоне подготовленной магнитной бури ионосферы и вклад нагревного стенда оказывается мал.

Наблюдаемые изменения направления токовых векторов можно объяснить исходя из следующих соображений.

1. Особенностью плазмы, находящейся в магнитном поле, является анизотропный характер ее проводимости [Фаткуллин, 1970]. Максимум проводимости Холла

лежит на  $\approx 20$  км ниже максимума проводимости Педерсена и, в зависимости от высотного распределения ионизации, вариации магнитного поля будут определяться вкладом холловского и педерсеновского тока при фиксированном электрическом поле (направление ионосферного тока будет зависеть от высотного профиля электронной концентрации) [Горелый, Пирог, 1974].

2. Благодаря разогреву в ограниченной области внутри нее возникает модификация ионосферной проводимости с довольно резкими границами, что при наличии естественных электрических полей приводит к возникновению поляризационного эффекта, управляемого проводимостью Каулинга

$$\sigma_k = (\sigma_H^2 + \sigma_P^2) / \sigma_P,$$

где  $\sigma_H$  и  $\sigma_P$  – удельная проводимость Холла и Педерсена, соответственно. Запрещенный горизонтальный ток (из-за разницы проводимости внутри области нагрева и вне ее) может замыкаться через магнитосферу вдоль хорошо проводящих магнитных силовых линий. Такие токи замыкания обнаружены в [Kornienko et al., 2003] при анализе годографов горизонтального вектора магнитного поля ( $dX$ ,  $dY$ ) и трактуются авторами как альвеновские волны.

### Заключение

Для разных геофизических условий исследованы динамика принимаемых в ГФО «Михнево» сигналов нагревного стенда SPEAR (арх. Шпицберген) и вариации магнитного поля в окрестностях работающего нагревного стенда. Показано, что прохождение радиоволн стенда на трассе Шпицберген–Михнево наблюдается только в магнитно-спокойных условиях. Во время работы нагревного стенда по границе области нагрева в ионосфере генерируется поляризационный ионосферный ток.

### Литература

- Акасофу С.И. Кн.: Полярные и магнитосферные суббури. М.: Мир, 1971, 314 с.
- Горелый К.И., Пирог О.М. Зависимость направления тока в электроджете от профиля электронной концентрации. // Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца: вып. 34. М.: Наука, 1974, с. 89–92.
- Kornienko V.A., Blagoveshchenskaya N.F. et al. Modification of the local substorm ionospheric and field-aligned currents produced by the Tromsø heating facility. International journal of geomagnetism and aeronomy, 2003, vol. 4, No 1, pages 37–46.
- Фаткулин М.Н. Ионосферная проводимость // Геомагнитные исследования, 1970, № 12, с. 5–25.
- <http://www.ion.le.ac.uk/spear/>  
<http://www.space.fmi.fi/image/>