УДК 550.837.211:551.24

**И.С.ФЕЛЬДМАН, Б.А.ОКУЛЕССКИЙ**
*ООО «Центр ЭМИ», Москва, Россия*
**А.К.СУЛЕЙМАНОВ, В.И.НИКОЛАЕВА,**
**В.А.КУНЧЕРОВ, С.С.ЧАМО**
*ФГУ ГНПП «Спецгеофизика», пос. Поваровка Московской обл., Россия*

# ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА МЕТОДОМ МТЗ В КОМПЛЕКСЕ РЕГИОНАЛЬНЫХ НЕФТЕГАЗОПОИСКОВЫХ РАБОТ В ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ

Представлены результаты электроразведки методом магнитотеллурического зондирования (МТЗ), выполненные современной канадской аппаратурой MTU по серии профилей МОГТ – МТЗ в европейской части России. Результаты представлены в виде комплексных сейсмогеоэлектрических разрезов общей протяженностью 1430 км. Выполнен анализ электрокаротажных данных по 19 скважинам вблизи профилей и построен сводный геологический разрез от северной границы Московской синеклизы до южного борта Рязано-Саратовского прогиба. Основные проводящие горизонты осадочного чехла приурочены к терригенным образованиям карбона и девона. На значительных интервалах профилей ниже этих образований выделяются проводящие образования венда и рифея. В консолидированном фундаменте прослеживаются структурные особенности осадочно-метаморфизованных пород верхнего-среднего протерозоя. Рассмотрены основные закономерности геоэлектрического строения территории. Обсуждаются задачи и перспективы использования электроразведки в комплексе нефтегазопоисковых работ.

The electromagnetic (MTS) investigations with the use of Canadian MTU equipment have been carried out along CDP profiles, crossing Central Regions of Russia. The results are presented in the form of seismic-geological sections. Their total extend is 1430 km. The analysis of electric logging of 19 boreholes, disposed in the vicinity of the profiles, has been executed. The composite geological section extending from north boundary of Moscow syneclise to south boundary of Ryazan-Saratov trough has been compiled. Principal electrical conduction horizons of sedimentary cover are associated with Carboniferous – Permian terrigenous complexes. Along sizable intervals of the profiles conduction complexes of Meso-Neoproterozoic age are separated below these complexes. Structural features of sedimentary-metamorphic Paleo-Mesoproterozoic rocks are observed in the consolidated basement. The characteristic features of the geoelectric model of the area of investigations are described. The problems and prospects of electrical methods application in complex of hydrocarbon prospecting investigations are discussed.

Электроразведка методом МТЗ является составной частью комплекса геофизических региональных нефтегазопоисковых работ Министерства природных ресурсов РФ в европейской части России. До 1995 г. эти работы выполнялись с аппаратурой ЦЭС-2, разработанной в 70-е годы. С 1996 г. для этих целей стала использоваться более современная аппаратура ЦЭС-М, а с 2001 г. – аппаратура MTU по технологии SSMT («Phoenix Geophysics LTD», Канада). На этом, последнем, этапе благодаря использованию более современных аппаратурных средств и комплекса современных программ обработки и интерпретации существенно выросла геологическая информативность метода. Статья посвящена обсуждению результатов именно этого последнего этапа исследований.

Представленные результаты получены нами совместно с ООО «Северо-Запад» и сопровождались сейсморазведочными работами методом общей глубинной точки (МОГТ) ФГУ ГНПП «Спецгеофизика» и

ОАО «Костромагеофизика». По профилю IV («Рифей»), пересекающему Московскую синеклизу, нами выполнена переинтерпретация данных МТЗ, полученных ООО «Северо-Запад» в составе комплекса нефтегазопоисковых работ ФГУ ГНПП «Спецгеофизика». Профиль IV является частью выполненных нами работ по созданию научно-технической продукции Министерства природных ресурсов РФ № 15.1.3 на 2001-2003 годы.

При полевых работах регистрировались четыре ортогональные компоненты электромагнитного поля Земли в диапазоне от 100-400 Гц до 1000-2000 с. Основной объем работ выполнен при синхронной регистрации с базисным пунктом, что позволило при обработке использовать алгоритм подавления некоррелируемых шумов по схеме Гембала – Лахтионова [2]. В условиях достаточно высокого уровня промышленных помех в центральных районах России это являлось важным фактором повышения точности измерения импеданса. Погрешности определения импеданса по контрольным измерениям составили в среднем по модулю 1-2 %, по фазе 0,7-1°. На завершающем этапе обработки выполнялась согласованная амплитудно-фазовая коррекция.

Интерпретация и построение геоэлектрических разрезов выполнены с использованием программы MTDriver, в которой реализованы разработанные в ООО «Центр ЭМИ» принципы 3d МТ-анализа и интерпретации. Они основаны на известных представлениях о свойствах МТ-поля в неоднородных средах, методах и алгоритмах решения прямых и обратных задач [1, 3-9].

Профили располагаются, в основном, в пределах Токмовского свода и его обрамления. Три профиля выходят за его пределы, пересекая на севере Московскую синеклизу (профиль 4), а на юге – Рязано-Саратовский прогиб (профили 7 и 8). Профиль 9 целиком находится в пределах Казанско-Кажимского авлакогена.

Осадочный чехол района исследований представлен, в основном, образованиями пермокарбона и девона. В юго-восточной части он перекрыт юрско-меловыми отложениями небольшой мощности. Ниже подошвы девонских отложений на ряде участков выделяются проводящие образования предположительно венд-рифейского возраста. В зависимости от полноты представленных стратиграфических комплексов в полученных геоэлектрических разрезах осадочного чехла выделяется, как правило, несколько проводящих и высокоомных горизонтов (толщ). Общее представление о геоэлектрической характеристике данного региона может быть получено по данным электрического каротажа глубоких скважин (рис.1). Наиболее проводящие горизонты, формирующие его геоэлектрический облик, приурочены к юрско-меловым отложениям, терригенным отложениям нижнего и среднего карбона и к нижней (терригенной) части верхнего девона. Существенный вклад в проводимость чехла вносят, при их наличии, и венд-рифейские образования. Данные каротажа свидетельствуют о существенных изменениях в распределении сопротивлений в одних и тех же стратиграфических комплексах от одного района к другому. Такие изменения можно наблюдать и в близко расположенных скважинах.

Начнем рассмотрение результатов работ МТЗ с профиля 4, пересекающего на севере Московскую синеклизу, а на юге – северо-восточный склон Токмовского свода. Геоэлектрический разрез по данному профилю приведен на рис.2. На разрез вынесены сейсмические границы МОГТ. Индексом показана их стратиграфическая принадлежность, определенная на основании данных бурения по редкой сети глубоких скважин. Основная проводимость на большей части профиля приурочена к отложениям нижнего карбона и верхнего девона. Следует, однако, отметить, что далеко не везде геоэлектрические и сейсмические границы совпадают. Такое расхождение отмечено на участке профиля 4 (180-270 км), который соответствует Солигалической инверсионной структуре. Это можно объяснить как возможными ошибками в корреляции данных МОГТ в средней части разреза, так и недоучетом при интерпретации данных МТЗ трехмерного высокоомного блока, расположенного на этом участке в верхней части разреза. Для учета

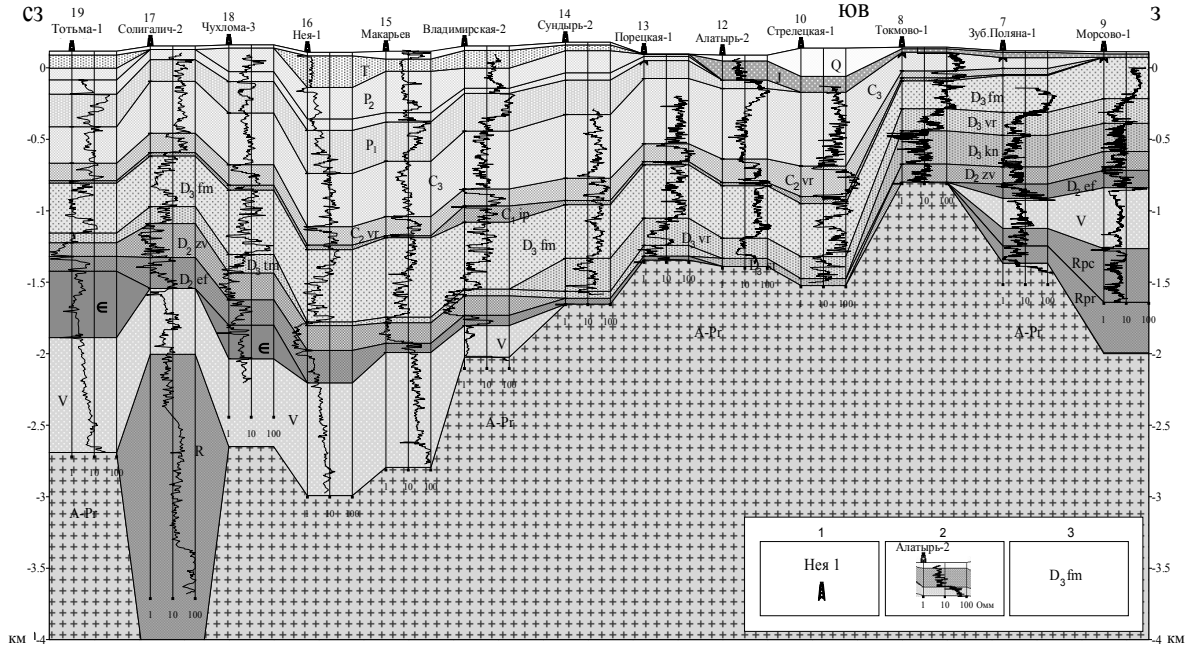



Рис.1. Сопоставление данных электрокаротажа кажущимся сопротивлением (КС) глубоких скважин
1 – скважина, ее название и номер; 2 – каротажная кривая; 3 – возраст пород

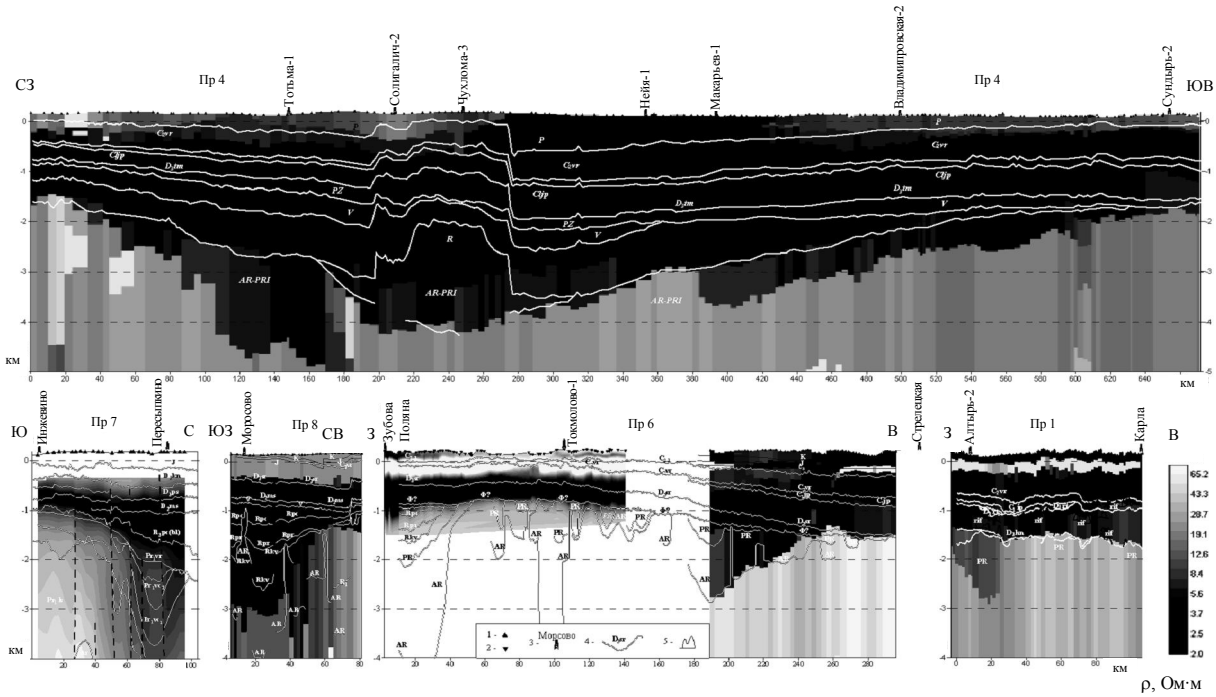



Рис.2. Сейсмогеоэлектрические разрезы по профилям 1, 4, 6, 7 и 8 по данным МТЗ, зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) и МОГТ
1– пункты МТЗ; 2 – пункты ЗСБ; 3 – глубокие скважины; 4 – сейсмические горизонты с индексом стратиграфической принадлежности; 5 – предполагаемые рифовые постройки

трехмерных неоднородностей необходимо иметь площадные наблюдения, которые здесь отсутствуют. Практически по всему профилю хорошо согласуется граница, отделяющая чехол от складчатого основания архей-протерозойского возраста (AR-$PR_1$). Однако в южной и северной частях профиля глубже этой границы по данным МТЗ выделяются проводящие образования, явно относящиеся к осадочному комплексу (рис.2).

Далее к югу располагается профиль 5 Порецкая – Сундырь, являющийся фактически продолжением профиля 4. Наблюдается отчетливая прямая корреляционная зависимость между этими параметрами: увеличение скорости на 200 м/с соответствует увеличению сопротивления примерно в 2 раза. Оба параметра отражают изменение соотношения между карбонатной и глинистой частью отложений в разрезе. Аномалии сопровождаются также изменениями волновой картины разреза МОГТ. Увеличение объема и толщины терригенных прослоек приводит к более выраженной слоистости, которая отчетливо видна на временных разрезах. Как видно из рис.2, в сейсмогеоэлектрическом разрезе достаточно контрастным аномалиям сопротивлений соответствуют участки понижения скорости. С точки зрения прогноза нефтегазоносности наиболее интересна аномалия в интервале локального поднятия на участке профиля между 20-м и 33-м километрами, где в нижней части осадочного чехла (толща «С») существуют хорошо выраженные аномалии обоих параметров. На этом же участке профиля происходит выклинивание подстилающих терригенный девон предположительно венд-рифейских образований (толща «G»), которые могут быть в данном случае нефтематеринскими. Именно здесь возможна разгрузка нефти и газа в палеозойский осадочный чехол из нижележащих отложений.

Следующий профиль от скв. Зубова Поляна-1 до скв. Стрелецкая-1 (профиль 6) весьма показателен для понимания основных закономерностей геоэлектрического строения осадочного чехла обширной территории Токмовского свода и его обрамления (рис.2). Замечательная особенность данного профиля – это увеличение суммарной проводимости осадочного чехла при приближении к вершине свода, т.е. при сокращении его мощности. Электроразведчики привыкли к обратным соотношениям. Причина этого противоречия связана с увеличением мощности терригенных, хорошо проводящих образований нижнего отдела $D_3$ от нуля в скважине Стрелецкая-1 до 400 м на вершине свода (скв. Токмовская-1) при одновременном существенном сокращении мощности вышележащего карбонатного девона ($D_3$) (от 570 до 420 м) и практически полном выклинивании отложений $C_1$ и $C_2$ (от 500-550 до 50 м). Аналогичная геологическая ситуация и характер распределения проводимостей по данным МТЗ наблюдается и на профиле Исса – Лада – Алатырь, который пересекает описанный выше профиль на участке 180-190 км. Данная ситуация типична не только для крупных сводов, но и для локальных поднятий данного региона и отражает инверсионный характер палеоструктур в интервалах $D_2$-$D_3$ и $D_3$-$C_1$.

Севернее профиля 6 от г.Алатырь до р.Карла проходит профиль 1, сейсмогеоэлектрический разрез которого показан на рис.2. Профиль имеет две рассечки (профиль 2 и профиль 3), что позволяет выполнить пространственное картирование геоэлектрических параметров. На основе анализа волнового поля временного разреза МОГТ в отложениях карбонатного девона и $C_1$ выделена целая серия объектов, предположительно связанных с рифами. Областям развития таких построек на геоэлектрическом разрезе соответствуют относительно более высокоомные локальные объекты, что может служить дополнительным прогнозным признаком при их выделении. В связи с этим значительный интерес представляет пространственная структура аномалий суммарной проводимости (сопротивления) девонского комплекса в северо-восточной части площади работ. На этом участке наблюдаются две цепочки высокоомных аномалий, возможно, картирующих группы рифогенных построек, что может иметь существенное значение при прогнозировании нефтегазоносности данной территории.

Как на профиле 1, так и на профиле 6 ниже подошвы терригенного девона в интервале разреза, условно относящемся к складчатому (консолидированному) фундаменту, по данным МТЗ выделяются проводящие зоны с низкими сопротивлениями, соизмеримые с сопротивлениями отложений

терригенного девона. Возможно, здесь мы наблюдаем образования венд-рифейского комплекса пород, которые уверенно картируются в пределах Московской синеклизы.

Рассмотрим сейсмогеоэлектрические разрезы, которые находятся в пределах двух региональных прогибов, определяющих структурно-тектонический облик европейской части России: Рязано-Саратовский прогиб и Казанско-Кажимский авлакоген. Первый из них пересекается профилями 7 и 8. Профиль 7 проходит вкрест юго-западного борта прогиба и выходит на Воронежскую антеклизу, а профиль 8 – пересекает его северо-восточный борт и краевую часть Токмовского свода. Для обоих профилей наиболее яркой особенностью геоэлектрических разрезов являются хорошо проводящие образования в их нижней части (рис.2). Сопротивление этих образований составляет 1-2 Ом·м как по данным МТЗ, так и по данным каротажа глубоких скважин. Стратиграфически они приурочены к отложениям терригенного девона ($D_3$tm) и рифея, в составе которого, по данным бурения, присутствуют мощные пачки глин. Ниже данного проводящего комплекса в относительно высокоомном консолидированном фундаменте выделяются достаточно контрастные аномалии сопротивления, в конфигурации которых мы наблюдаем высокоомные поднятия и относительно низкоомные впадины. Они в своей верхней части находят соответствие в конфигурации сейсмических горизонтов, которые удается прокорректировать в сложной волновой картине, характеризующей внутреннее строение фундамента. Выделяемые структуры находят свое отражение и в гравитационном поле. Поднятиям высокоомных образований соответствуют положительные аномалии $\Delta g_a$, проводящим впадинам – отрицательные. В частности, находит свое объяснение аномалия $\Delta g_a$ в центральной, наиболее прогнутой части Рязано-Саратовского прогиба. Здесь в структуре фундамента мы видим ярко выраженное поднятие высокоомных образований с амплитудой порядка 3-5 км, которое обрамляется прогибами, выполненными в своей верхней части наиболее молодыми образованиями протерозоя.

Выполненные сейсмогеоэлектрические разрезы позволяют выявить некоторые общие закономерности в распределении проводимости осадочного чехла и верхней части земной коры территории европейской части России. Прежде всего, мы видим существенные изменения сопротивлений по латерали для одних и тех же стратиграфических подразделений девона и карбона. Эти изменения коррелируются с изменением скорости $V_p$ МОГТ. Оба этих независимых параметра являются индикатором соотношения терригенной и карбонатной составляющих разреза, что безусловно важно для прогноза нефтегазоносности рассматриваемой территории.

Наблюдаемые изменения сопротивления по профилям являются признаком литолого-фациальных изменений одновозрастных образований по латерали. Латеральные изменения сопротивлений приводят к перераспределению вклада суммарной проводимости девона и карбона в общую суммарную проводимость чехла. Происходящие при этом изменения суммарной проводимости, вызванные изменением проводимости отдельных толщ, могут значительно превышать изменения, связанные с вариациями мощности осадочного чехла в целом. Так, для вершины Токмовского свода и его восточного и северо-восточного склонов уменьшение мощности палеозойского чехла сопровождается не уменьшением, а увеличением его суммарной проводимости за счет увеличения мощности терригенных образований нижней части верхнего и среднего девона.

Везде, где по данным бурения вскрыты венд-рифейские образования, они уверенно картируются по данным МТЗ. Однако, наряду с этим, вне пределов известных рифейских авлакогенов на геоэлектрических разрезах ниже предполагаемой по данным МОГТ кровли фундамента на ряде участков выделяются проводящие образования, по размеру сопротивления близкие к сопротив-

лению терригенного девона. Скорее всего, мы наблюдаем здесь те же венд-рифейские терригенные образования. Как правило, они приурочены к локальным впадинам палеозойского чехла, унаследовав, возможно, более древние троговые структуры начальной фазы формирования Русской плиты. К сожалению, в подобных впадинах мы, практически, не имеем глубоких скважин, поскольку основной объем бурения сосредоточен на поднятиях.

Хотя в целом сопротивление пород консолидированного фундамента заметно выше сопротивления рифей-палеозойского чехла, оно, тем не менее, значительно изменяется по площади работ. В верхней части фундамента выделяется толща с некоторым промежуточным сопротивлением 40-80 Ом·м, которая подстилается высокоомным (опорным) горизонтом ($\rho > 300$-500 Ом·м). Кровля последнего на отдельных участках может погружаться на глубину 10-12 км, а на других резко воздыматься и выходить под подошву осадочного чехла. Данная граница, возможно, отражает поверхность древнего архейского основания платформы. В такой трактовке высокоомные области фундамента должны соответствовать древним ядрам (срединным массивам), а толща с промежуточным сопротивлением – складчато-метаморфизованным образованиям протерозоя.

Роль электроразведки, как, впрочем, и других геофизических методов, в решении проблем непосредственного прогноза нефтегазоносности может быть достоверно оценена только после анализа данных различных методов на эталонных месторождениях нефти и газа. Там, где таких месторождений не выявлено, можно говорить об оценке некоторых благоприятных геологических условий для образования нефтегазовых месторождений. Наиболее важными из таких условий, прогнозирование которых в той или иной мере возможно по данным электроразведки, являются следующие:

- оценка наличия нефтематеринских толщ, способных к генерации нефти и газа;
- прогноз путей миграции на основе анализа структурных особенностей поведения нефтематеринских горизонтов;
- прогноз по комплексу геофизических данных коллекторных свойств и свойств покрышек осадочного чехла в областях выявленных локальных поднятий;
- прогноз возможных рифогенных построек как по профилям, так и по площади.

В заключение хотелось бы отметить, что благодаря внедрению в производство современной высокоточной аппаратуры MTU и технологии SSMT компании «Phoenix Geophysics Ltd» произошел качественный скачок возможностей метода МТЗ. Многократное повышение точности определения импеданса (до 1 % и менее) и расширение диапазона используемых частот позволило дифференцировать геоэлектрический разрез, который ранее (при малой точности измерений) мы могли видеть в самом грубом приближении. Только сегодня стало возможным, используя высокоточные данные, увидеть реальную геологическую информативность метода, которая оказалась много выше сложившихся ранее представлений. Новые данные потребовали создания более совершенных средств обработки и интерпретации. Стало понятно, что геологическая информативность прямо зависит от плотности сети наблюдений и существенно возрастает при переходе от 2d- к 3d-системам измерений. По аналогии с методикой многократных перекрытий методом отраженных волн реализованы методы фокусировки электромагнитного отклика от целевых уровней геоэлектрического разреза при эффективном подавлении влияния верхней части разреза. В ряде случаев это влияние может многократно превышать полезный сигнал, на что ранее не обращали должного внимания. Все это позволяет надеяться на то, что метод МТЗ на своем новом технологическом уровне займет подобающее ему место в комплексе как региональных, так и поисковых работ на нефть и газ на территории Русской платформы.

**ЛИТЕРАТУРА**


1. Анализ и интерпретация магнитотеллурических данных / М.Н.Бердичевский, В.И.Дмитриев, Д.Б.Новиков, В.В.Пастуцан. М.: Диалог-МГУ, 1997. 161 с.

2. *Безрук И.А*. Оценка достоверности определения импедансов при обработке магнитотеллурических вариаций / И.А.Безрук, В.О.Лахтионов // Прикладная геофизика. М.: Недра, 1977. Вып.89. С. 80-87.

3. *Бердичевский М.Н*. Аналитическая модель магнитотеллурического зондирования, искаженного эффектом S / М.Н.Бердичевский, А.Г.Яковлев // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1989. № 9. С.82-88.

4. *Бобачев А.А*. Решение прямых и обратных задач электроразведки методом сопротивления сложнопостроенных сред: Автореф. дис. … канд. геол.-минерал. наук. М.: Изд-во МГУ, 2003. 22 с.

5. *Зингер Б.Ш*. Учет статических искажений в магнитотеллурике: Обзор // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1992. № 5. С.710.

6. Интерпретация глубинных МТ-зондирований в Тунгусской синеклизе / М.Н.Бердичевский, В.И.Дмитриев, И.С.Фельдман и др. // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1988. № 7. С.73-79.

7. Пространственная фильтрация локальных искажений магнитотеллурического поля / Д.Б.Авдеев, Г.С.Годнева, Б.Ш.Зингер, Э.Б.Файнберг // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1990. № 10. С.3-9.

8. *Bahr K*. (1988). Interpretation of the magnetotelluric impedance tensor: regional induction and local telluric distortion // J.Geophys. 1988. 62. P.119-145.

9. Eggers D.E. An eigenstate formulation on the magnetotelluric impedance tensor // Geophysics. 1982. V.47.8. P.1204-1214.