УДК 550.837.211

К ВОПРОСУ О ПРАВОМЕРНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОДЕЛИ ПЛОСКОЙ ВОЛНЫ И ДВУХКАНАЛЬНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ МТЗ В ПОЛЯРНЫХ ШИРОТАХ

© 2022 г. Е. О. Погребных^{1, 2, **}, Д. В. Яковлев^{1, *}, Д. В. Епишкин¹, А. Г. Яковлев^{1, 2}

¹000 "Северо-Запад", г. Москва, Россия

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

E-mail: nw.yakovlev@gmail.com* *E-mail: katepogrebnykh@gmail.com* Поступила в редакцию 04.03.2022 г. После доработки 18.04.2022 г. Принята к публикации 18.04.2022 г.

Статья посвящена рассмотрению двух вопросов. Первый вопрос – правомерность использования модели плоской волны при выполнении МТЗ в полярных широтах. Второй вопрос – возможность использования двухканальных станций в условиях близости к ионосферному источнику сигнала при работах в полярных широтах. Для рассмотрения этих вопросов использованы данные 5000 точек МТЗ, расположенных на участке размером 120 на 80 км на севере Якутии. Полевые работы на этой площади выполнялись в течение полугода. Три летних месяца в центре площади непрерывно велась запись электромагнитного поля на базовой точке. Эта запись использовалась для решения первого вопроса. Для ответа на второй вопрос использовался горизонтальный магнитный тензор, полученный в результате обработки записей магнитного поля в рядовых точках площади относительно базовой точки.

Ключевые слова: модель плоской волны, МТЗ в полярных широтах, двухканальные станции, горизонтальный магнитный тензор, обработка данных МТЗ.

DOI: 10.31857/S0002333722050222

введение

В 2019 г. на севере Якутии были выполнены электроразведочные региональные площадные работы методом МТЗ. На участке размером 120 на 80 км выполнено порядка 5000 точек МТЗ с равномерным распределением по сети 1 на 2 км.

При выполнении работ для обработки в синхронном режиме использовалась запись на базовой точке. Базовая точка не менялась в ходе работ, а в летнее время писала без перерыва более трех месяцев. Эти данные позволяют исследовать один из важных вопросов о правомерности использования модели плоской волны при выполнении МТЗ в полярных широтах [Jones, Spratt, 2002; Utada, 2018]. Некоторые специалисты считают, что применять МТЗ в полярных широтах и использовать классическую модель Тихонова-Каньяра неверно. В первую очередь из-за особенностей источника поля и близости к нему. Поскольку полевые работы проводились за полярным кругом (72° с.ш.), и базовая точка писала на протяжении трех месяцев в широком диапазоне частот, то эти данные позволят понять, насколько стабильны были результаты обработки базовой точки во времени, зависят ли они от изменений в источнике поля. Это поможет ответить на вопрос возможности классического подхода к данным МТЗ в полярных широтах в условиях Крайнего Севера.

Также, площадные данные позволяют определить максимальное расстояние, на котором можно на данной территории использовать двухканальные станции МТЗ. Такие станции, регистрирующие только две горизонтальные компоненты теллурического поля, часто применяются в производственных работах. Для обработки записей двухканальных станций используются записи магнитных каналов ближайших пятиканальных станций. При работах в полярных широтах возникает вопрос, можно ли использовать двухканальные станции в условиях близости к ионосферному источнику сигнала. Рассмотрению этих вопросов посвящена эта статья.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ

В тектоническом отношении исследуемая площадь расположена в пределах Лено-Анабар-

ского прогиба (ЛАП) — над порядковой депрессионной структурой, входящей в состав системы периферических мезозойских депрессий севера и востока Сибирской платформы, которая помимо него включает Анабаро-Хатангскую седловину, Предверхоянский краевой прогиб, Оленекский и Уджинский своды (рис. 1) [Соболев, 2019; Старосельцев, 2001].

В пределах Анабаро-Ленской зоны мощность мезозойских отложений изменяется в диапазоне от 0 до 1650 м. Венд-палеозойский комплекс представлен различными как по составу, так и по возрасту породами. Его мощность колеблется от 2 до 3 км. Мощность "срезанных" рифейских отложений составляет 3—4 км. Рифей на исследуемой территории правильнее рассматривать в качестве мегакомплекса, поскольку по мощности эти отложения превосходят всю вышележащую вендфанерозойскую толщу пород [Конторович, 2013].

С точки зрения геоэлектрического строения площадь исследований имеет следующие особенности: кривые в разных частях площади меняются существенно (рис. 2), при этом изменения происходят плавно (рис. 3); верхняя часть разреза, отвечающая многолетнемерзлым породам, мезозойскому и палеозойскому комплексам, имеет квазиодномерное строение. На частотах ниже 1 Гц кривые в разных направлениях отличаются значительно, разрез далек от одномерного.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ НА БАЗОВОЙ ТОЧКЕ

Базовая точка располагалась близко к центру площади исследований и не менялась в ходе работ. Запись на базовой точке велась и в зимний, и в летний сезоны. В течение 2-х зимних месяцев на базовой точке несколько раз менялась аппаратура. В летнее время запись велась без перерыва более трех месяцев одним регистратором. Поэтому именно летняя запись была выбрана для дальнейшего анализа.

Регистрация на базовой точке велась измерителями МЭРИ Про (Nord) отечественного производства с индукционными датчиками IMS-010 (https://nord-mt.com). Измерения проводились непрерывно с 5-минутным перерывом каждые 24 ч для смены аккумуляторов станций, а также периодической сменой электродов (в среднем 1 раз в месяц).

Все суточные записи на базовой точке были обработаны в программе EPI-Kit (https://epi-kit.ru) с одинаковыми параметрами независимо друг от друга. В процессе обработки, каждая суточная запись делилась на 20 временны́х сегментов (окон), длина каждого из которых 1.2 ч. Для обработки на частотах ниже 0.01 Гц окна объединились в более продолжительные сегменты. Каждый сегмент обрабатывался независимо, а результаты осреднялись для получения средней кривой. В результате получены суточные кривые МТЗ в течение 3-х мес.

Кроме того, все записи МТЗ на базовой точке были объединены в единую запись, которая была обработана для получения единой длинной кривой.

АНАЛИЗ ДАННЫХ НА БАЗОВОЙ ТОЧКЕ

1-я форма представления результатов обработки данных на базовой точке это частотно-временные разрезы изменения модуля и фазы импеданса за 3 мес. (рис. 4). Поскольку интересны не сами кривые, а их изменение во времени, то для отображения были выбраны следующие величины:

$$\lg |Z| - med \lg |Z|, \quad \operatorname{Arg}(Z) - med\operatorname{Arg}(Z),$$

где $\lg |Z|$ — это десятичный логарифм модуля импеданса, Arg (Z) — фаза импеданса, *med* — медианное значение на определенной частоте.

На разрезах цветом отображается величина отклонения относительно медианного среднего. Медиана на каждой частоте (всего 85 частот) вычислялась независимо. Цвета на разрезах подбирались так, чтобы для модуля импеданса подчеркнуть отклонения больше 2.5%. Максимальные отрицательные отклонения обозначались красным цветом, максимальные положительные – синим. Цвета в пределах нормы – ближе к светлым оттенкам (светло-желтые – отрицательные отклонения, голубые – положительные).

На нижнем графике показаны вариации магнитного поля по индексам Dst — экваториальное возмущение (синий график) и AE — авроральный электроджет (красный график) за рассматриваемый промежуток времени. Значительные возмущения магнитного поля в этот период времени были в первых числах августа и сентября: значения AE превышают 500 нТл, Dst — в пределах —50 нТл. Заметим, что какие-либо корреляции с особенностями изменения значений тензора импеданса отсутствуют.

По особенностям изменения во времени на разрезах выделено 5 характерных частот. По каждой частоте были построены графики изменения за 3 мес. модуля и фазы импеданса (рис. 5) — это 2-я форма представления. А также построены графики спектральной плотности изменения модуля импеданса во времени — 3-я форма представления (рис. 6).

В частотном диапазоне от 110 до 1000 Гц (характерная частота 548 Гц) наблюдается суточная периодичность. На частотно-временных разрезах в начале записи наблюдаются заниженные значения, а концу дня — завышенные (рис. 4). Максимальное отклонение суточных изменений по модулю ± 0.5 декады, по фазе — $\pm 30^{\circ}$ ($\pm 100^{\circ}$, если

ФИЗИКА ЗЕМЛИ № 5 2022





130



Рис. 2. Типичные кривые кажущегося сопротивления: *X*, *Y* – направления на географические Север и Юг, соответственно.

считать отскоки) (рис. 5). На графике спектра (рис. 6) для характерной частоты хорошо видны пики в районе 12 и 26 ч. Возможно, длительность суточных отклонений смещена в большую сторону из-за того, что съемки проводились в условиях крайнего севера, где преобладал полярный день. На фоне значительных суточных изменений кривых МТЗ длиннопериодные колебания не видны. Но на графиках спектральной плотности модуля все равно выделяются пики в районе периодов 12 и 33 дня.

Частотный диапазон от 9 до 110 Гц с характерной частотой 32.5 Гц имеет самую низкую вариативность значений. В этом диапазоне наиболее

ФИЗИКА ЗЕМЛИ № 5 2022



Рис. 3. Кривые МТЗ вдоль демонстрационного профиля.

сильные естественные вариации электромагнитного поля земли и наименьшее влияние грозовых и ветровых помех. Исключением является шум радиостанций специальной связи, частоты которой 58 и 88 Гц. Представлен этот шум на разрезах (рис. 4) двумя полосами больших отклонений. Но большого влияния на общий результат обработки он не оказывает. С помощью этого диапазона можно наиболее точно ответить на поставленный в исследовании вопрос.

На графиках изменения модуля и фазы импеданса для частоты 32.5 Гц в отличие от предыдущего диапазона видны длиннопериодные изменения, которые на разрезах представлены плавными изменениями от небольших отрицательных к небольшим положительным отклонениям. Диапазон изменения на графике по модулю $|Z_{xy}| - 2\%$ (отклонение в одну и в другую сторону $-\pm 1\%$). На графике $|Z_{yx}| - 4\%$ (отклонение в $\pm 2\%$). На фазе импеданса двух компонент отклонения составляют $\pm 0.25^{\circ}$. Все эти значения сопоставимы с точностью наблюдений. Согласно графику спектра для частоты 32.5 Гц, период изменения составляет 33 дня, а также видны пики в 12 дней (рис. 6).

Графики изменения модуля импеданса во времени для частоты 32.5 Гц кроме диннопериодных вариаций имеют две характерные особенности. Первая — из-за относительно небольших изменений значений на выбранной частоте, хорошо заметны расхождения отклонений двух компонент в первые две недели записи. На фазовых графиках такого расхождения не наблюдается. Вторая особенность — скачок вниз по уровню в конце июля—



Рис. 4. Частотно-временные разрезы изменения за 3 месяца по модулю импеданса (вверху) и по фазе импеданса (внизу), индексы Dst, AE (нижний график).

начале августа. На фазовых разрезах и графиках такого изменения нет. Эти особенности, по-видимому, связаны с гальваническими эффектами в электрическом поле (*Shift*—эффектом). Отметим, что на базовой точке периодически менялись электроды, что могло повлиять на изменение характера заземления. Также в начале лета происходила оттайка сезонно-талого слоя. Характерные особенности, связанные с *Shift*—эффектом, заметны и в других частотных диапазонах на разрезах, но не видны на графиках, на фоне других значительных вариаций. Частотный диапазон от 0.1 до 9 Гц с выбранной характерной частотой 2.03 Гц относится к так называемому мертвому диапазону МТЗ. На частотно-временных разрезах модуля импеданса он характеризуется значительными отклонениями в меньшую сторону относительно среднего, что показано яркими пятнами, которые отвечают нулевой активности электромагнитного поля. На осредненных суточных кривых преобладают заниженные значения кажущегося сопротивления. В то же время значения фазы импеданса отклоняются в разные стороны относительно 0°, поэтому на фазовых частотных разрезах данный диапазон



Рис. 5. Графики изменения за 3 месяца модуля и фазы импеданса на разных частотах.

представлен облаком контрастных значений (рис. 4, рис. 5). На графике изменения по модулю превалирует нулевое значение с отклонениями до

1 декады вниз, а на графике изменения по фазе – с отклонениями в одну и другую сторону $\pm 20^{\circ}$. На фоне значительных отклонений заметных длин-

ФИЗИКА ЗЕМЛИ № 5 2022

нопериодных изменений не выделяется. Однако на графиках спектральной плотности (рис. 6) хорошо видны пики в районе 3-х, 6-ти и 12-дневных изменений, а также, как и на двух предыдущих частотных диапазонах, выделяется период изменений равный 26-ти часам.

Частотный диапазон от 0.005 до 0.1 Гц с выбранной характерной частотой 0.03 Гц несколько стабильнее и показательней, чем частотные диапазоны с характерными частотами 2.03 и 0.003 Гц. Это достаточно хорошо видно на осредненных суточных кривых (рис. 7). На частотно-временных разрезах (рис. 4) модуля импеданса он характеризуется длиннопериодными изменениями, как во втором частотном диапазоне, но с учетом бо́льшей суточной дисперсией. На рис. 5 эти изменения заметны. По модулю длиннопериодные отклонения достигают $\pm 2\%$, а по фазе — $\pm 2.5^{\circ}$.

В частотном диапазоне с 0.0001 до 0.005 Гц, характерной частотой которого является 0.003 Гц, точность низкая из-за нехватки накоплений (рис. 4). На графиках изменения модуля и фазы импеданса можно проследить длиннопериодные изменения (рис. 5). По модулю отклонения они достигают $\pm 2\%$, а по фазе – $\pm 5^{\circ}$ (с максимум пиков – $\pm 20^{\circ}$). А по графикам спектральной плотности достаточно четко выделяются пики в 12, 26 ч и 6, 12 и 33 дня (рис. 6).

На рис. 7 представлены кривые модуля и фазы импеданса для трех дней: в начале, в середине и в конце трехмесячного эксперимента. Это 4-я форма представления результатов обработки базовой точки. Яркими обведенными символами обозначены оценки, осредненные по суточным записям, а тусклыми – все 20 значений для промежуточных временных сегментов (окон), полученные в те же дни. Этот рисунок подтверждает, что заметных изменений в кривых МТЗ в течение трех месяцев не наблюдается. Также стоит отметить, что изменения значений в течение суток (тусклые символы), связанные с интенсивностью вариаций электромагнитного поля Земли, имеют существенно больший диапазон, чем изменения осредненных суточных вариаций в течение трех месяцев. Это говорит о том, что при накоплении сигнала, достаточном для получения устойчивых оценок тензора импеданса, кривые МТЗ в районе работ не зависят от событий, происходящих в источнике.

Таким образом, можем констатировать, что в результате анализа трехмесячного ряда наблюдений в полярных широтах значимых эффектов, связанных с неоднородностью источника поля, выявлено не было. Применяя современные процедуры селекции и робастного весового осреднения данных МТЗ (например, используемые нами [Епишкин, 2016]), в процессе обработки суточ-



Рис. 6. Графики спектральной плотности изменения модуля импеданса во времени.

ных записей МТЗ мы получаем стабильные во времени значения импедансных оценок в разведочном диапазоне периодов.



Рис. 7. Кривые кажущегося сопротивления и фазы импеданса за характерные дни.

АНАЛИЗ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ТЕНЗОРА

Во время выполнения производственных работ методом МТЗ часто используются двухканальные станции, регистрирующие только электрические поля. Магнитные компоненты для обработки таких записей берутся от ближайших пятиканальных записей. Некоторые исследователи сомневаются в правомерности использования в полярных широтах двухканальных станций, ссылаясь на существенную неоднородность первичного магнитного поля. Такие же сомнения возникают у специалистов при экспертизе проектов на выполнение производственных работ методом МТЗ и у сопровождающих эти работы супервайзеров.

Полученные площадные данные с использованием единой базовой станции позволяют построить карты горизонтального магнитного тензора М (ГМТ) для всей площади. Можно считать, что при значении модуля магнитного тензора равном 1, магнитное поле не меняется от рядовой к удаленной точке в пределах погрешности оценивания.

Точность полевых наблюдений на основе контрольных измерений по ГМТ составляет около 5% по модулю, 3° по фазе. Будем считать это пограничными значениями. Соответственно, результаты площадного эксперимента позволяют определить, на каком расстоянии от базовой точки можно использовать ее магнитное поле и понять на какой максимальной дистанции от пятиканальных станций можно использовать двухканальные.

На рис. 8 представлены карты модуля $|\det(M)|$ и фазы Arg (det(M)) детерминанты ГМТ (2 верхние группы карт) на трех характерных частотах: 32.5, 0.03 и 0.003 Гц, где

$$\det(M) = M_{xx}M_{yy} - M_{xy}M_{yx}.$$

Точность определения ГМТ на частотах 548 и 2.03 Гц из-за "мертвого" АМТ и МТ диапазонов существенно ниже, поэтому соответствующие карты не приводятся.

ФИЗИКА ЗЕМЛИ Nº 5 2022



Рис. 8. Карты модуля и фазы компонент ГМТ на трех характерных частотах: 32.5, 0.03 и 0.003 Гц.

По картам модуля определителя ГМТ видно, что минимальное расстояние, на котором значения отклоняются от значений в базовой точке более чем на 5% — около 20 км. Наименьшее расстояние наблюдается на частоте 0.003 Гц, на которой видны действительно значимые пространственные изменения модуля на площади. На других картах модуля определителя ГМТ изменения в целом не превышают 10% на бо́льшей части участка. На картах фазы ГМТ расстояние, на котором значения меняются более чем на 3°, составляет около 50 км на частоте 32.5 Гц, около 30 км на частотах 0.03 и 0.003 Гц.

Так как с помощью карт модуля и фазы детерминанты ГМТ мы можем описать только изменения относительно базовой точки, то для рассмотрения скорости изменений магнитного поля по всей площади были рассчитаны значения полного горизонтального градиента модуля и фазы определителя ГМТ (grad $|\det(M)|$; grad Arg $(\det(M))$). При этом модуль градиента далее нормировался на модуль детерминанты, поскольку нам важны относительные изменения:

$$\gamma = \operatorname{grad} |\operatorname{det}(M)| / |\operatorname{det}(M)|,$$

где *ү* – нормированный градиент.

Поскольку интересна не сама скорость изменения ГМТ, а на каком расстоянии ГМТ меняется меньше 5% по модулю и 3° по фазе, то для построения карт использовались параметры $1/\gamma$, км/5% и 1/grad Arg(det(M)), км/3° (3, 4 ряд карт на рис.8). По сути это параметры допустимого удаления в км по амплитуде/фазе, показывающие на какой максимальной дистанции от пятиканальных станций можно использовать двухканальные.

На картах параметров $1/\gamma$ и 1/grad показано, что в зеленой зоне (сплошная заливка) магнитное поле от пятиканальной можно использовать на расстоянии более 12 км от нее, и изменения поля не булут превышать точности измерений. 12-километровая зона занимает большую часть юго-западной половины участка (левобережье р. Оленек с равнинным рельефом). Зоны с оранжевой заливкой (косая штриховка) максимальное расстояние, на которое можно отходить от базовой точ- $\kappa u - 2 - 3 \kappa m$. Если в этих зонах для обработки использовать магнитные поля с большего расстояния, то отличие с локальным магнитным полем будет превышать 5% или 3°. На приведенных на рис. 8 картах такие участки носят локальный характер и не исключено, что связаны со снижением качества первичных данных, которое ярче проявилось на картах основанных на горизонтальном градиенте ГМТ.

Рассмотрев все карты горизонтального магнитного тензора для характерных частот, можно сделать вывод, что в пределах данной площади расстояние, на котором возможно использование магнитного поля с пятиканальных станций для обработки данных двухканальных станций, равно 2-3 км. В пределах этого расстояния отличия в магнитном поле гарантировано не будут превышать 5% по модулю, 3° по фазе. Если исключить из рассмотрения отдельные локальные участки с повышенными значениями градиента ГМТ, то минимальное расстояние увеличится до 3-6 км.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проанализировав все построенные частотновременные разрезы за 3 мес, графики изменения модуля и фазы импеданса на разных частотах, графики спектральной плотности, изменение уровня кривых за 3 мес для характерных дней, можем сделать вывод, что в районе работ (север Якутии, 72° с.ш.) значимых эффектов в тензоре импе-

ФИЗИКА ЗЕМЛИ № 5 2022

данса, связанных с неоднородностью источника поля, не наблюдается. Основываясь на классической модели Тихонова—Каньяра, были получены стабильные значения тензора импеданса и устойчивые кривые МТЗ.

На основе карт горизонтального магнитного тензора для характерных частот, сделан вывод, что в пределах данной площади изучаемого района расстояние, на котором возможно использование записи магнитного поля пятиканальной станции для обработки данных двухканальных станций, равно около 2–3 км. В пределах этого расстояния отличия в магнитном поле гарантировано не будут превышать 5% по модулю, 3° по фазе.

Полученные результаты позволили дать ответ на интересующие вопросы, связанные с корректностью использования в полярных широтах в схожих геолого-географических условиях классической модели Тихонова–Каньяра и двухканальных станций при выполнении МТЗ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Епишкин Д.В. Развитие методов обработки данных магнитотеллурического зондирования // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. М.: издво Моск. ун-та. 2016. № 4. С. 40-46.

Конторович В.А., Конторович А.Э., Губин И.А., Зотеев А.М., Лапковский В.В., Малывашев Н.А., Соловьев М.В., Фрадкин Г.С. Структурно-тектоническая характеристика и модель геологического строения неопротерозойско-фанерозойских отложений Анабаро-Ленской зоны // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. №8. С. 1253–1274.

Соболев П.Н., Лежнин Д.С., Панарин И.А., Гаврилова Е.Н., Пименова А.М. Геохимические критерии нефтегазоносностирифей-палеозойских отложений Лено- Анабарского регионального прогиба и сопредельных территорий // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2019. № 8(332). С. 62–74. https://doi.org/10.30713/2413-5011-2019-8(332)-62-74

Старосельцев В.С., Гребенюк В. В., Гришин М.П., Демин В.И. и др. Тектоническая карта нефтегазоносных провинций Сибирской платформы. 1 : 2 500000 / Старосельцев В.С. (ред.). Новосибирск : изд-во СНИИГГиМСа. 2001.

Alan G.J., Spratt J. A simple method for deriving the uniform field MT responses in auroral zones // Earth Planets Space. 2002. V. 54. P. 443–450.

Hisashi U. Plane-wave and Flat Earth Approximations in Natural-source Electromagnetic Induction Studies. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo. 2018. P. 1–14.

On the Validity of Using Plane-Wave Model and Two-Channel Measurement Systems when Performing MT Soundings in Polar Regions

E. O. Pogrebnykh^{a, b,} **, D. V. Yakovlev^{a, *}, D. V. Epishkin^a, and A. G. Yakovlev^{a, b}

^aOOO Severo-Zapad, Moscow, Russia ^bFaculty of Geology, Moscow State University, Moscow, Russia *e-mail: nw.yakovlev@gmail.com **e-mail: katepogrebnykh@gmail.com

This paper considers two issues. The first is the validity of using the plane wave model when performing MT soundings (MTS) in polar latitudes. The second is the possibility of using two-channel stations when working in polar latitudes in the conditions when there is a close ionospheric source of signals. To address these questions, we consider the data from 5000 MTS points located within a 120×80 km area in the north of Yakutia. The MT measurements in this survey area were conducted for half a year. During the three summer months, electromagnetic field was continuously recorded at the base point in the center of the area. This record was used to solve the first question. To answer the second question, we analyze the horizontal magnetic tensor obtained by processing the magnetic field records at the survey points relative to the base point.

Keywords: plane wave model, MTS in polar latitudes, two-channel stations, horizontal magnetic tensor, MT data processing