

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФАЗОВЫХ СКОРОСТЕЙ УНЧ ГЕОМАГНИТНЫХ ВАРИАЦИЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Ю.А. Копытенко, В.С. Исмагилов, М.С. Петрищев, А.Л. Котиков, П.Е. Терещенко, А.В. Петленко,  
Д.Б. Зайцев, Д.Ю. Сарычев, Г.М. Попов

СПбФ ИЗМИРАН, г. Санкт-Петербург, e-mail: office@izmiran.spb.ru

**Аннотация.** Для обнаружения глубинных аномалий электропроводности земной коры в районе п. Толвуя (Карелия) проведены синхронные наблюдения вариаций электромагнитного поля Земли. В этом районе наблюдаются выходы высокопроводящих шунгитоносных пород на земную поверхность. В процессе эксперимента были установлены 5 высокочувствительных трехкомпонентных магнитовариационных станций GI-MTS-1 разнесенных на 5-10 км друг от друга. Дискретность регистрации данных составляла 50 Гц. Для исследования изменения кажущегося удельного сопротивления с глубиной на всех 5 пунктах выполнена обработка данных двумя методами - магнитотеллурического (МТЗ) и фазово-градиентного зондирования (ФГЗ). Метод ФГЗ разработан в СПбФ ИЗМИРАН и для его применения необходимо наличие трех магнитовариационных станций расположенных треугольником на земной поверхности. Сопоставление результатов интерпретации методов МТЗ и ФГЗ показало хорошее их соответствие.

### Описание эксперимента

Для обнаружения глубинных аномалий электропроводности земной коры в районе п. Толвуя (Карелия) в 2012 г. сотрудниками СПбФ ИЗМИРАН проведены синхронные наблюдения вариаций электромагнитного поля Земли. В этом районе наблюдаются выходы высокопроводящих шунгитоносных пород на земную поверхность. В процессе эксперимента были установлены 5 высокочувствительных трехкомпонентных магнитовариационных станций GI-MTS-1 разнесенных на 5-10 км друг от друга. На каждой из станций были установлены горизонтальные электрические линии (С-Ю и З-В) длиной 50м. Дискретность регистрации данных составляла 50 Гц. На рис.1 показано расположение пунктов регистрации УНЧ ( $T=0.2-1000$  сек) геомагнитных возмущений во время эксперимента. В течение первой фазы эксперимента магнитовариационные станции были установлены в пунктах 1-5 (кружки на рис.1). Эксперимент продолжался 4 суток. Для исследования изменения кажущегося удельного сопротивления с глубиной на всех 5 пунктах выполнена обработка данных двумя методами - магнитотеллурического (МТЗ) и фазово-градиентного зондирования (ФГЗ). Метод ФГЗ разработан в СПбФ ИЗМИРАН [1-5] и для его применения необходимо наличие трех синхронизированных высокочувствительных магнитовариационных станций расположенных треугольником на земной поверхности.

### Определение кажущегося удельного сопротивления земной коры с помощью фазовых скоростей геомагнитных возмущений (метод ФГЗ)

Длина электромагнитной волны  $\lambda$  (в км) с периодом  $T$  (в сек) в среде с удельным сопротивлением  $\rho$  (в Ом·м) определяется следующим образом [6]:

$$\lambda = \sqrt{10\rho T} \quad (1)$$

Используем [1] и определим фазовую скорость (в км/с) распространения геомагнитных вариаций в среде следующим образом:

$$V_{ph} = w/k = \lambda/T = \sqrt{10\frac{\rho}{T}} \quad (2)$$

Из (2) для величины удельного сопротивления среды (в Ом·м) получаем:

$$\rho = 0.1V_{ph}^2 T \quad (3)$$

В геоэлектрике для определения величины кажущегося удельного сопротивления среды часто применяют следующее выражение:

$$\rho = 0.1 Z_a^2 T \quad (4)$$

В (4)  $Z_a=E/B$  – имеет размерность скорости (в км/с) как и в [3] и пропорциональна импедансу, который определяется как отношение  $E/H$ .

Используя выражение (3) можно определить удельное сопротивление среды, если известна фазовая скорость распространения электромагнитной волны вдоль земной поверхности. Для определения вектора фазовой скорости вдоль земной поверхности необходимо наличие трех магнитовариационных станций расположенных треугольником и разнесенные на 3-10 км друг от друга. Фазовая скорость между парами станций в треугольнике определяется следующим образом [1-4]:

$$V_{12} = 2\pi f d_{21} / \ln \frac{B_1(t)}{B_2(t + \tau_{12})} \quad (5a)$$

$$V_{13} = 2\pi f d_{31} / \ln \frac{B_1(t)}{B_3(t + \tau_{13})} \quad (5б)$$

Здесь  $f$  – частота вариаций,  $d_{21}=x_2-x_1$  – расстояние между двумя точками на земной поверхности,  $B_1, B_2$  и  $B_3$  – значения индукции магнитного поля в момент времени  $t$ ,  $\tau_{12}$  и  $\tau_{13}$  – фазовые задержки при использовании соответствующих пар станций в треугольнике. Зная фазовые скорости  $V_{12}$  и  $V_{13}$  можно определить вектора фазовой скорости и градиента вдоль земной поверхности:

Для вектора фазовой скорости вдоль земной поверхности азимут направления и модуль вектора:

$$\alpha = \arctg \frac{V_{12} \cos(a_1) - V_{13} \cos(a_2)}{V_{12} \sin(a_1) + V_{13} \sin(a_2)}$$

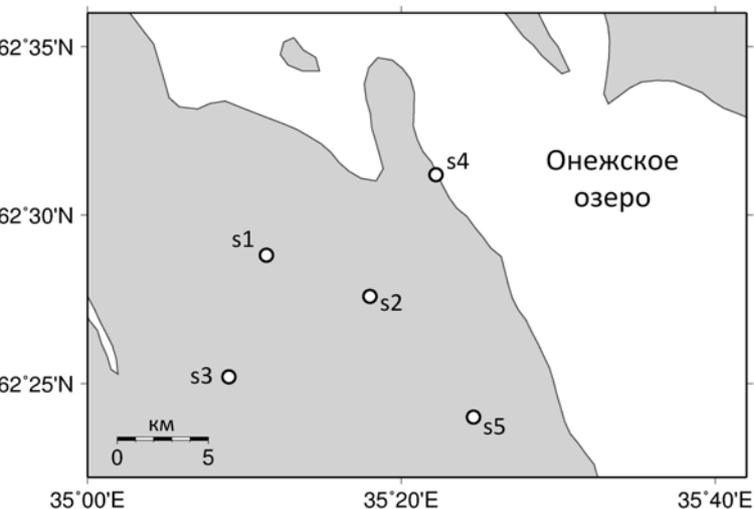
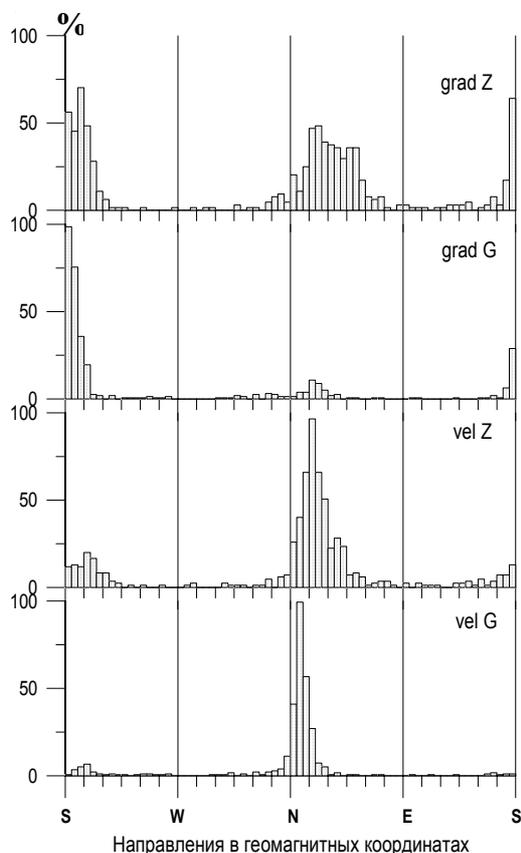
$$|V| = V_{12} \cos(\alpha + a_1) \quad (6)$$

Для вектора градиента вдоль земной поверхности азимут направления и модуль вектора:

$$\alpha = \arctg \frac{G_{13} \cos(a_1) - G_{12} \cos(a_2)}{G_{12} \sin(a_1) + G_{13} \sin(a_2)}$$

$$|G| = G_{12} / \sin(\alpha + a_1) \quad (7)$$

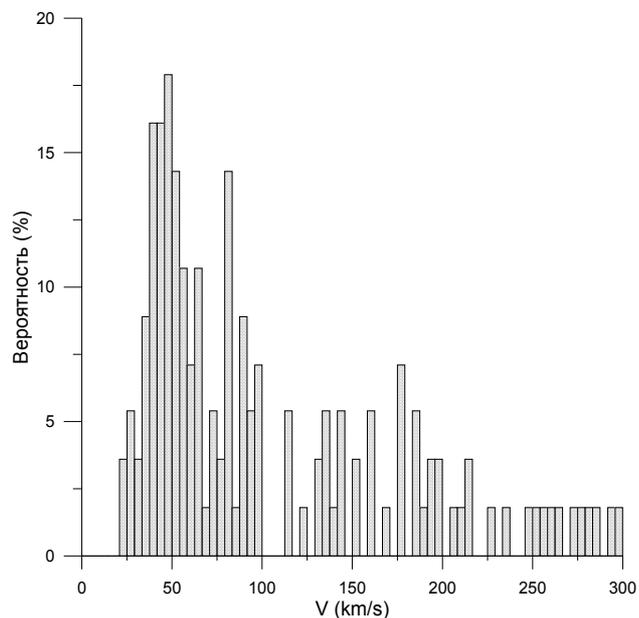
**Рис. 2** Гистограммы вероятностей распределения направлений векторов градиентов и фазовых скоростей полной горизонтальной (G) и вертикальной (Z) компонент геомагнитных вариаций с периодами  $T=10-30$  с.



**Рис. 1** Расположение пунктов регистрации УНЧ геомагнитных возмущений во время эксперимента.

В выражениях (6) и (7)  $V_{12}, V_{13}, G_{12}, G_{13}$  – величины фазовых скоростей и градиентов в направлении между парами магнитных станций 1 и 2, 1 и 3.  $\alpha$  – направление соответствующего вектора относительно оси юг – север,  $|V|$  и  $|G|$  – величины фазовой скорости и градиента вдоль земной поверхности. Углы  $a_1$  и  $a_2$  определяются через координаты магнитных станций 2 и 3 (базовая станция 1 расположена в начале системы координат):  $a_1 = \arctg(x_2/y_2), a_2 = \arctg(x_3/y_3)$ .

Геомагнитные волны распространяются от какого-то источника генерации пульсаций, поэтому вектора фазовой скорости и градиента вдоль земной поверхности, построенные по тройке разнесенных магнитных станций, позволяют определить направление на этот источник (точнее, на его проекцию на земную поверхность). При наличии двух троек разнесенных магнитных станций можно определять местоположение литосферного источника.



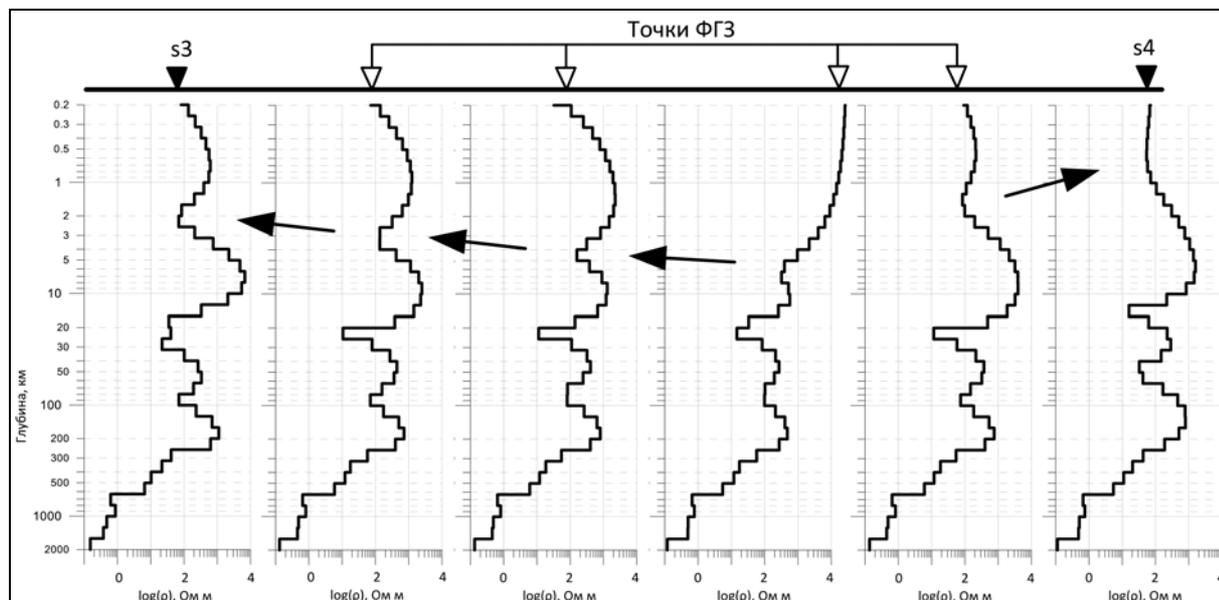
**Рис. 3** Гистограмма вероятности распределения фазовых скоростей Z компоненты геомагнитных вариаций с периодами 7-9 сек.  $T=10-30$  с. Гистограммы строились для треугольника станций 2, 4 и 5 (рис. 1). Расстояние между этими станциями составляло 5–7 км. Для построения гистограмм использовались данные за период времени 17 часов.

Градиенты компонент поля геомагнитных вариаций очень малы при небольшом разноме магнитных станций. При установке трехкомпонентных магнитных станций в полевых условиях очень сложно добиться идеальной соосности разнесенных магнитных датчиков, поэтому построенные градиенты для Н и D компонент будут иметь большую погрешность. Полная горизонтальная компонента не зависит от ориентации магнитных датчиков, а влияние горизонтальных компонент на вертикальную очень мало.

На рис. 2 показаны гистограммы вероятностей распределения направлений векторов градиентов и фазовых скоростей полной горизонтальной (G) и вертикальной (Z) компонент геомагнитных вариаций с периодами.

На рисунке видно, что для векторов градиентов и фазовых скоростей на гистограмме наблюдаются два направления – примерно на юг и примерно на север. Вектора градиентов должны быть направлены к источнику геомагнитных возмущений, а вектора фазовых скоростей – от источника, т.е. со сдвигом азимута направления на  $180^\circ$ , что и наблюдается на рис. 2.

На рис. 3 показана гистограмма вероятности распределения фазовых скоростей Z компоненты геомагнитных вариаций с периодами 7-9 сек.



**Рис. 4** Сравнение результатов зондирования земной коры методами МТЗ и ФГЗ

Основной максимум вероятности в районе ~50 км/сек соответствует направлению вектора примерно на юго-запад. Второй по величине пик около 75 км/сек соответствует направлению векторов фазовых скоростей Z компоненты примерно на северо-восток. Наличие двух максимумов в распределении направлений векторов

градиентов и фазовых скоростей означает наличие двух источников геомагнитных возмущений – на юго-западе и северо-востоке от расположения трех магнитных станций, использованных в эксперименте.

## Обсуждение результатов и заключение

Удельное электрическое сопротивление воздуха составляет  $\sim 10^{13}$  Ом·м, а удельное сопротивление земной среды не превосходит  $10^6$  Ом·м. Вследствие очень большого коэффициента преломления электромагнитная волна, падающая из ионосферы на земную поверхность, преломляется и распространяется в земной коре практически вертикально. Отраженная волна по этой же причине будет распространяться вдоль земной поверхности, даже если траектория выхода волны на поверхность очень мало отклоняется от вертикали. При падении плоской волны на однородную или плоско-однородную земную кору горизонтальная компонента магнитного поля волны будет удваиваться, а вертикальная – практически исчезнет [6]. Тем не менее, вертикальная компонента на земной поверхности наблюдается. Это связано с тем, что волна, отраженная от геоэлектрической неоднородности, распространяется вдоль земной поверхности и уже имеет вертикальную компоненту. Таким образом, Z компонента вариаций возникает в основном благодаря геоэлектрическим неоднородностям земной коры [6].

Фазовая скорость распространения электромагнитной волны вдоль земной поверхности зависит только от геоэлектрических свойств земной коры. Это обусловлено тем, что электромагнитная волна, падающая на земную поверхность через атмосферу, распространяется со скоростью света и ее фазовая задержка между разнесенными на поверхности Земли пунктами близка к нулю. Таким образом, экспериментально наблюдаемые фазовая задержка [2-5] и, следовательно, фазовая скорость распространения, а также градиенты вертикальной компоненты магнитного поля вариаций вдоль земной поверхности обусловлены особенностями геоэлектрического строения земной коры. Градиенты горизонтальной компоненты в основном отражают свойства ионосферных источников УНЧ возмущений.

Методом теллурического зондирования (МТЗ) определялось кажущееся удельное сопротивление земной коры на каждой магнитной станции и строилось его изменение с глубиной. Для сравнения с результатами МТЗ по величине фазовой скорости Z компоненты использовался метод ФГЗ (выражения 3, 5 и 6). На рис.4 показаны результаты сравнения МТЗ и ФГЗ методов вдоль профиля S3-S4 (рис.1). На крайних точках профиля (S3,S4) кривые изменения кажущегося удельного сопротивления с глубиной (примерно до 20 км) строились методом МТЗ. Такие же кривые на внутренних точках профиля (11, 13, 42, 43) строились методом ФГЗ. Эти точки привязаны к центрам треугольников, в углах которых расположены магнитовариационные станции. На больших глубинах кривые дополнялись региональной кривой, полученной методом МТЗ на ближайшей обсерватории.

Сопоставление результатов интерпретации обоих методов показывает их хорошее соответствие. Предварительные результаты обработки позволили выявить ряд проводящих слоев в земной коре на глубинах 2-3 и 15-20 км, вероятно связанных с шунгитоносными горизонтами.

## Список литературы

1. Копытенко Ю.А., Исмагилов В.С., Копытенко Е.А., Воронов П.М., Зайцев Д.Б.. Магнитная локация источников геомагнитных возмущений. // ДАН, серия "Геофизика", т.371, № 5, с. 685-687, 2000.
2. Kopytenko Yu.A., Ismaguilov V.S., Hattori K., Voronov P.M., Hayakawa M., Molchanov O.A., Kopytenko E.A., Zaitsev D.B. Monitoring of the ULF electromagnetic disturbances at the station network before EQ in seismic zones of Izu and Chiba peninsulas. // In: "Seismo Electromagnetics: Litosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling", Eds. M.Hayakawa and O.A.Molchanov, TERRAPUB, Tokyo, pp.11-18, 2002.
3. Ismaguilov V.S., Kopytenko Yu.A., Hattori K., Hayakawa M. Variations of phase velocity and gradient values of ULF geomagnetic disturbances connected with the Izu strong earthquakes.// Natural Hazards and Earth Sys. Sci. v.20, p.1-5, 2002.
4. Kopytenko Yu.A., Ismaguilov V.S., Hattori K., Hayakawa M. Determination of hearth position of forthcoming strong EQ using gradients and phase velocities of ULF geomagnetic disturbances. Phys. Chem. Earth., V.31, p.292-298, 2006.
5. Исмагилов В.С., Копытенко Ю.А., Хаттори К., Хаякава М.. Использование градиентов и фазовых скоростей УНЧ геомагнитных возмущений для определения местоположения очага будущего сильного землетрясения. // Геомагнетизм и Аэронавигация, т.46, №3, стр.423-430, 2006.
6. Ковтун А.А. «Использование естественного электромагнитного поля при изучении электропроводности Земли». // Изд. Ленгосуниверситета, Ленинград, 1980, 195 с.