

DOI: 10.51981/2588-0039.2022.45.026

## ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ ИМПЕДАНСНОГО ПОДХОДА В ВЫСОКИХ ШИРОТАХ ВБЛИЗИ МАГНИТОСФЕРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЕСТЕСТВЕННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

В.А. Любич, Ю.А. Шаповалова

Полярный геофизический институт, Мурманск, Россия; e-mail: lubchich@yandex.ru; yulia@pgi.ru

### Аннотация

Импедансный подход нашел широкое применение в практике геофизических работ в Арктических районах, являясь основой метода магнитотеллурического зондирования (МТЗ) земной коры. Однако, проведение работ методом МТЗ в высоких широтах имеет ряд особенностей, связанных с распределением источников естественного электромагнитного поля. В арктической зоне кроме грозовых источников излучения, расположенных в экваториальной области Земли, имеют влияние еще и магнитосферные источники, например, система горизонтальных полярных токов, текущих в высокоширотной ионосфере (электроджеты). Проведенные исследования были направлены на оценку применимости импедансного подхода для электромагнитных волн КНЧ-диапазона от магнитосферных источников в высоких широтах. Были проведены модельные расчеты горизонтальных компонент электромагнитного поля на земной поверхности от заданных источников в высокоширотной ионосфере, а именно, вертикального магнитного диполя, горизонтального электрического диполя и горизонтальной токовой длинной линии, моделировавшей фрагмент электроджета. Вследствие предполагаемой близости источника поля от точки наблюдения использовалась горизонтально-слоистая модель электропроводности атмосферы и ионосферы. Результаты моделирования показали, что частотный диапазон применимости импедансного подхода зависит от электропроводности земной коры.

**Ключевые слова:** импеданс, полярные токи в ионосфере, магнитотеллурическое зондирование

### Описание модельного эксперимента

Импедансный подход нашел широкое применение в практике геофизических работ в Арктических районах, являясь основой метода магнитотеллурического зондирования (МТЗ) земной коры [1]. Однако, проведение работ методом МТЗ в высоких широтах имеет ряд особенностей, связанных с распределением источников естественного электромагнитного поля. Основным источником поля в крайне низкочастотном (КНЧ) диапазоне принято считать очаги грозовой активности, расположенные в экваториальной области Земли. В арктической же зоне кроме грозовых источников излучения имеют влияние еще и магнитосферные источники, например, система горизонтальных полярных токов (электроджеты) [2], текущих в высокоширотной ионосфере на высотах около 110 км. Зона распространения данных токов может располагаться над северной частью Кольского полуострова.

С целью исследования применимости импедансного подхода для электромагнитных волн КНЧ-диапазона от магнитосферных источников в высоких широтах были проведены модельные расчеты горизонтальных компонент электромагнитного поля на земной поверхности от заданных модельных источников в ионосфере, а именно, вертикального магнитного диполя, горизонтального электрического диполя и горизонтальной токовой длинной линии, моделировавшей фрагмент электроджета. Длина линии была принята 300 км. Вследствие близости источника поля от предполагаемой точки наблюдения использовалась горизонтально-слоистая модель электропроводности атмосферы и ионосферы, параметры которой представлены в таблице 1. Модель основывалась на результатах исследований электропроводности атмосферы и ионосферы, изложенных в работе [3]. При моделировании источник электромагнитного поля находился на высоте 110 км. Точка наблюдения на земной поверхности располагалась на расстояниях 5, 50, 85, 500 км от центра источника в ортогональном простиранию токовой линии направлении. Частота электромагнитного поля, излучаемого источниками, составляла 0.1, 0.5, 1, 5, 10, 50 Гц. Удельное сопротивление земной коры  $\rho_k$  принималось равным 10000, 1000, 100 и 10 Ом\*м.

По результатам модельных вычислений амплитуд горизонтальных компонент электрического  $E_x$  и магнитного  $H_y$  полей на земной поверхности от заданного источника в ионосфере определялось значение импеданса  $Z_{xy}$ :

$$Z_{xy} = E_x / H_y .$$

Значения модуля импеданса затем пересчитывались в значения кажущегося сопротивления среды  $\rho_k$ ,

которое сравнивалось с модельным значением удельного сопротивления земной коры  $\rho_k$ :

$$\rho_k = \frac{|Z_{xy}|^2}{\omega\mu},$$

где  $\omega$  – круговая частота электромагнитного поля,  $\mu$  – магнитная проницаемость среды.

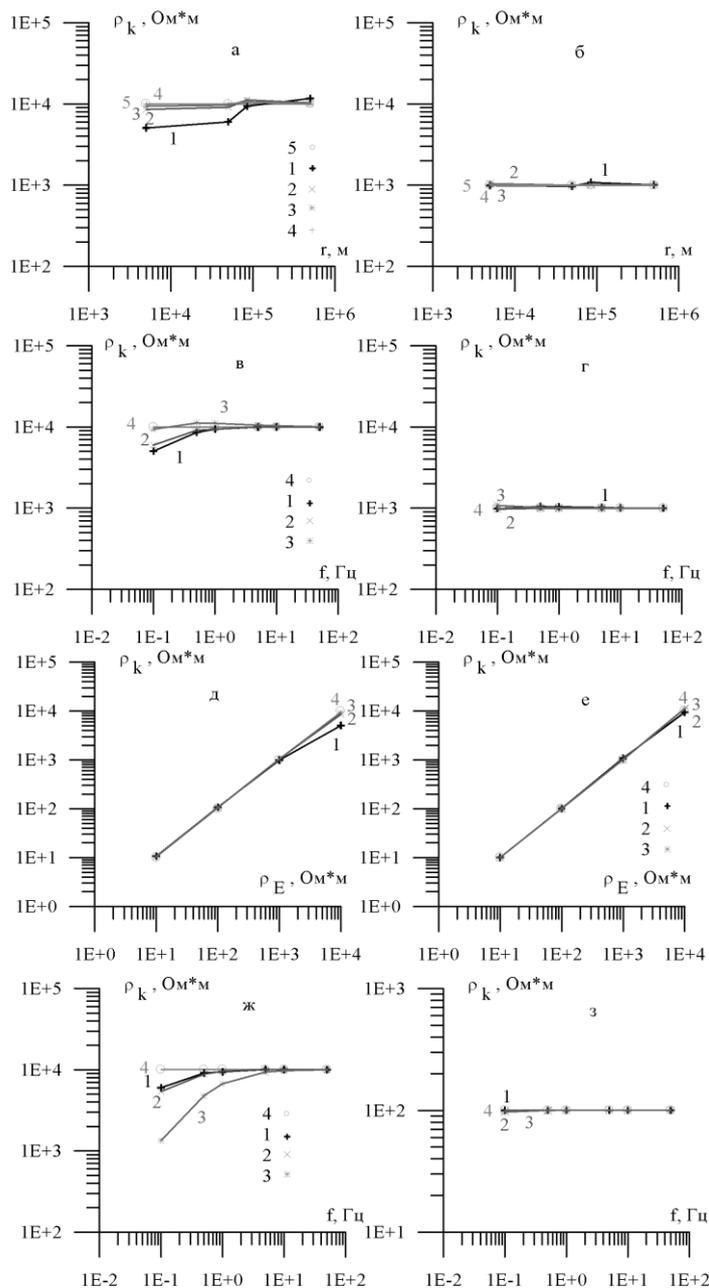
**Таблица 1.** Параметры горизонтально-слоистой модели электропроводности атмосферы и ионосферы.

№	Описание слоя	Вертикальные границы слоя z, км	Удельное сопротивление слоя $\rho$ , Ом*м
1	Земная кора	-30 – 0	10000; 1000; 100; 10
2	Нижняя атмосфера	0 – 30	$10^{12}$
3	Верхняя атмосфера	30 – 60	$10^{10}$
4	D-область ионосферы	60-90	$10^8$
5	E-слой ионосферы (нижняя часть)	90-110	$10^6$
6	E-слой ионосферы (верхняя часть)	110-130	$10^5$

### Результаты моделирования

Значения импеданса на земной поверхности при модельных вычислениях зависели от трех входных параметров – частоты электромагнитного поля  $f$ , излучаемого источником, горизонтального расстояния от источника до точки наблюдения  $r$  и удельного сопротивления земной коры  $\rho_k$ . Выбор диапазона модельных частот от 0.1 до 50 Гц был обусловлен реальным диапазоном частот, используемых в практике проведения геофизических работ методом МТЗ, а также полосой пропускания индукционных магнитометров, разработанных в ПГИ и применявшихся при проведении экспериментальных работ на Кольском полуострове. Вследствие того, что зона распространения горизонтальных полярных токов (электроджетов) может захватывать северные районы Кольского полуострова, модельные расстояния от источника до точки наблюдения выбирались в 5 км, что соответствует северным районам полуострова вблизи от магнитосферных источников естественного электромагнитного поля, 50 и 85 км, что соответствует центральному району полуострова, и 500 км, что соответствует южным районам полуострова на значительном удалении от источника. Важным параметром является удельное сопротивление земной коры. Так большая часть Кольского полуострова представлена кристаллическим Балтийским щитом, для горных пород которого удельное сопротивление составляет 10000 Ом\*м и выше. Но в районе полуостровов Рыбачий и Средний, расположенных в переходной зоне от пород Балтийского щита к осадочным породам южной части Баренцевоморской плиты, имеется осадочный чехол, удельное сопротивление пород которого может составлять 10, 100 или 1000 Ом\*м. Этим обстоятельством и выбран диапазон модельных значений сопротивления земной коры. В работе в качестве основного источника электромагнитного поля была выбрана горизонтальная длинная токовая линия, моделировавшая фрагмент электроджета. Но кроме того, модельные расчеты выполнялись и для горизонтального электрического диполя, такой источник может возникать при образовании локальных мелкомасштабных неоднородностей концентрации заряженных частиц в ионосфере, а также для вертикального магнитного диполя, такой источник соответствует вращательным движениям заряженных частиц вокруг силовых линий магнитного поля. Результаты моделирования представлены на рис. 1. По результатам выполненных модельных вычислений можно сделать следующие выводы.

Из рис. 1а видно, что значения кажущегося сопротивления  $\rho_k$ , вычисленные через импеданс для частоты электромагнитного поля  $f = 0.1$  Гц, в случае высокоомных пород (10000 Ом\*м) приближаются к модельным значениям удельного сопротивления земной коры  $\rho_k$  на расстояниях от источника  $r$  порядка 85 км и больше. С повышением частоты кривая кажущегося сопротивления все ближе приближается к модельным значениям сопротивления, для частот выше 0.5 Гц импедансный подход дает хорошие результаты. Но как показывает рис. 1б, результаты модельных вычислений сильно зависят от удельного сопротивления подстилающих пород. Так при удельном сопротивлении земной коры  $\rho_k = 1000$  Ом\*м импедансный подход полностью применим во всем диапазоне рассматриваемых частот  $f$  и горизонтальных расстояний  $r$ .



**Рисунок 1.** Графики зависимости кажущегося сопротивления среды  $\rho_k$ , рассчитанные через значения импеданса: *a* - от расстояния до источника  $r$  при удельном сопротивлении земной коры  $\rho_E=10000$  Ом\*м; *б* - при удельном сопротивлении земной коры  $\rho_E=1000$  Ом\*м (на графиках *a* и *б* цифрами обозначены кривые 1 – для частоты электромагнитного поля  $f = 0.1$  Гц, 2 -  $f = 0.5$  Гц, 3 -  $f = 1$  Гц, 4 -  $f = 5$  Гц, 5 – прямая соответствующая значению удельного сопротивления земной коры); *в* - от частоты электромагнитного поля  $f$  при  $\rho_E=10000$  Ом\*м; *г* - при  $\rho_E=1000$  Ом\*м (на графиках *в* и *г* цифрами обозначены кривые 1 – для точки наблюдения, удаленной от источника на расстояние  $r = 5$  км, 2 -  $r = 50$  км, 3 -  $r = 85$  км, 4 – прямая соответствующая значению удельного сопротивления земной коры); *д* - от значений удельного сопротивления земной коры  $\rho_E$  для точки наблюдения на расстоянии  $r = 5$  км от источника; *е* - для точки наблюдения на расстоянии  $r = 85$  км (на графиках *д* и *е* цифрами обозначены кривые 1 – для частоты электромагнитного поля  $f = 0.1$  Гц, 2 -  $f = 0.5$  Гц, 3 -  $f = 1$  Гц, 4 – прямая соответствующая значениям удельного сопротивления земной коры); *ж* - от частоты электромагнитного поля  $f$  для точки наблюдения на расстоянии  $r = 50$  км от источника при  $\rho_E=10000$  Ом\*м; *з* - при  $\rho_E=100$  Ом\*м (на графиках *ж* и *з* цифрами обозначены кривые 1 – для источника в виде горизонтальной длинной токовой линии, 2 - для источника в виде горизонтального электрического диполя, 3 - для источника в виде вертикального магнитного диполя, 4 – прямая соответствующая значению удельного сопротивления земной коры).

На рис. 1в и 1г представлены частотные зависимости кажущегося сопротивления  $\rho_k$  для разных значений параметра  $r$ . Из рис. 1в видно, что в случае кристаллических пород Балтийского щита ( $10000 \text{ Ом}^*\text{м}$ ) импедансный подход применим на расстояниях от источника порядка 85 км. В случае же более низкоомных пород осадочного чехла импедансный подход применим даже вблизи от источника (рис. 1г).

На рис. 1д и 1е представлены зависимости значений кажущегося сопротивления  $\rho_k$  от значений удельного сопротивления земной коры  $\rho_e$ . Как видно из рисунка 1д, только для частот электромагнитного поля ниже 0.5 Гц, вблизи от источника ( $r = 5 \text{ км}$ ), в случае высокого сопротивления земной коры (более  $1000 \text{ Ом}^*\text{м}$ ), кривая кажущегося сопротивления отклоняется от прямой, соответствующей модельным значениям удельного сопротивления земной коры.

На рис. 1ж и 1з представлены результаты моделирования для разных типов источников электромагнитного поля (расстояние от источника  $r = 50 \text{ км}$ ). Как видно из рисунка 1ж, результаты для горизонтального электрического диполя близки к результатам для длинной токовой линии. В то же время, для вертикального магнитного диполя значения кажущегося сопротивления  $\rho_k$  наиболее сильно отличаются от модельных значений удельного сопротивления земной коры на частотах ниже 5 Гц (рис. 1ж). Однако, это обстоятельство характерно в случае высокоомных пород кристаллического Балтийского щита ( $\rho_e = 10000 \text{ Ом}^*\text{м}$ ). В случае же пород осадочного чехла с низким удельным сопротивлением ( $\rho_e = 100 \text{ Ом}^*\text{м}$ ) импедансный подход применим для всех типов рассматриваемых источников электромагнитного поля (рис. 1з).

## Вывод

Использование метода МТЗ, основанного на импедансном подходе, в высокоширотных районах Арктики для электромагнитных зондирований низкоомного осадочного чехла вполне оправданно. При экспериментальных работах в пределах кристаллического Балтийского щита близость магнитосферных источников естественного электромагнитного поля может оказывать влияние на результаты интерпретации измерений в случае малых горизонтальных расстояний  $r$  от источника (менее 85 км) и в случае низких частот  $f$  (менее 0.5 Гц).

## Список литературы

1. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И., Модели и методы магнитотеллурики. - М.: Научный мир, 2009. 680 с.
2. Ратклифф Дж., Введение в физику ионосферы и магнитосферы. - М.: Мир, 1975. 296 с.
3. Denisenko V.V., Rycroft M.J., Harrison R.G., Mathematical simulation of the ionospheric electric field as a part of the global electric circuit // Surveys in Geophysics. 2019. V. 40. Is. 1. P. 1-35.