

Н. Г. Шкабарня, В. С. Москвичев

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ МЕТОДОВ СОПРОТИВЛЕНИЙ И ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ, ПОЛУЧЕННЫХ В СЛОЖНОПОСТРОЕННЫХ РАЙОНАХ

Предлагается методика автоматизированной интерпретации данных традиционных методов электроразведки, которая обеспечивает районирование площадей исследования на участки с выделением блоков однотипных моделей, обнаружение и локализацию отдельных геологических объектов, определение физических и геометрических параметров по каждому блоку. В основе методики лежат созданные алгоритмы расчета кажущихся сопротивлений и поляризуемостей для моделей сред, аппроксимирующих основные типы физико-геологических разрезов, и установленные законо-

мерности электрического поля в зависимости от разных классов моделей сред и изменения их параметров. Массовая интерпретация результатов полевых наблюдений осуществляется с помощью пакета прикладных программ и выполняется в виде взаимосвязанных процедур с промежуточными принятиями решений. К настоящему времени по методике обработаны десятки тысяч кривых электрического зондирования и в результате получена ценная информация о геологическом строении различных районов страны.

Методы сопротивлений и вызванной поляризации интенсивно применяются в рудных провинциях в модификации вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ, ВЭЗ-ВП) для получения детальных количественных сведений о геоэлектрическом разрезе изучаемых территорий. Однако эти районы характеризуются весьма сложным строением, что делает практически невозможным применение традиционных ручных и машинных способов количественной интерпретации, использующих горизонтально-слоистую модель геоэлектрического разреза [1, 2, 5, 6, 9, 13, 20]. Геологическое истолкование результатов наблюдений все чаще сводится к качественной интерпретации, обеспечивающей выделение только аномальных областей в поле измеренных значений. Главная задача интерпретации материалов электроразведки — построение геоэлектрической модели среды — выполняется на низком уровне. В последнее время возникла острая необходимость как разработки методологии интерпретации данных зондирований, полученных в сложнопостроенных районах, так и ее технологической реализации с использованием современных вычислительных средств в виде автоматизированной системы обработки и интерпретации.

Предлагаемая авторами методика интерпретации результатов полевых наблюдений обеспечивает районирование площадей исследования на участки с выделением блоков однотипных моделей, обнаружение и локализацию отдельных геологических объектов и определение

физических и геометрических параметров по каждому блоку. Это удалось осуществить благодаря следующему:

1. Решены прямые задачи и созданы устойчивые алгоритмы расчета кажущихся сопротивлений и поляризуемостей для моделей сред, аппроксимирующих основные типы физико-геологических разрезов с наклонными либо крутопадающими границами, клиновидными структурами, локальными объектами (рис. 1, 2) и применяемых в производстве трех- и четырех-электродных установок [7, 10, 12, 15, 16]. Для учета влияния рельефа местности используется частная модель клиновидной среды (см. рис. 1) — «долины» и «хребты» с бесконечными склонами.

2. Установлены закономерности поведения кривых ВЭЗ и ВЭЗ-ВП в зависимости от разных классов моделей сред и изменения их параметров, на основании которых определены критерии выделения блоков однотипных моделей с обнаружением и локализацией геологических объектов определенного типа.

3. Обнаружены и исследованы зависимости смещения экстремальных значений аномалий по разностям для серии кривых зондирования и по профилю на графиках электропрофилеирования от углов наклона границ в разрезе, которые использованы в процессе уточнения типа модели и определения предварительных параметров.

4. Установлена идентичность объемной структуры полей ρ_k и η_k для моделей сред с

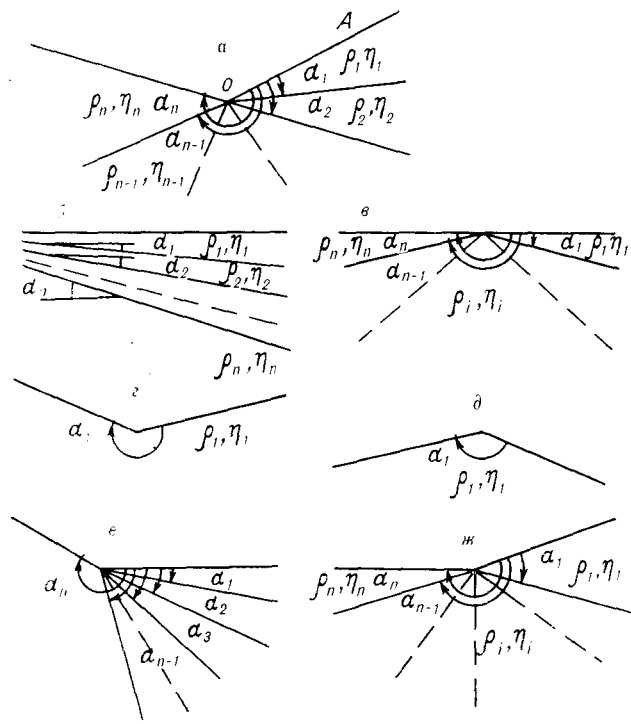


Рис. 1. Обобщенная модель среды с наклонными границами раздела в разрезе (а) и частные случаи: наклонно-слоистые среды (б), неоднородности в виде клина (в), простейшие формы рельефа (г, д), слоистые среды и клин, осложненные рельефом (е, ж).

локальными неоднородностями, которая использована для выделения в разрезе объектов рудной природы на основании комплексного анализа результатов ВЭЗ-ВП.

5. Применяемые в способах количественной интерпретации расчетные поля по разнообразию классов моделей сред, расположению источников и приемников, точности вычислений позволили уменьшить ошибки определения параметров разреза за счет лучшего приближения расчетных значений к экспериментальным.

Интерпретационный процесс состоит из этапов предварительной обработки и количественного анализа и выполняется в виде взаимосвязанных процедур в квазидialogовом режиме, что позволяет использовать интуицию и опыт геофизика-интерпретатора в условиях решения многопараметрической оптимизационной задачи. При этом исходная информация подразделяется на основную и априорную. Основной информацией являются матрицы кажущихся сопротивлений $G = [\rho_{kij}]$ и кажущихся поляризуемостей $F = [\eta_{kij}]$, формируемые по профилям для трех- и четырехэлектродных установок с реальным расположением источников и приемников. Конкретная задача интерпретации должна быть обеспечена полнотой исходного материала. Для выделения и прослеживания

пологих и наклонных границ, протяженных по профилю локальных объектов, требуется более плотная информация по столбцам, а для выделения крутопадающих границ и протяженных на глубину объектов нужна достаточная информация по строкам. Априорной информацией является совокупность предполагаемых сведений о строении разреза, задаваемых геофизиком-интерпретатором с целью сужения класса возможных решений обратной задачи.

Предлагаемая методика реализована в виде автоматизированной системы обработки электроразведочных данных АСОД-ЭР (рис. 3).

Как известно, типовой задачей предварительной обработки данных инструментальных геофизических исследований является обнаружение и локализация объектов [18]. Конкретизируя это общее положение, сформулируем его следующим образом: основными задачами этапа предварительной обработки данных электроразведочных, полученных в горизонтально-неоднородных средах, являются обнаружение, локализация и классификация геоэлектрических неоднородностей по типам моделей с установ-

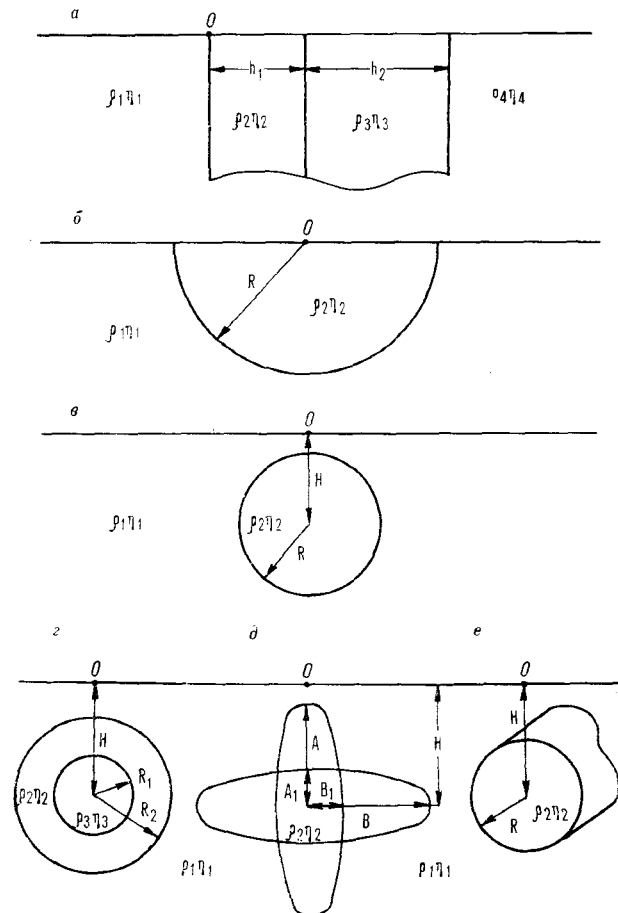


Рис. 2. Модели сред с тремя вертикальными границами (а), полушаром, выходящим на поверхность (б), шаром (в), сферическими оболочками (г), сфероидом (д) и горизонтальным круговым цилиндром (е).

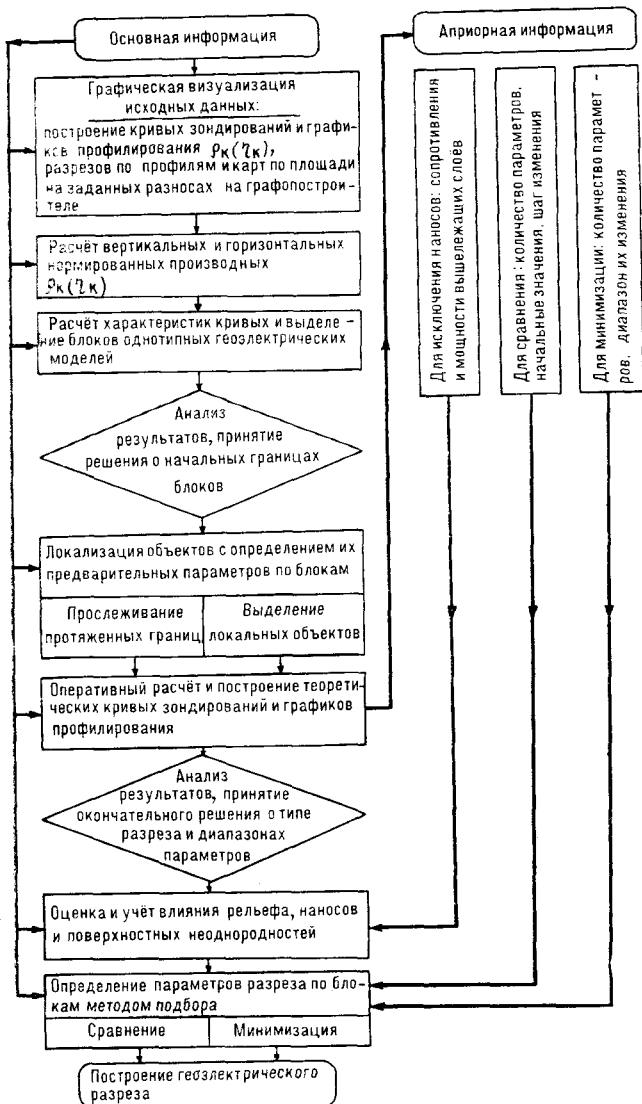


Рис. 3. Принципиальная блок-схема автоматизированной обработки и интерпретации данных ВЭЗ и ВЭЗ-ВП с использованием системы АСОД-ЭР.

лением их предварительных параметров. Следует отметить, что в аналогичных интерпретационных системах [2, 5, 9, 20] этот этап практически отсутствует в связи с тем, что все многообразие реальных геологических ситуаций втискивается в прокрустово ложе горизонтально-слоистой модели геоэлектрического разреза.

Обработка исходных данных начинается с визуального анализа кривых зондирования и графиков профилирования с целью выявления закономерных особенностей, связанных с типом геоэлектрического разреза. Для этого исходные данные вычерчиваются на графопостроителе в удобном для интерпретатора виде. Кривые зондирования строятся от горизонтальной линии в билогарифмическом масштабе с произвольно

заданным модулем. Ниже кривых располагаются графики профилирования для заданных интерпретатором разностей.

Затем программно определяются основные характеристики кривых ρ_k и η_k — гладкость (поведение градиента), изменение градиентов по профилю, экстремальные значения и их поведение по профилю, изломы кривых с учетом амплитуды и знака, расхождение значений при переходе с меньшей приемной линии на большую, углы наклона восходящих и нисходящих ветвей. В соответствии с выработанными на основе анализа результатов моделирования критериями отнесения кривых или их фрагментов к определенному типу геоэлектрического разреза производится его районирование на блоки, в пределах которых превалирует влияние одной из моделей. Конечный результат выдается в виде разреза — таблицы в условных буквенных символах.

На этапе предварительной обработки полевых материалов для получения общего представления о геологическом строении исследуемой площади используется визуализация полей ρ_k и η_k в виде соответствующих разрезов и карт и их трансформация в горизонтальные и вертикальные нормированные производные по известным алгоритмам [8, 9, 17]. Эффективность применения этого приема в системе определяется возможностью анализа результативных материалов на основе сравнения полученных разрезов с тестовыми для всех классов горизонтально-неоднородных моделей. При плотных системах наблюдений по конфигурациям изолиний $\rho_k(\eta_k)$ можно судить о присутствии определенных геологических объектов, а по их изменению делать выводы о границах этих объектов. Разрезы и карты нормированных производных δ_ρ и δ_η обладают большей разрешающей способностью по выделению пологих границ раздела и вертикальных неоднородностей, протяженных на глубину.

На основе анализа полученного материала интерпретатором принимается решение о положении в разрезе блоков однотипных моделей, в пределах которых производятся локализация геоэлектрических неоднородностей и определение их предварительных параметров.

Прослеживание протяженных пологих, наклонных и крутопадающих границ основывается на регулярности аномальных значений ρ_k и η_k по строкам или столбцам соответствующих цифровых матриц и производится путем суммирования и накопления измеренных значений в виде осредненных зависимостей $\bar{\rho}_k(r)$, $\bar{\eta}_k(r)$, $\bar{\rho}_k(x)$, $\bar{\eta}_k(x)$. При этом суммирование строго по строкам или столбцам эффективно для выделения аномалий соответственно от горизонтальных и вертикальных границ раздела. Для выделения аномалий от наклонных

границ необходимо суммировать кривые с некоторым сдвигом по разному, так как форма кривых повторяется со смещением по r . При наличии крутопадающих границ суммирование производится по столбцам со сдвигом по x . По наибольшему аномальному отклонению осредненных зависимостей интерпретатор уточняет количество границ в разрезе, местоположения контактов на поверхности и значения углов наклона границ.

Для выделения в разрезе локальных геоэлектрических неоднородностей, характеризующихся тесной корреляционной связью между сопротивлением и поляризуемостью (зоны минерализации, рудные тела), применяется свертка полей ρ_k и η_k в комплексный параметр с учетом их амплитудных значений и объемной структуры полей. При этом каждой l -й точке нижнего полупространства ставятся в соответствие псевдовекторы R_l и T_l , длинами которых являются амплитудные значения ρ_{kl} и η_{kl} , а направления оцениваются азимутами полных градиентов F_ρ и F_η в элементарных объемах $d\rho_k$ и $d\eta_k$ вокруг l -й точки. Таким образом, поля ρ_k и η_k формально трансформируются в псевдовекторные поля R и T , которые и сворачиваются в комплексный параметр A на основе их скалярного произведения. При этом максимальными значениями A будут отмечаться участки нижнего полупространства с локальными неоднородностями, обладающие идентичной объемной структурой полей ρ_k и η_k и их аномальными значениями.

Проведение вышеописанных процедур и анализ полученных результатов позволяют интерпретатору решить основные задачи этапа предварительной обработки исходных данных — обнаружение, классификация и локализация геоэлектрических неоднородностей с установлением их предварительных параметров. Точное определение этих параметров для выделенных блоков однотипного разреза производится на этапе количественной интерпретации методами подбора в автоматическом режиме. Однако в ряде случаев переход к этому этапу невозможен как без знания границ изменения физических и геометрических характеристик искомого объектов, так и без решения таких важных задач, как оценка влияния рельефа местности, определение параметров «наносов» и исключение их влияния на кривые, оценка влияния поверхностных неоднородностей. Поэтому в автоматизированной системе предусмотрены соответствующие дополнительные операции (см. рис. 3).

Проверку правильности разделения разреза на отдельные блоки и оценку диапазонов изменений количественных параметров объектов осуществляет интерпретатор в интерактивном режиме путем оперативного расчета и построе-

ния теоретических кривых зондирований для различных моделей и установок. Расчеты производятся с заданием реальных параметров разреза, применяемых систем наблюдений и разносов. При необходимости имеется возможность производить наращивание горизонтальных слоев («наносов») на среды с различными неоднородностями. Рассчитанные кривые программным путем сравниваются с практическими, вычисляются отклонения в процентах, на основании чего интерпретатор оценивает степень соответствия заданных им параметров разреза конкретной геологической обстановке.

Учет влияния рельефа на результаты ВЭЗ весьма актуален для большинства рудных провинций. На основе результатов физического и математического моделирования полей в работах [3, 4, 14] показано влияние рельефа местности на измеряемые параметры ρ_k и η_k . Однако в связи с отсутствием эффективного решения прямой задачи на производстве до настоящего времени отсутствует методика практического учета влияния рельефа. В системе реализован автоматизированный способ оценки и учета влияния таких форм рельефа, которые можно представить в виде «хребтов» и «долин» с бесконечными склонами (см. рис. 1). Методика учета основана на следующих положениях. Токовое поле точечного источника имеет шаровую симметрию относительно источника. При отклонении рельефа от полупространства уменьшается или увеличивается объем δV -среды, в котором происходит распространение тока. Изменение объема среды на величину δV вызывает изменение плотности тока в данном объеме, что приводит к появлению аномальных отклонений $\delta\rho_k$. Вычисляя программным путем величину δV на каждом разnose и пользуясь массивном зависимостей $\delta\rho_k = f(\delta V)$, получаем значение для соответствующего разноса, на величину которого и исправляется измеренное значение ρ_k . Предложенный алгоритм является оценочным в силу следующих ограничений: рельеф должен иметь форму «долины» или «хребта» с бесконечными (относительно размеров установок) склонами, нижнее полупространство однородное.

На участках, где глубинные блоки горизонтально-неоднородной среды перекрыты слоистым разрезом («наносами»), интерпретатор имеет возможность определить количественные характеристики «наносов» и исключить их влияние на кривые зондирования. Решение этой задачи производится на основе пересчета кривых зондирования в нижнее полупространство на подошву каждого выделяемого слоя с использованием алгоритма последовательного определения параметров слоистого разреза [11, 20]. Для оценки влияния локальных поверхностных неоднородностей на результаты изме-

рений осуществляется их моделирование путем расчета значений ρ_k для полушара, выходящего на дневную поверхность, сфероида и шара вблизи этой поверхности (см. рис. 2).

Этап количественной интерпретации предназначен для определения параметров среды в пределах выделенных однотипных блоков разреза методом подбора путем минимизации функционала невязки между наблюдаемой матрицей G или F и теоретическими матрицами, рассчитанными для неоднородных сред. В зависимости от полноты априорных сведений о строении разреза и его сложности используются два алгоритма. В первом определению параметров производится на основе сравнения наблюдаемых кривых с заданным набором теоретических кривых. Сначала сравнение производится в точках экстремумов. Если расчетные кривые не совпадают в этих точках с заданной точностью, то они исключаются из дальнейшего рассмотрения. Оставшиеся расчетные кривые из набора сравниваются с практическими в каждой точке. При отсутствии экстремумов на кривых выполняется только последняя операция. Если при сравнении сумма квадратов относительных отклонений окажется меньше заданной величины, то параметры теоретической кривой объявляются «верным» решением. В результате интерпретации три решения, соответствующие минимальным значениям функционала невязки, представляются в виде таблиц и графиков. Выбор наилучшего решения производит интерпретатор с учетом предполагаемых сведений о строении разреза и корреляции параметров в пределах блока.

Во втором алгоритме поиск искомого параметров сводится к определению в многомерном пространстве минимума функции отклика по заданному массиву параметров с двухсторонними ограничениями по каждому из них. В основе применяемого метода положен алгоритм по координатного спуска с периодическим вращением координат. Процесс минимизации происходит путем вычисления функции отклика F при изменении i -й координаты начального приближения, а в дальнейшем любого текущего приближения. Если последовательность F убывает, то шаг по координате считается удачным и определяется новое приближение. При выполнении операции по всем координатам происходит пересчет матрицы базы пространства векторов с целью поворота осей координат таким образом, чтобы одна из них совпала с направлением «оврага» функции отклика. Интер-

претация с помощью данного алгоритма дает одно решение, которое при неоправданном расширении границ поиска может быть эквивалентным.

Каждый из двух алгоритмов подбора обладает своими достоинствами и недостатками. Поэтому для повышения точности интерпретации и рационального использования машинного времени геофизик-интерпретатор имеет возможность комплексировать алгоритмы. В частности, задав на начальном этапе решения обратной задачи достаточно широкие диапазоны количественных параметров разреза и грубый шаг их дискретизации, интерпретатор с помощью алгоритма сравнения определяет в пределах этих диапазонов интервалы нахождения истинных значений параметров, а затем, применяя алгоритм минимизации, локализует в границах этих интервалов их истинные значения.

Для повышения надежности результатов количественной интерпретации особое значение имеет задание начального приближения и использование предполагаемых сведений о геоэлектрическом разрезе. В процессе обработки массовых наблюдений используются приемы задания начального приближения по результатам интерпретации параметрических кривых, закрепление физических параметров определенных объектов (слоев, тел), выбор узких пределов их изменения.

Массовая интерпретация результатов полевых наблюдений на ЭВМ осуществляется с помощью пакета прикладных программ, который включает программную систему. Обращение к системе реализуется в форме запроса, содержащего требования к обработке данных по операциям и сами данные. Управление работой пакета заключается в выборе исследователем графа интерпретации, контроля правильности прохождения программ, в оперативном использовании априорной информации, оценке получаемых результатов и принятии промежуточных и окончательных решений. К настоящему времени пакет программ опробован на материалах экспедиции ПГО Приморгеология, Якутгеология, Дальгеология, Камчатгеология.

Можно не сомневаться, что новый этап развития математического обеспечения для электрических зондирований, не ограниченный рамками математического аппарата горизонтально-слоистой среды и предельными установками, приведет к повышению эффективности методов, дальнейшему расширению их возможностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамова Е. Ш. Новая методика оперативного машинного решения прямой задачи ВЭЗ.— Сер. Физика Земли, 1979, № 2.

2. Абрамова Е. Ш. Алгоритм решения обратной задачи ВЭЗ с учетом геологической интерпретации.— Экспресс-инф. Ред. разв. и промысл. геофизика. М.: ВИЭМС, 1979, № 1.

3. *Вешев В. А.* Электропрофилирование на постоянном и переменном токе.— Л.: Недра, 1980.
4. *Блох Н. М.* Электропрофилирование методом сопротивлений.— М.: Госгеолтехиздат, 1962.
5. *Гудзь В. Н., Ряполова В. А.* Новый способ машинной интерпретации кривых вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ).— М.: Изд-во ВНИИТранс. стр-ва, 1976.
6. *Изогова Е. Б.* Программа «Поле-75» для решений прямой и обратной задачи ВЭЗ и ВЭЗ-ВП для ЭВМ М-222.— Л.: НИО «Геофизика», 1979.
7. *Израильский Ю. Г., Шкабарня Н. Г.* Алгоритм расчета кажущихся сопротивлений и поляризуемостей для среды с неоднородностью в виде сфероида.— В кн.: Прикладная геофизика, вып. 110. М.: Недра, 1984.
8. *Киричек М. А., Бугрова А. С., Шкабарня Н. Г.* Об аномалиях нормированных производных от газонефтяных залежей при наблюдениях ДЭЗ.— В кн.: Прямые поиски месторождений нефти и газа геофизическими методами. Сер. Регион., развед. и промысл. геофизика, № 22. М.: ВИЭМС, 1971.
9. *Колесников В. П.* Обработка и интерпретация результатов вертикального электрического зондирования с помощью ЭВМ.— М.: Недра, 1981.
10. *Липская Н. В.* Поле точечного электрода, наблюдаемое на поверхности земли вблизи погруженной сферы.— Изв. АН СССР. Сер. геол. и геофиз., 1949, т. 13, № 5.
11. *Матвеев Б. К.* Интерпретация электромагнитных зондирований.— М.: Недра, 1974.
12. *Морозов В. А., Шкабарня Н. Г.* Расчет кажущихся сопротивлений и поляризуемостей для горизонтально-слоистых сред при использовании установок не-предельного типа.— В кн.: Морская геология и геофизика, вып. 6. М.: ВИЭМС, 1983.
13. *Мыцкич Н. В.* Автоматическая интерпретация кривых ВЭЗ с использованием дополнительной информации о разрезе.— В кн.: Материалы IV науч. конфер. аспирантов и молодых ученых. МГУ. Секция «Геофизика».— М.: ВИНТИ, № 4022—77. Деп., 1977.
14. *Поляков А. С.* Влияние рельефа на кривые комбинированного профилирования.— Сб. тр. Казахского геофиз. треста, НТО Горное. Алма-Ата, 1958.
15. *Сахарников Н. А.* Поле точечного источника в среде, состоящей из клиновидных однородных частей.— Уч. зап. ЛГУ, № 329, вып. 16. Л.: ЛГУ, 1966.
16. *Скальская И. П.* Поле точечного источника тока, расположенного на поверхности земли над наклонным контактом.— Журн. тех. физики, 1948, вып. 10, т. 18.
17. *Способ* нормированных производных для интерпретации материалов электроразведки в Западном Узбекистане.— Экспресс-инф. Сер. регион. развед. и промысл. геофизика, № 79. М.: ВИЭМС, 1971.
18. *Страхов В. Н.* Становление геофизической кибернетики — фундаментальная проблема разведочной геофизики ближайших десятилетий.— Геофиз. сб. АН УССР, 1979, вып. 87.
19. *Холфин Л. А.* Поле точечного источника в присутствии сжатого и вытянутого сфероидов.— Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1956, № 6.
20. *Шкабарня Н. Г., Гриценко Б. Г.* Интерпретация кривых вертикального электрического зондирования с применением ЭВМ.— М.: Недра, 1971.