

Статический сдвиг магнитотеллурических кривых в осадочных бассейнах

Д.В. Яковлев¹, А.Г. Яковлев¹, О.А. Валясина¹
¹ ООО «Северо-запад», mail@nw-geophysics.com

АННОТАЦИЯ

В докладе рассматривается проблема статического сдвига кривых МТЗ, полученных в Таймырском регионе: в пределах Енисей-Хатангского и Анабаро-Ленского региональных прогибов. Эти прогибы сложены юрско-меловыми терригенными породами с практически горизонтальным залеганием слоев. Для исследования влияния приповерхностных неоднородностей (ППН) на кривые МТЗ такие условия являются идеальными, поскольку они позволяют упростить учёт эффектов от фонового разреза, считая его одномерным.

Ключевые слова: магнитотеллурические зондирования, статический сдвиг кривых МТЗ, нормализация, зондирование становлением поля

Эффект статического сдвига амплитудных кривых МТЗ (static shift) создаёт трудности при выполнении МТЗ с момента появления самого метода. Этот эффект возникает из-за того, что измеряемая с помощью пары электродов разность потенциалов не соответствует горизонтальному электрическому полю из-за влияния зарядов, возникающих на локальных приповерхностных неоднородностях (ППН). Заряды создают аномалии гальванического типа, которые проявляются в вертикальном статическом сдвиге кривых МТЗ [Бердичевский, Дмитриев, 2009].

Известны различные математические, статистические, методические способы выявления и борьбы с этим эффектом. Некоторые из них более успешные, некоторые менее, какие-то обладают более широкой областью приме-

нения, какие-то – более узкой. Однако до сих пор не существует универсального метода борьбы со статическим сдвигом.

В данной работе рассматривается проблема статического сдвига кривых МТЗ в геологических условиях, где осадочный чехол можно представить, как горизонтально-слоистую среду. Для исследования влияния ППН на кривые МТЗ такие условия являются идеальными, поскольку они позволяют упростить учёт эффектов от фонового разреза, считая его одномерным.

В качестве практических данных для исследования использованы результаты региональных электроразведочных работ, полученные в Таймырском регионе: в пределах Енисей-Хатангского и Анабаро-Ленского региональных прогибов (рис. 1).

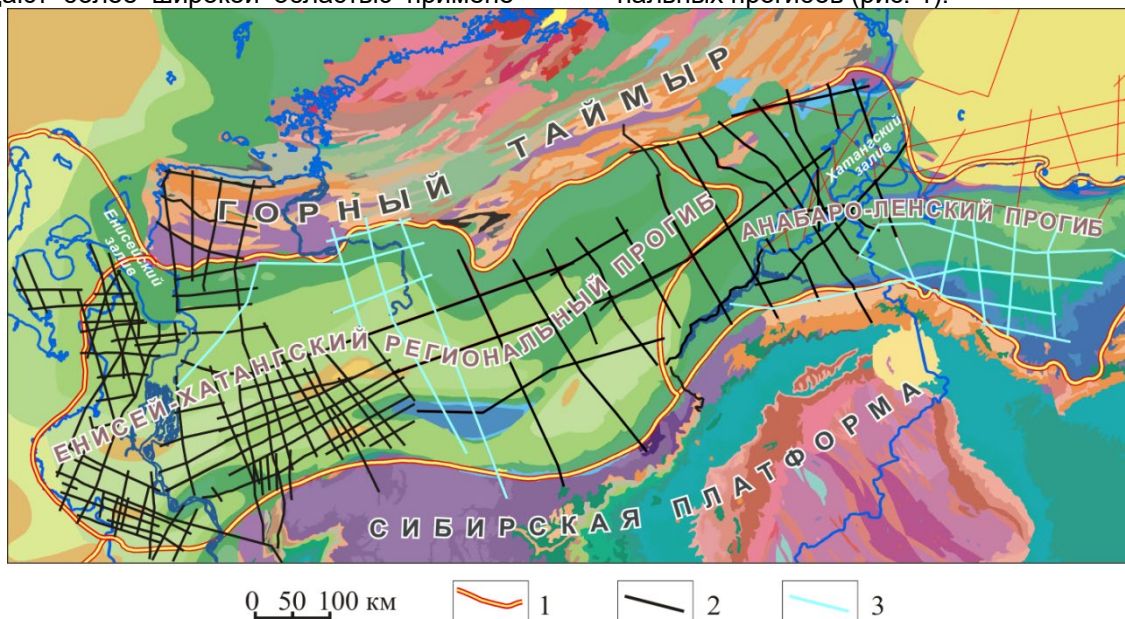


Рис. 1. Положение современных региональных электроразведочных профилей в Таймырском регионе (на геологической карте). 1 - граница региональных прогибов, 2 - региональные электроразведочные профили МТЗ, 3 - региональные электроразведочные профили МТЗ и ЗСБ.

Обобщенный разрез Таймырского региона представляет собой горизонтально залегающий мезозойско-кайнозойский осадочный чехол на складчатом домезозойском основании [Афанасенков и др., 2016]. Ввиду плавных латеральных изменений в чехле, с точки зрения геоэлектрического строения его можно считать одномерным, горизонтально-слоистым. Верхняя часть разреза представлена слоем мерзлых пород мощностью от 50 до 1000 м с большим количеством неоднородностей, являющихся следствием четвертичного оледенения и современных гидрогеологических и геокриологических процессов [Яковлев, 2018]. Такое неоднородное строение ВЧР является причиной повсеместного статического сдвига амплитудных кривых МТЗ.

В Таймырском регионе с 2005 по 2017 гг. получено порядка 22 000 точек МТЗ. Благодаря значительному набору исходных данных есть возможность опробовать различные методы коррекции статического сдвига на большой выборке. Кроме того, в 3 тысячах точек совместно с МТЗ выполнены зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ). Коррекция статического сдвига по данным ЗСБ – наиболее распространенный и верный способ борьбы с влиянием искажений. Таким образом, способы коррекции без использования дополнительных данных можно сравнить с наиболее близким к истине результатом, полученным по ЗСБ.

Коррекция Таймырских кривых МТЗ по моделям ЗСБ

Коррекция по данным ЗСБ осуществлялась следующим способом. На первом этапе подбирались модель среды, удовлетворяющая кривой ЗСБ. Использовалась автоматическая одномерная инверсия. Следующий этап – решение прямой задачи МТЗ от полученной модели. Полученная в результате модельная кривая МТЗ находится на истинном уровне, поскольку не содержит в себе эффекта от ППН.

Следовательно, полевая кривая МТЗ в данной точке может быть приведена к уровню модельной, что позволяет скорректировать статический сдвиг.

Использование метода ЗСБ для коррекции статического сдвига кривых МТЗ – действенный, но не повсеместно применимый способ решения проблемы. Как показано в докладе, для Таймырского региона применение ЗСБ обосновано, однако анализ данных нужно проводить для каждого региона в отдельности. Ограничения на этот способ накладываются из-за нескольких причин: наличие крайне неоднородной ВЧР, крутой рельеф и процессы ВП.

Для Таймырских данных коррекция статического сдвига амплитудных кривых МТЗ была выполнена по моделям ЗСБ для 3157 точек по описанной выше методике. По результатам коррекции был рассчитан коэффициент статического сдвига k :

$$k = \frac{|Z_{\text{МТЗ}}|}{|Z_{\text{ЗСБ}}|} \quad (1)$$

Поскольку кривая ЗСБ свободна от влияния ППН, то её уровень считается правильным, коэффициент k показывает отклонение кривой МТЗ от правильного уровня. Коэффициент k рассчитывался для значений $|Z|$, а не ρ_t по следующим соображениям. Электрические заряды на границах ППН влияют на измеряемое электрическое поле, которое входит в числитель компонент тензора импеданса. Следовательно, для анализа результатов коррекции и оценки величины статического сдвига правильнее использовать значения $k_{|Z|}$. Для коэффициентов статического сдвига для ρ_t верно следующее соотношение: $k_{\rho} = (k_{|Z|})^2$.

Гистограммы распределения коэффициента k , показаны на рисунке 2. Пара гистограмм построена для компонент $|Z_{\text{ХУ}}|$ и $|Z_{\text{УХ}}|$ по десятичному логарифму значений коэффициента сдвига k (рис. 2).

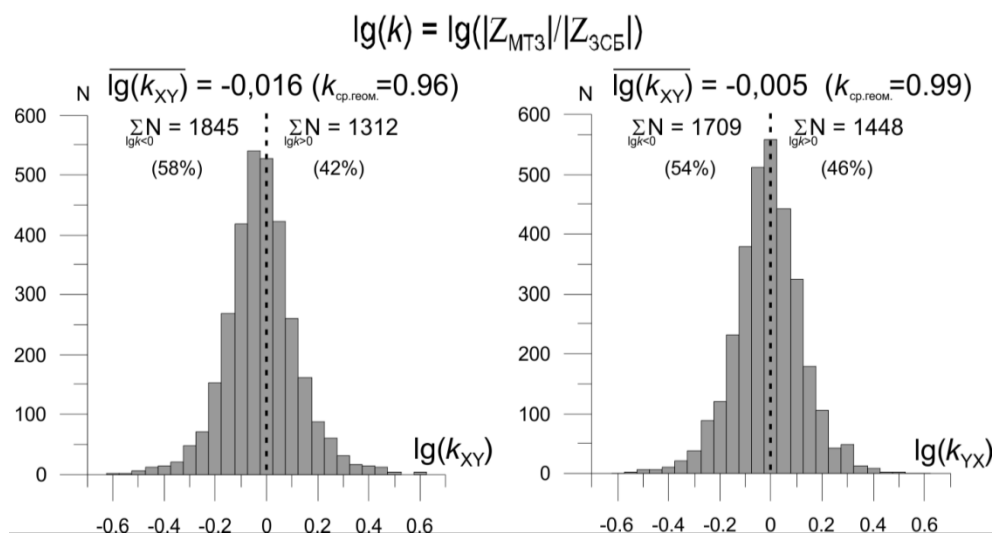


Рис. 2. Гистограммы распределения значений логарифма коэффициента сдвига k кривых МТЗ на Таймыре для 3157 точек. Слева – для меридиональной компоненты (XY), справа – для широтной (YX).

Гистограммы распределения значений логарифма коэффициента k симметричны, центр распределения практически не смещён (смещение левее 1 заметно для k_{XY}). При этом, из 3157 точек большая часть имеет значение коэффициента k меньше 1: 1845 против 1312 точек для k_{XY} и 1709 точек против 1448 для k_{YX} . Несмотря на это среднее арифметическое значение коэффициента k слегка больше 1: для k_{XY} оно равно 1,04, для k_{YX} – 1,05; среднее геометрическое – слегка меньше 1: для k_{XY} оно равно 0,96, для k_{YX} – 0,99. Отсюда сразу напрашивается вывод, что простая пространственная фильтрация с правильно выбранными параметрами или даже простое осреднение должны давать близкий к истине результат.

Необходимо отметить, что отсутствие явного смещения гистограмм относительно 1 и близость к 1 среднего значения коэффициента k – это особенности рассматриваемого региона. На многих других территориях результаты коррекции по моделям ЗСБ показывают смещённое распределение коэффициентов: исходные кривые МТЗ существенно чаще оказываются ниже по отношению к кривым ЗСБ, а среднее значение меньше 1. Такие результаты показаны, например, в работах [Sternberg, 1988] и [Arnason, 2015] и были получены ООО «Северо-Запад» в Восточной Сибири и Боливии.

В докладе на основе результатов моделирования показана возможность наличия систематического занижения коэффициентов смещения. Также рассмотрена зависимость коэффициентов сдвига от соотношения сопротивления неоднородности и первого слоя. На рис. 3 показаны графики коэффициентов сдвига над центрами трехмерной полусферы и двухмерного полуцилиндра в зависимости от контраста сопротивления неоднородностей по отношению к вмещающему слою. Графики показаны в арифметическом масштабе. Для трехмерных неоднородностей с большим контрастом сопротивления ситуация несимметричная – проводящие объекты с сопротивлением в 10 меньше сопротивления вмещающего слоя будут сдвигать кривые сильнее, чем неоднородности с сопротивлением в 10 раз больше. Для двухмерных неоднородностей график симметричный для любых соотношений сопротивления вмещающего слоя и вставки.

Обратим внимание, что при малых контрастах сопротивлений (меньше 0,5) и для двухмерных и для трехмерных неоднородностей (рис. 3) коэффициенты искажений можно считать симметричными относительно единицы. По-видимому, это основное объяснение причины отсутствия смещения на гистограммах распределения значений коэффициента сдвига в Таймырском регионе. На таймырских гистограммах (рис. 2) видно, что коэффициенты сдвига k не превышают 3, а большая часть не

превышает даже 2. Как следует из результатов моделирования (рис. 3), при слабом контрасте сопротивления неоднородностей и вмещающей среды должна наблюдаться симметричная картина, как для двухмерных, так и для трехмерных приповерхностных неоднородностей.

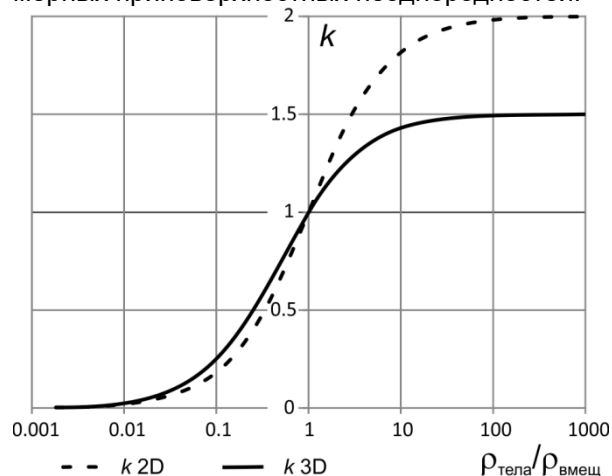


Рис. 3. Графики зависимости коэффициента сдвига k от контраста сопротивления неоднородности и вмещающей среды для модели двухмерного полуцилиндра и трёхмерной полусферы.

И всё же в Таймырском регионе также есть отдельные участки профилей с систематическим сдвигом кривых МТЗ в ту или иную сторону относительно данных ЗСБ. Приведённые в докладе результаты моделирования могут дать ключ к пониманию систематического сдвига среднестатистических оценок значений k , но не позволяют объяснить наличие протяженных участков, где значения k всюду больше или меньше 1. По-видимому, причина также в характере неоднородностей или, быть может, особенностей методики работ на конкретном участке.

Наличие отдельных участков с систематическим сдвигом кривых $[Z]$ вверх или вниз показывает, что на Таймыре желательно проводить ЗСБ для коррекции статического сдвига, обычные статистические методы коррекции на таких участках могут привести к ошибкам. Рассмотрим методику и результаты статистической коррекции статического сдвига.

Статистическая коррекция статического сдвига

Статистический метод борьбы со статическим сдвигом кривых МТЗ был предложен М.Н. Бердичевским в 1980 году. В различных модификациях он описан во многих работах, например, [Warner, 1983; Berdichevsky et al., 1989].

Суть метода заключается в расчете среднего сопротивления для некоторого слоя, сопротивление которого, основываясь на априорных данных, полагается выдержанным или плавно меняющимся в пределах области исследова-

ния. Расчет среднего производится в окне определенного размера, что позволяет использовать значения соседних точек с различным весом. Для получения результирующей кривой исходная кривая смещается по уровню к средней. Поскольку часто осреднение происходит с использованием пространственного гауссовского фильтра на определенной частоте, то такую коррекцию называют пространственно-частотной коррекцией или фильтрацией.

Этот метод широко использовался советскими учеными и продолжает использоваться сейчас. Так как распространению данного подхода активно содействовал М.Н. Бердичевский, то за рубежом этот метод ещё называют *Berdichevsky average* [Rung-Arunwan, 2016]. Российские электроразведчики, в основном приверженцы московской школы Бердичевского, называют этот способ коррекции «нормализацией», однако это может вводить в заблуждение, поскольку в иностранной литературе термин *normalization* не имеет отношения к коррекции статического сдвига.

Для Таймырских данных статистическая коррекция выполнялась на основе пространственно-частотной фильтрации. При проведении фильтрации возникает целый ряд вопросов:

- Какую частоту и радиус фильтра выбрать?
- Что использовать для фильтрации, осреднения: $|Z|$, $|g|Z|$ или кокой-либо инвариант?

Ответить на часть этих вопросов помогли результаты коррекции по ЗСБ более чем на трёх тысячах Таймырских точек МТЗ, а также приведённые в докладе результаты модельных расчётов.

Различные варианты осреднения главных компонент тензора импеданса показаны на рисунке 4 для трех фрагментов разных про-

филей: на первом профиле коэффициенты сдвига не имеют систематического отклонения от 1, на втором систематически меньше 1, на третьем – больше 1. Размер гауссовского фильтра в данном примере равен 11 точкам. Поскольку измерения на Таймыре выполнялись с регулярным шагом в 1 км, то можно считать окно фильтрации равным 11 км. Как видно из данных графиков, все варианты осреднения дают близкий результат, поскольку разброс исходных значений модуля импеданса небольшой: отличие в соседних пикетах не более чем в 3-5 раз.

На рисунке 4 кроме графиков исходных значений компонент модуля импеданса и результатов арифметического, геометрического и инвариантного осреднения компонент, представлен график значений модуля импеданса, скорректированного по ЗСБ. Для профиля 1 все способы осреднения дают одинаковый результат, который совпадает с уровнем по ЗСБ, для профиля 2 все осреднённые кривые лежат ниже уровня по ЗСБ, для профиля 3 – выше. Выше было показано, что по результатам коррекции по ЗСБ в целом значения коэффициентов сдвига распределены логнормально с центром в нуле. При этом, как показано на рис. 4, в исследуемом районе имеются протяженные участки профилей, где коэффициенты сдвига систематически отклоняются от 1 в меньшую или большую сторону. Таких участков в целом не много. Но на таких участках различные методы пространственной фильтрации не будут давать правильный средний уровень (профиль 2, профиль 3). В такой ситуации обычная статистическая коррекция на основе пространственно-частотной фильтрации не позволяет получить верный уровень амплитудных кривых.

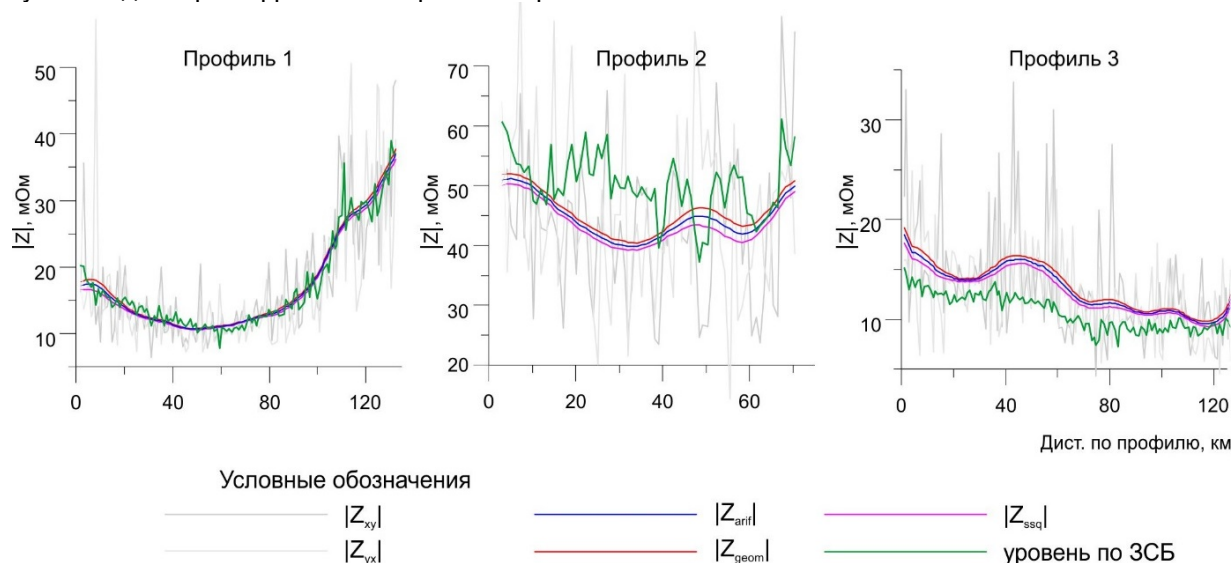


Рис. 4. Арифметическое, геометрическое и среднееквadrатичное осреднение главных компонент тензора импеданса для разных участков профилей и уровень ЗСБ на периоде 1 секунда.

На рисунке 5 Д и Е для одного и того же профиля показаны результаты коррекции по ЗСБ и пространственно-частотной коррекции (частота фильтрации 10 Гц, радиус 7 км). Региональный характер распределения сопротивлений в разрезе в целом совпадает для двух вариантов коррекции, но имеются существенные различия в деталях. Разница между пространственно-частотной фильтрацией и коррекцией по ЗСБ показана пронумерованными прямоугольниками. В 1-й области это - разница в определении удельного сопротивления слоя,

область 2 - появление ложной структуры, области 3 и 4 - и изменение сопротивления, и появление ложной структуры.

Приведённые результаты показывают, что для региональных построений коррекцию сдвига кривых МТЗ можно проводить на основе пространственно-частотной фильтрации. Для более детальных построений во избежание систематического отклонения нужно использовать коррекцию по ЗСБ или дополнительную априорную информацию, как описано в следующем разделе.

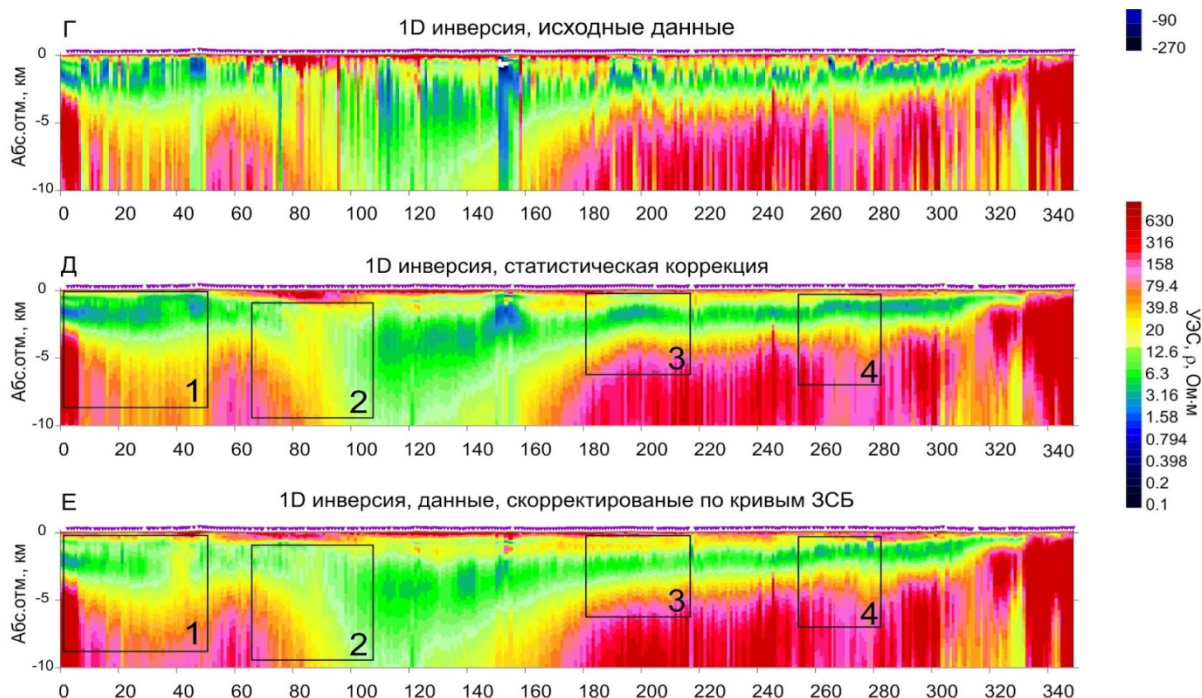


Рис. 5. Частотные разрезы кажущегося сопротивления (А, Б) и фазы импеданса (В), результаты 1D-инверсии для исходных данных (Г), скорректированных с использованием пространственно-частотной фильтрации (Д) и скорректированных по ЗСБ (Е).

Коррекция статического сдвига с использованием априорной информации

Использование априорной информации - один из самых надежных методов коррекции статического сдвига. Одна из модификаций - использование латерально-однородного слоя, сопротивление которого может быть описано простым параметрическим изменением от расстояния, в качестве опорного [Jones, 1988]. В таймырском регионе, несмотря на очень пологое и выдержанное залегание юрско-меловых слоёв, их сопротивление по данным многочисленных скважин меняется по латерали [Афанасенков и др., 2018]. Именно это изменение является объектом изучения электроразведкой. Совместно с электроразведкой на каждом профиле выполняется сейсморазведка МОГТ 2Д. Сейсморазведочную информацию можно использовать для коррекции статического сдвига. Такую коррекцию выполняют в два этапа:

I этап - статистическая коррекция на основе пространственно-частотной фильтрации по описанной выше методике. Пространственно-частотная фильтрация устраняет эффекты только тех искажений, которые носят случайный характер. В случае систематического сдвига в одну сторону пространственно-частотный подход не позволяет корректно устранить искажение. Поэтому такие искажения устраняются на втором этапе ручной корректировкой с использованием сейсморазведочных данных.

II этап - ручная корректировка. Вначале этого этапа по каждому профилю проводится автоматическая одномерная инверсия данных, полученных на первом этапе. Полученный результат инверсии сопоставляется с сейсмическими горизонтами на предмет наличия ложных структур. На участках с ложными структурами вручную корректируется уровень амплитудных кривых МТЗ, проводится новая инверсия для

сопоставления с сейсмическими горизонтами. Этот процесс итерационно продолжается для достижения соответствия геоэлектрического и

сейсмического разрезов. Пример ручной корректировки по опорным сейсмическим горизонтам показан на рисунке 6.

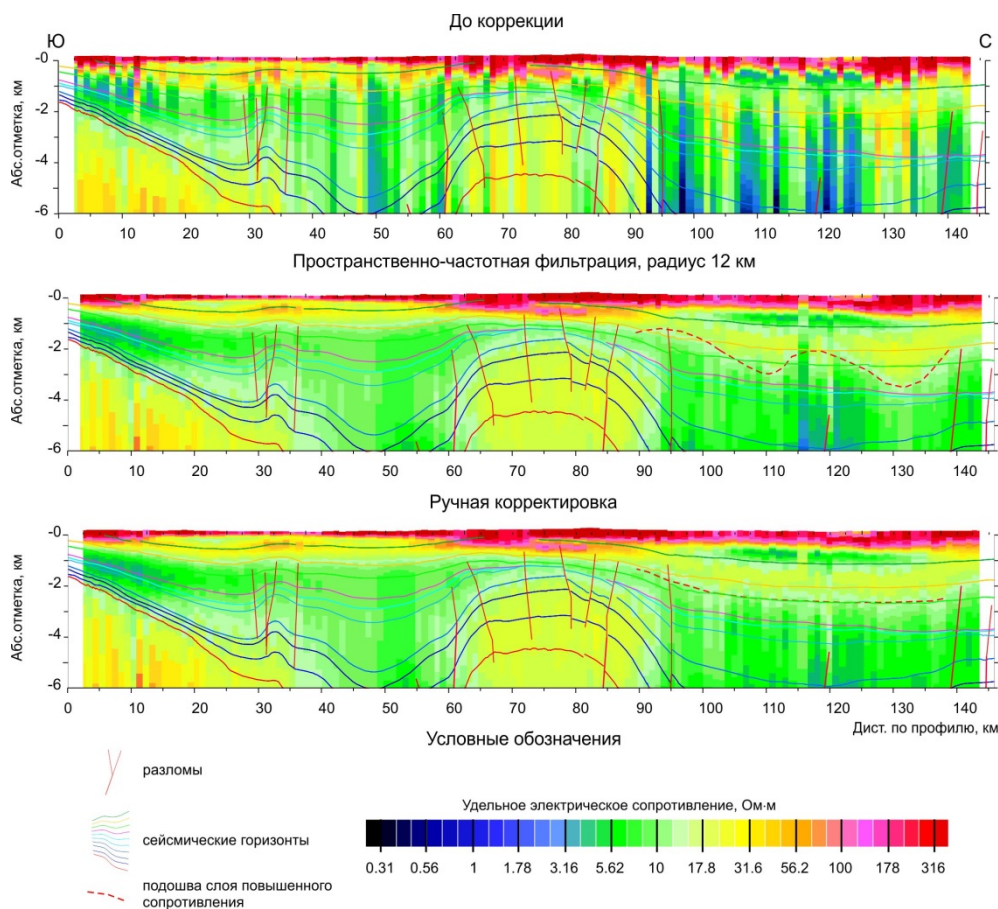


Рис. 6. Результат 1D инверсии до коррекции, после пространственно-частотной фильтрации с радиусом 12 км и после ручной корректировки по сейсмическим горизонтам.

Другие способы коррекции статического сдвига

В работе также рассмотрены следующие способы коррекции статического сдвига:

- решение обратной задачи путём подбора модели с увеличением веса фазы импеданса и уменьшением веса кривых кажущегося сопротивления. Вместо фазовых кривых также был использован фазовый тензор [Bibby et al., 2005; Бердичевский, Дмитриев, 2009];
- подбор коэффициента сдвига как одного из параметров сглаживающей инверсии различных размерностей наряду с удельным сопротивлением и геометрическими параметрами.

Ни один из этих методов не показал себя лучше статистической коррекции.

Обсуждения

В работе представлено исследование по большому объёму фактических данных, связанных с проблемой коррекции статического сдвига кривых МТЗ. Всё ещё имеется целый ряд вопросов, которые требуют дальнейших исследований. К таким вопросам относятся:

- Причина систематических отличий в уровне кривых МТЗ и ЗСБ.

- Использование совместной инверсии данных ЗСБ и МТЗ с автоматической коррекцией влияния ППН.

- Улучшение алгоритмов подбора коэффициентов сдвига в ходе инверсии.

Результаты моделирования подсказывают, что наблюдаемый в некоторых районах систематический сдвиг связан с характером неоднородностей. Представляется возможным из оценки дисперсии вариаций исходных значений модуля Z определить величину коэффициента сдвига.

Выводы

1. Используя большой объём фактических данных ЗСБ и МТЗ на Таймыре, показано реальное распределение коэффициентов статического сдвига кривых модуля импеданса ($|Z_{\text{измеренный}}| / |Z_{\text{истинный}}|$). Коэффициенты сдвига имеют логнормальное распределение. Для Таймырского региона распределение коэффициентов имеет несмещённую оценку с центром в 1. Аналогичные оценки для других регионов показывают, что центры распределения могут быть смещены к 0.9 (Боливия), 0.8

(Восточная Сибирь). Наличие или отсутствие смещения, как показано в данной работе, определяется характером неоднородностей, а точнее соотношением сопротивления неоднородностей и вмещающей толщи. Если сопротивление неоднородности не более чем в 2-3 раза больше или меньше сопротивления вмещающей толщи, то и для 2D и для 3D неоднородностей смещения распределения коэффициентов не будет (при наличии достаточной выборки). Если же контраст сопротивления неоднородностей и первого слоя будет достигать порядка или больше, то будет ожидаемое смещение центра распределения коэффициентов в сторону меньше 1.

2. Общая статистика результатов коррекции по ЗСБ показывает, что для подавления влияния ППН в Таймырском регионе можно применять пространственно-частотную фильтрацию. Для региональных исследований этот способ борьбы со статическим сдвигом кривых МТЗ даёт хорошие результаты.

3. В то же время, данные ЗСБ показали, что имеются отдельные участки на профилях с систематически заниженными или завышенными значениями модуля импеданса. Это доказывает, что несмотря ни на что, ЗСБ нужно делать. При этом, для экономии средств, в Таймырском регионе или в аналогичных геолого-геофизических условиях, ЗСБ можно делать гораздо реже. Для получения реперного уровня достаточно проводить ЗСБ на каждой 2-3 точке МТЗ. В отсутствие ЗСБ желательно использовать другую доступную априорную информацию для определения корректного уровня, например, как показано в работе по опорным сейсмическим горизонтам.

4. В работе показано, что коррекция по ЗСБ зачастую сопряжена со многими трудностями – это и эффекты ВП, это и влияние сильных неоднородностей ВЧР, это и сложный рельеф. В исследуемом регионе из перечисленных проблем на данных ЗСБ проявилась только «быстрая» ВП, связанная с особенностями строения мерзлых пород. Искажения от ВП на кривых ЗСБ на соосных петлях не позволяют корректно восстановить самую верхнюю часть разреза (первые 10-20 м), однако не мешают использовать эти данные для коррекции статического сдвига кривых МТЗ, поскольку эффект ВП происходит в диапазоне времен, предшествующих участку перекрытия с кривой МТЗ.

5. Несмотря на то, что ещё имеются нерешённые вопросы, результаты, представленные в работе, позволяют на новом, более обоснованном уровне подойти к решению проблемы статического сдвига кривых МТЗ на Таймыре и аналогичных по геоэлектрическому строению регионах.

Список литературы

1. Афанасенков А.П., Никишин А.М., Унгер А.В., Бордунов С.И., Луговая О.В., Чикишев А.А., Яковишина Е.В. Тектоника и этапы геологической истории Енисей-Хатангского бассейна и сопряженного Таймырского орогена // Геотектоника, 2016, № 2, с. 23–42
2. Афанасенков А. П., Яковлев Д. В. Применение электроразведки при изучении нефтегазоносности северного обрамления Сибирской платформы // Геология и геофизика. — 2018. — № 7. — С. 1032–1052.
3. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. – М.: Научный мир, 2009. 680 с.
4. Яковлев Д.В., Яковлев А.Г., Валясина О.А. Изучение криолитозоны северного обрамления Сибирской платформы по данным региональных электроразведочных работ // Криосфера Земли, 2018, Том XXII, № 5, с. 77-95 DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2018-5(77-95)
5. Arnason K. The Static Shift Problem in MT Soundings // Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, 2015
6. Berdichevsky, M.N., Vanyan, L.L., Dmitriev, V.I., 1989. Methods used in the U.S.S.R. to reduce near-surface inhomogeneity effects on deep magnetotelluric sounding // Phys. Earth Planet. Inter. 53, 194–206.
7. Bibby H.M., Caldwell T.G., Brown C. Determinable and non-determinable parameters of galvanic distortion in magnetotellurics // Geophys. J. Int., 2005, № 163, 915-930.
8. Jones A.G. Static shift of magnetotelluric data and its removal in a sedimentary basin environment // Geophysics, 1988, Vol. 52, No. 7, 967-978.
9. Electromagnetic soundings // Geophysics, 1988, №53 (11), 1459-1468.
10. Warner B.N., Bloomquist M.G., Griffith, P.G., Magnetotelluric interpretations based upon new processing and display techniques // 53th Ann. Internal. Mtg., Soc. Explor. Geophys., 1983, Expanded Abstracts, 151-154.