

ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ЗЕМНОЙ КОРЫ НА БАЗЕ АНАЛИЗА ФАЗОВЫХ СКОРОСТЕЙ УЛЬТРАНИЗКОЧАСТОТНЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ ВАРИАЦИЙ

Аннотация. В данной статье представлены результаты обработки экспериментальных исследований геоэлектрической структуры земной коры проведенных в Карелии. В августе 2012 года в районе п.Толвуя (Карелия) были проведены синхронные наблюдения ультранизкочастотных вариаций (УНЧ) вариаций электромагнитного поля Земли для определения глубинных аномалий электропроводности земной коры. Выбор данного места связан с тем, что в этом районе наблюдаются выходы высокопроводящих шунгитоносных пород на земную поверхность. Для проведения исследований были установлены 5 высокочувствительных трехкомпонентных магнитовариационных станций GI-MTS-1 разнесенных на 5–10 км друг от друга. Частота регистрации данных составляла 50 Гц. Для анализа изменения кажущегося удельного сопротивления с глубиной на всех 5 пунктах была выполнена обработка исходных данных двумя методами — магнитотеллурическим (МТЗ) и фазово-градиентного зондирования (ФГЗ). Метод ФГЗ разработан в Санкт-Петербургском филиале Учреждения Российской академии наук Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН (СПбФ ИЗМИРАН) и для его применения необходимо наличие не менее трех магнитовариационных станций расположенных треугольником на земной поверхности. Сопоставление результатов интерпретации методов МТЗ и ФГЗ показало хорошее их соответствие.

Ключевые слова: геоэлектрическая структура, земная кора, ультранизкочастотная вариация, высокопроводящая шунгитоносная порода, магнитовариационная станция, пункт регистрации, геомагнитное возмущение, удельное сопротивление среды, фазовая скорость, проводящий слой.

Схема эксперимента

На каждой из 5 установленных станций были проложены горизонтальные электрические линии (С-Ю и З-В) длиной 50 м. 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 (красные кружки на рис.1), затем станции из пунктов 1, 2, 4 и 5 были перенесены в точки С1, С3, С5 и С7 (синие кружки на рис.1). Сетка на рисунке состоит из квадратов со стороной 1 км. Первая и вторая фазы эксперимента продолжались 4 и 3 суток соответственно.

Определение кажущегося удельного сопротивления земной коры с помощью фазовых скоростей геомагнитных возмущений

Как известно, длина электромагнитной волны λ (в км) с периодом T (в сек) в среде с удельным сопротивлением ρ (в Ом·м) определяется следующим образом:

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

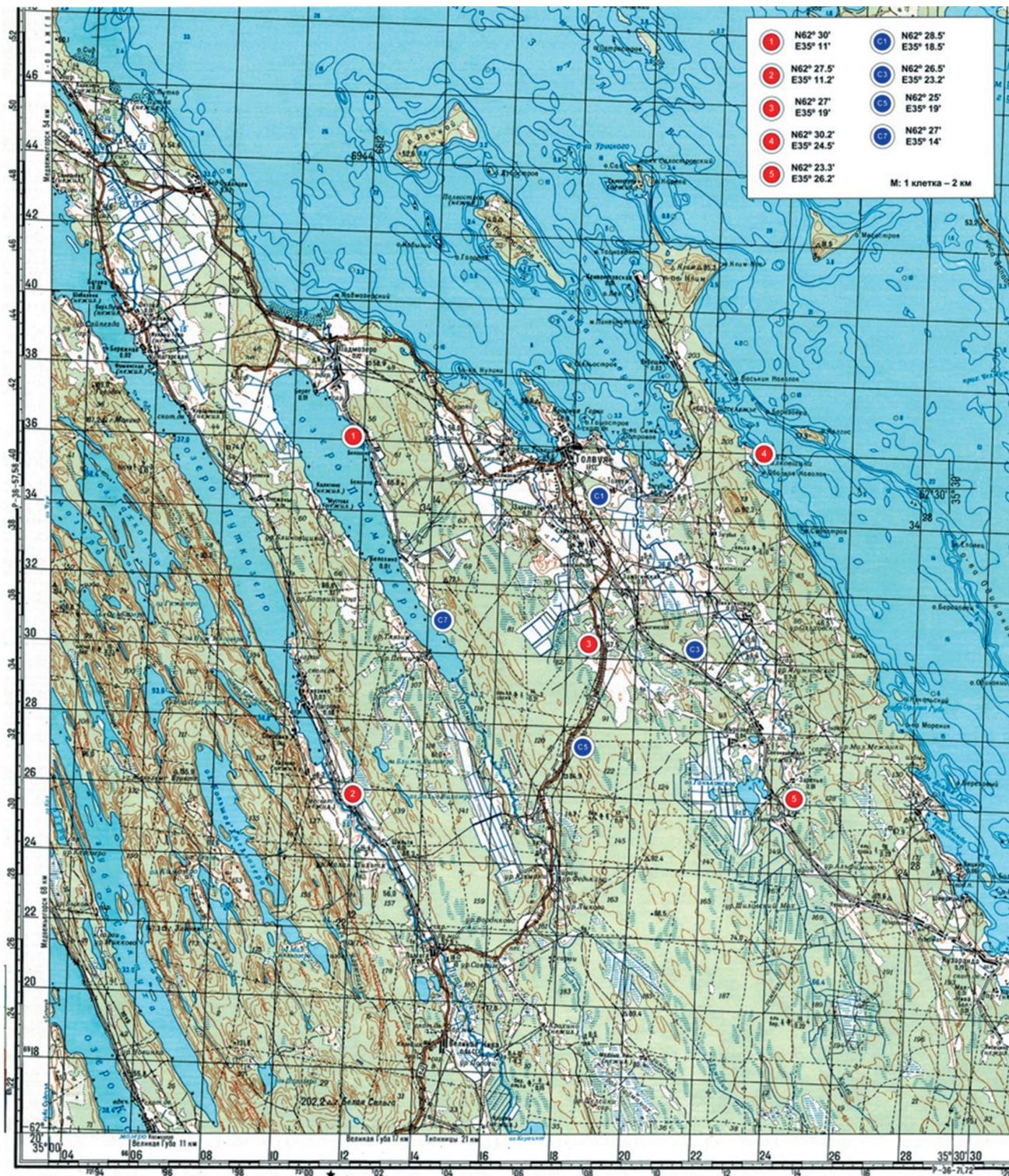


Рис. 1. Расположение пунктов регистрации УНЧ геомагнитных возмущений во время эксперимента.

По определению фазовая скорость (км/с) геомагнитных вариаций в среде определяется следующим образом:

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

Из (2) для величины удельного сопротивления среды ρ получаем:

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

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

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

В (4) $Z=E/V$ (км/с) — величина пропорциональная 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:

$$\begin{cases} V_{12} = \frac{2\pi f d_{21}}{\ln\left(\frac{B_1(t)}{B_2(t + \tau_{12})}\right)} \\ V_{13} = \frac{2\pi f d_{31}}{\ln\left(\frac{B_1(t)}{B_3(t + \tau_{13})}\right)} \end{cases} \quad (5)$$

где f — частота вариаций,

$d_{21}=x_2-x_1$ — расстояние между двумя точками на земной поверхности,

B_1, B_2, B_3 — значения индукции магнитного поля в момент времени t ,

τ_{12}, τ_{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:

$$\begin{cases} \alpha = \arctg[(V_{12} \cos(a_1) - V_{13} \cos(a_2)) / ((V_{12} \sin(a_1) + V_{13} \sin(a_2)))] \\ |V| = V_{12} \cos(\alpha + a_1) \end{cases} \quad (6)$$

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

$$\begin{cases} \alpha = \arctg[(G_{12} \cos(a_1) - G_{13} \cos(a_2)) / ((G_{12} \sin(a_1) + G_{13} \sin(a_2)))] \\ |G| = G_{12} \cos(\alpha + a_1) \end{cases} \quad (7)$$

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. α — 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 позволяют нам определить направление на этот источник (точнее, на его проекцию на земную поверхность).

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

На рис.2 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° , что и наблюдается на рис.2.

На рис.2 показаны гистограммы вероятностей распределения

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

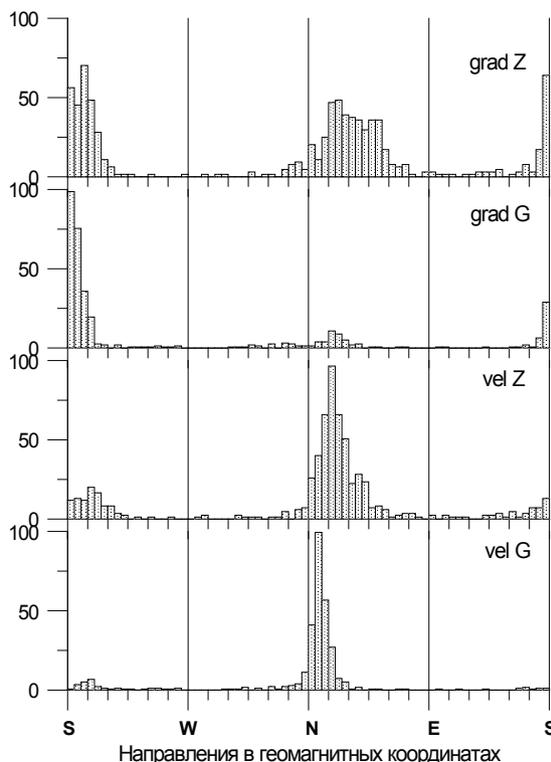


Рис. 2. Гистограммы вероятностей распределения направлений векторов градиентов и фазовых скоростей полной горизонтальной (G) и вертикальной (Z) компонент геомагнитных вариаций с периодами $T=10-30$ с.

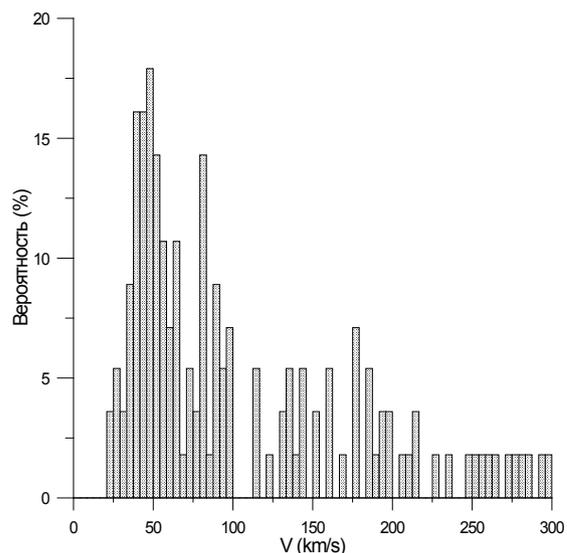


Рис. 3. Гистограмма вероятности распределения фазовых скоростей Z компоненты геомагнитных вариаций с периодами 7–9 сек.

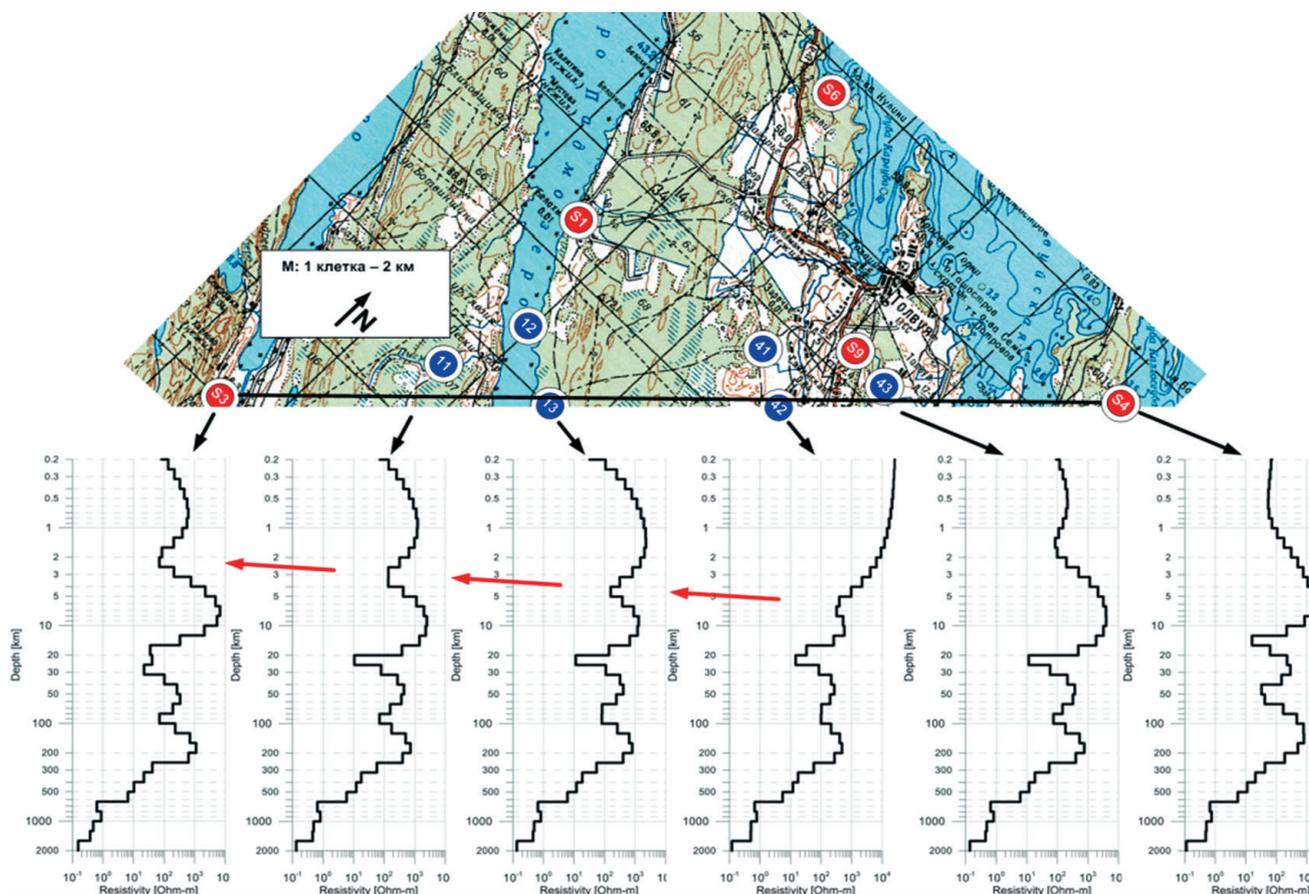


Рис. 4. Сравнение результатов зондирования земной коры методами МТЗ и ФГЗ

Обсуждение результатов

Для определения кажущегося удельного сопротивления на каждой из магнитных станций методом МТЗ определялось кажущееся удельное сопротивление земной коры и строилось изменение удельного сопротивления с глубиной. Для сравнения с результатами МТЗ по величине фазовой скорости Z компоненты использовался метод ФГЗ (выражения 3, 5 и 6). Использование вертикальной компоненты магнитных вариаций связано с тем, что на земной поверхности горизонтальная компонента удваивается, а Z компонента вариаций возникает благодаря геоэлектрическим неоднородностям земной коры¹.

На рис.4 показаны результаты сравнения МТЗ и ФГЗ методов вдоль профиля S3-S4. 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.

¹ Ковтун, А. А. Использование естественного электромагнитного поля при изучении электропроводности Земли/А.А. Ковтун — Изд. Ленгосуниверситета, Ленинград,1980, 195 с.

Библиография

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

References (transliterated)

1. Kopytenko, Yu. A. Magnitnaya lokatsiya istochnikov geomagnitnykh vozmushchenii/Yu.A. Kopytenko, V. S. Ismagilov, E. A. Kopytenko i dr.//DAN, seriya "Geofizika", t.371, № 5, s. 685–687, 2000.
2. Kopytenko Yu.A. Monitoring of the ULF electromagnetic disturbances at the station network before EQ in seismic zones of Izu and Chiba peninsulas// Yu.A. Kopytenko, V.S. Ismaguilov, K. Hattori and at//In: "Seismo Electromagnetics: Litosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling", Eds. M. Hayakawa and O.A. Molchanov, TERRAPUB, Tokyo, pp.11–18, 2002.
3. Ismaguilov, V. S. Variations of phase velocity and gradient values of ULF geomagnetic disturbances connected with the Izu strong earthquakes/ V. S. Ismaguilov, Yu.A. Kopytenko, K. Hattori Hayakawa and at //Natural Hazards and Earth Sys. Sci. v.20, p.1–5, 2002.
4. Ismagilov, V. S. Ispol'zovanie gradientov i fazovykh skorostei UNCh geomagnitnykh vozmushchenii dlya opredeleniya mestopolozheniya ochaga budushchego sil'nogo zemletryaseniya/V. S. Ismagilov, Yu. A. Kopytenko, K. Khattori i dr.// //Geomagnetizm i Aeronomiya, t.46, № 3, str.423–430, 2006.
5. Kovtun, A. A Ispol'zovanie estestvennogo elektromagnitnogo polya pri izuchenii elektroprovodnosti Zemli/A.A. Kovtun-Izd. Lengosuniversiteta, Leningrad,1980, 195 s.