

ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ БАРГУЗИНСКОЙ ВПАДИНЫ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ

М.И. Эпов, Н.Н. Неведрова, А.М. Санчаа

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Коптюга, 3, Россия

Посвящена возможностям современной интерпретации фоновых материалов, полученных в 50-х годах прошлого века на территории межгорных впадин Байкальской рифтовой зоны. Большой объем геофизических работ, в том числе и электроразведочных, методом вертикального электрического зондирования был проведен в Баргузинской депрессии. Интерпретация полевых данных в те годы была выполнена лишь частично. На современном этапе использовались программы математического моделирования и инверсии, а также географические информационные системы. Получены количественные оценки геоэлектрических характеристик и построены модели, отражающие сложное блоковое строение осадочного чехла и верхней части фундамента депрессии.

Баргузинская впадина, электрические зондирования, компьютерная интерпретация, двумерное моделирование и инверсия.

A GEOELECTRICAL MODEL OF THE BARGUZIN BASIN IN THE BAIKAL RIFT ZONE

M.I. Epov, N.N. Nevedrova, and A.M. Sanchaa

We processed data from geophysical survey archives of the 1950s acquired in intermontane basins in the Baikal Rift, including a large collection of vertical electric soundings (VES) from the Barguzin basin, which remained only partly interpreted. The processing and reinterpretation became possible with the advanced computing facilities and software for forward modeling and inversion, and GIS tools. We estimated the electrical parameters and modeled the complex block structure of the uppermost basement and sediments beneath the Barguzin basin.

Vertical electric soundings, data processing, 2D forward modeling and inversion, Barguzin basin

ВВЕДЕНИЕ

Для глубинных исследований в сейсмоактивных районах были привлечены полевые данные электроразведки прошлых лет, хранящиеся в геологических фондах. Предварительный анализ показал, что качество полевых измерений и использованные установки позволяют восстанавливать геоэлектрическое строение межгорных впадин. Ранее для реконструкции модели Чуйской впадины Горного Алтая были использованы данные электромагнитных зондирований становлением поля, полученные в 80-е годы прошлого столетия [Неведрова и др., 2001]. Геоэлектрическое строение Селенгинской депрессии представлено по результатам интерпретации вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ), проведенных в 50-х годах. При постановке этих измерений применялись питающие линии размером до 16 км, что позволило получить информацию о разрезе до глубин более 4 км [Жирова и др., 1993; Мандельбаум и др., 1996]. Такие же материалы имеются для других межгорных впадин Байкальской рифтовой зоны — Баргузинской, Тункинской, Гусиноозерской, Муйской. По геологическим сведениям эти впадины генетически похожи, но у каждой присутствуют характерные особенности. В формировании всех рифтовых впадин значительную роль играют разрывные нарушения, создающие сложную блоковую структуру их внутреннего строения. Дневная поверхность обычно полностью закрыта четвертичными отложениями, а скважин для изучения глубинных объектов недостаточно [Флоренсов, 1960]. Именно интерпретация дистанционных геофизических материалов позволяет значительно уточнить строение этих тектонических объектов [Нефедьев, 2003].

Часть полевых кривых ВЭЗ, полученных на территории межгорных впадин, осложнены присутствием вечной мерзлоты, неоднородной верхней частью разреза, а также многочисленными разломными нарушениями. Именно эти факторы не позволили в прошлые годы проинтерпретировать материал в полном объеме. Современные средства интерпретации дают возможность работать с самыми сложными полевыми данными.

На примере Баргузинской депрессии показана методика обработки и интерпретации полевых электроразведочных данных, полученных в сейсмоактивных районах, приведены основные результаты, а также сформулированы задачи, которые можно решать с помощью методов электростроения. В ходе работы были использованы одно- и двумерные программы математического моделирования и инверсии, а также географические информационные системы.

АПРИОРНАЯ ИНФОРМАЦИЯ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Представленные в этом разделе материалы были использованы в ходе интерпретации полевых данных при создании начальных геоэлектрических моделей для современных комплексов обработки. При заведомо сложном строении межгорных впадин обоснованное формирование первого приближения имеет принципиальное значение. Эти же сведения позволили сформулировать основные задачи исследования. Затем в результате интерпретации полевых данных электротомии удалось подтвердить некоторые изложенные здесь геологические гипотезы.

Баргузинская депрессия является одной из крупных кайнозойских структур Байкальской рифтовой зоны, имеет сложное строение и в то же время изучена недостаточно. Например, геофизические работы, направленные на исследование глубинного строения, были выполнены только один раз в середине прошлого века [Булмасов, 1968]. Морфологически депрессия связана с самим оз. Байкал и постирается (от деревень Читкан и Баргузин на юго-западе до сел Дырен и Тазы на северо-востоке) примерно на 240 км при средней ширине около 30 км. Ее относят к сухоходольным впадинам байкальского типа [Флоренсов, 1960]. По рис. 1, А можно судить о размерах и геометрии впадины, ограниченной со всех сторон хребтами. С северо-запада проходит Баргузинский хребет, вдоль которого со стороны впадины наблюдается система разрывных нарушений. Именно здесь отмечаются максимальные амплитуды смещения по разломам. Абсолютные отметки высот хребта составляют 2200—2600 м. Считается, что ось впадины заметно смещена к подножию Баргузинского хребта. Такое строение называют типичной байкальской асимметричностью поперечного сечения, для которого характерны более крутые северные, северо-западные и достаточно пологие южные борта [Ламакин, 1968].

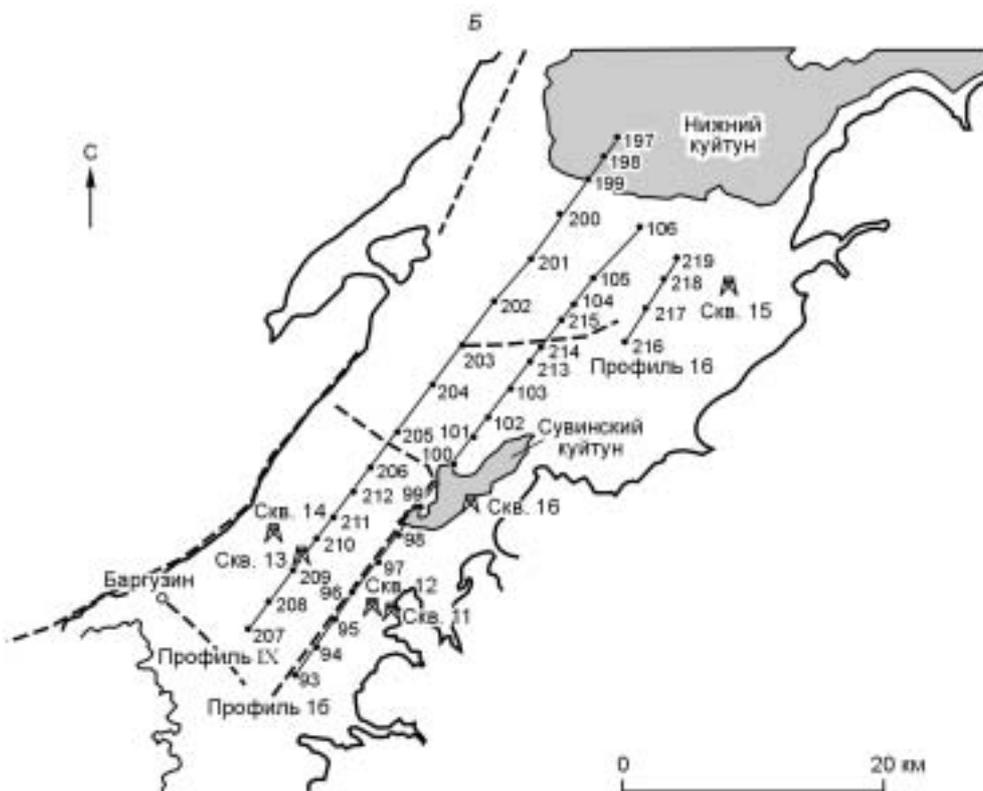
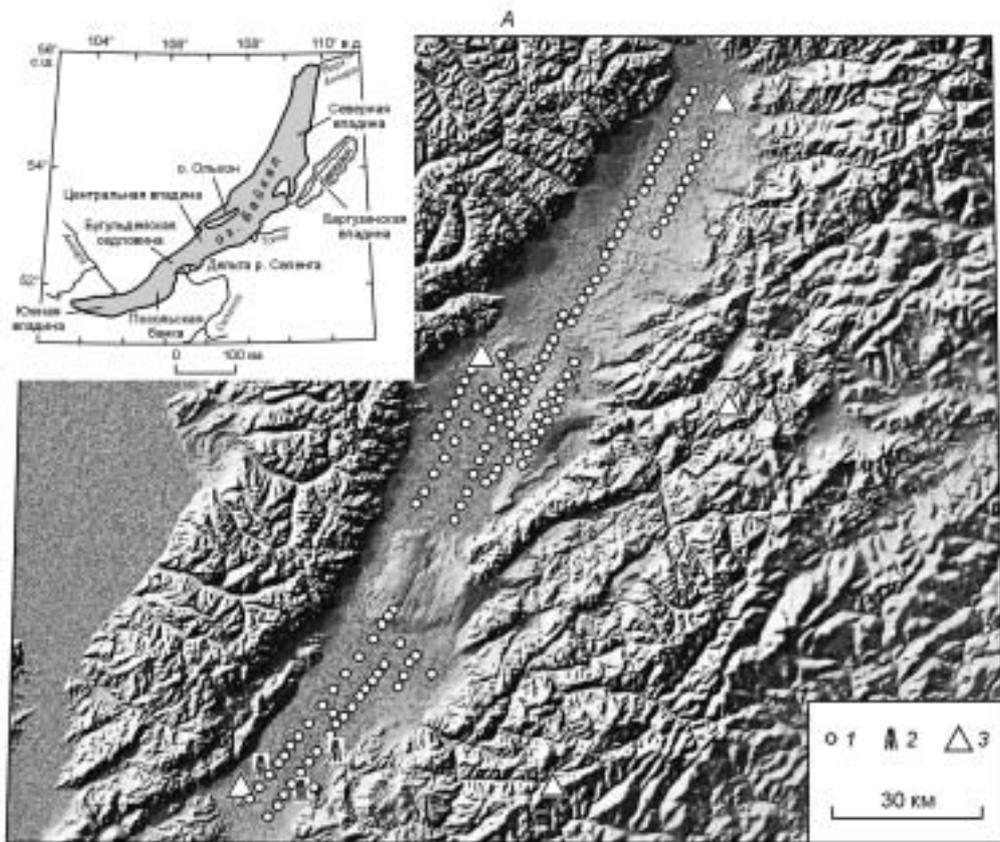
На юго-востоке депрессию ограничивает Икатский хребет, абсолютные отметки которого не превышают 1000 м, а также Голондинское и Улан-Бургасское сводовые поднятия. У этого борта впадины большие площади занимают песчаные возвышенности — куйтуны, которые плавно переходят в Икатский хребет, сливаясь с ним иногда без резких перегибов в рельефе. Происхождение куйтунов до сих пор не выяснено. Время их образования относят к периоду максимального горно-долинного оледенения. Высказывается несколько гипотез происхождения куйтунов. Например, их можно рассматривать с тектонических позиций как антиклинальные поднятия в результате современных движений [Саркисян, 1958; Ламакин, 1968], но совокупность геологических данных не подтверждает эти предположения. По мнению других исследователей, современные очертания куйтунов не отвечают истинному расположению поднятий фундамента [Сейсмогеология..., 1981; Мац и др., 2001]. Существует гипотеза, что куйтуны образовались благодаря явлениям вспучивания, возникающим в результате нахождения мощных линз мерзлоты в толще песков, и, таким образом, можно считать куйтуны криогенными структурами, производными мерзлотной тектоники [Булмасов, 1968; Плиоцен..., 1982]. Все они сложены песчаными разностями, практически не обводненными. В направлении с юго-запада на северо-восток выделяются Сувинский, Нижний и Верхний куйтуны.

Данные по стратиграфии Баргузинской впадины немногочисленны. Горное обрамление впадины представлено породами докембрия, преимущественно гранитами [Логачев, 1968]. Лишь на окончании Сахулинского отрога и далее на северо-восток наблюдаются породы протерозоя — мраморы и гнейсы [Саркисян, 1958]. Сама впадина выполнена неоген-четвертичными осадками. В пределах впадины третичные отложения закрыты сплошным покровом четвертичных образований. Только местами в прибортовых частях на юго-западе обнажаются верхнетретичные отложения.

Четвертичные отложения изучены наиболее полно. Приводится схема [Голдырев, 1982; Бухаров, 1996] их деления и литологический состав. Отложения отличаются сезонной слоистостью и фациальной изменчивостью. Анализ геологических данных показал, что они имеют среднюю мощность около 250 м (до 400 м в центре впадины, и несколько десятков метров на окраинах). Нижний отдел четвертичных пород согласно залегает на неогеновых отложениях и представлен конгломератами, галечниками, песками, глинами, алевrolитами. По направлению к хребтам отложения становятся более грубообломочными. Выше по разрезу расположены осадки преимущественно ледниковые, представленные в основном слабоокатанными глыбами, и флювиогляциальные, которые состоят из валунно-галечного материала с песчаным заполнением. Пески и супеси слагают достаточно большие площади во впадине, в частности куйтуны, с мощностью песчаных отложений, представленных мелкозернистыми песчаными разностями, предположительно достигающих 400—500 м.

Самая достоверная глубинная информация получена по материалам бурения. Наиболее глубокая скв. Р-1 находится недалеко от с. Могойто в центральной части впадины. Она вскрыла весь разрез четвертичных и третичных отложений и на глубине 1400 м вошла в кристаллический фундамент, сложенный гнейсами. Четвертичные образования мощностью около 200 м представлены рыхлыми песками, галечниками, гравелитами. В интервале 117—217 м обнаружена многолетняя мерзлота. Ниже по разрезу залегают третичные породы, отнесенные к верхнему и среднему плиоцену. До отметки 650 м встречаются прослойки гальки и конгломератов. Ниже этого уровня идут более тонкослоистые отложения,

Начало рис. 1



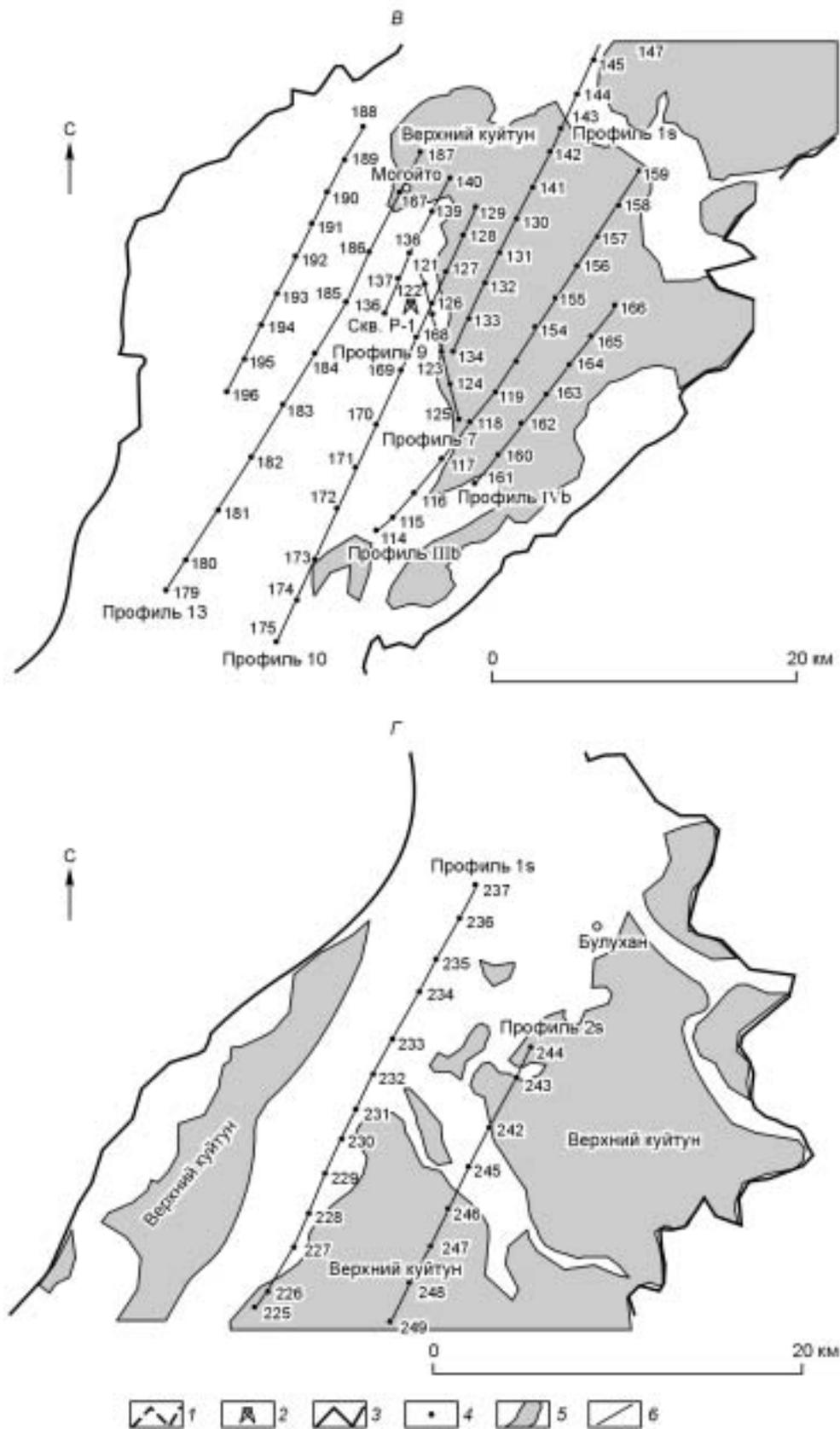


Рис. 1. Схема размещения:

А — Баргузинской впадины: 1 — пункты ВЭЗ, 2 — скважины, 3 — пункты МТЗ; *Б–Г* — профилей и пунктов ВЭЗ (с элементами геологической карты): 1 — разломы, 2 — скважины, 3 — граница горного обрамления, 4 — пункты ВЭЗ, 5 — куйтун, 6 — профили ВЭЗ.

представленные на глубинах 650—800 м в основном глинами и песчаниками. Самая нижняя часть осадков (в интервале 800—1400 м) сложена переслаивающимися глинами и алевролитами [Плиоцен..., 1982]. В южной части впадины скв. 10, 11, 15 вскрыты породы фундамента, представленные гранитами. Выше лежащие осадочные отложения имеют состав, аналогичный вскрытым в скв. Р-1.

Приведем кратко геологическую историю развития впадины. Крупные исследователи Байкальской рифтовой зоны [Саркисян, 1958; Флоренсов, 1960] предполагают существование миоценовых отложений, пока не вскрытых бурением. Также вероятно, что здесь в миоцене был небольшой водоем, хотя на данном этапе пока не обнаружено достоверно установленных пород миоцена. В плиоцене Баргузинская впадина занята озером, сходным по характеру с древними озерами Селенгинской и Тункинской депрессий. Тонкая горизонтальная слоистость осадков и присутствие диатомитов, свидетельствуют о спокойных условиях осадконакопления. Более грубый материал накапливался только в прибрежных частях. Озеро отличали большие размеры и глубины. Таким образом, среднеплиоценовые отложения имеют озерное происхождение и достаточно постоянный состав по всей территории депрессии. Их мощность хорошо выдержана по простиранию структуры [Саркисян, 1958]. Далее в верхнем плиоцене озеро мелет и заболачивается, появившиеся реки привносят грубообломочный материал и накапливаются верхнеплиоценовые озерно-болотные отложения [Плиоцен..., 1982].

Во впадине повсеместно развита многолетняя мерзлота. Она вскрыта скважинами в южной и центральной частях и имеет, по-видимому, островной характер, подразделяясь на приповерхностную и глубинную. Мощность приповерхностных слоев достигает нескольких метров. Учитывая северное положение Баргузинской впадины, мощность глубинных прослоек предположительно оценивается в несколько сотен метров. Они расположены под слоем талых грунтов и находятся обычно в термически неустойчивом состоянии [Солоненко, 1960].

Исследователи этого региона расходятся в своих положениях об основных тектонических особенностях впадины. Одни считают главными дизъюнктивные нарушения, другие — складчатые [Логачев и др., 1982]. Вдоль побережья оз. Байкал господствует сбросовая тектоника. Многочисленные сбросы, ориентированные в северо-восточном и северо-западном направлениях, создают мозаику горстов и грабенов, являющихся частью грандиозной системы разломов [Очерки..., 1977; Сейсмогеология..., 1981; Проблемы..., 1981]. По совокупности геологических данных Баргузинская впадина рассматривается как грабен, разделенный на три части: верхнюю до р. Гарга, среднюю до р. Улан-Бургас и нижнюю до с. Баргузин. В целом же докайнозойские разломы Баргузинского района имеют два направления: северо-восточное и северо-западное. При этом разломы северо-восточной ориентировки являются наиболее протяженными [Ламакин, 1968; Замараев и др., 1979].

Байкальская рифтовая зона — одна из наиболее активных внутриконтинентальных сейсмических зон Земли. Современная структура Баргузинской впадины возникла в ходе кайнозойской активизации, охватившей в олигоцен-голоцене область байкальской складчатости. Сеть цифровых сейсмических станций дает новые возможности для проведения анализа наблюдений. Эпицентры землетрясений четко группируются в линейную полосу, ориентированную вдоль Баргузинской впадины. Полоса эпицентров предположительно совпадает с областью, которую могут образовать относительно приподнятые блоки фундамента впадины [Сейсмогеология..., 1981].

Рассмотрим основные зависимости удельного электрического сопротивления (УЭС) от конкретных геологических и литологических характеристик пород Баргузинской впадины. Чем крупнее зернистость песчаников и песков и чем больше размер гальки, тем выше сопротивление. При переходе от тонкослоистых глин к пескам с примесью грубообломочного материала УЭС меняется от единиц до десятков и сотен Ом·м. Таким образом, можно ожидать, что плиоценовые отложения глубокого озера, залегающие на фундаменте, будут иметь достаточно низкие электрические сопротивления. Так как по геологическим сведениям эти отложения выдержаны по составу, их УЭС будет достаточно постоянным для всей впадины. Учитывая интерпретацию полевого материала в 1950-е годы, примерный интервал значений можно определить в 15—30 Ом·м. Выше по разрезу для отложений верхнего плиоцена предполагается значительное повышение УЭС до сотен Ом·м. Электрические сопротивления четвертичных отложений обычно меняются в очень широком интервале, что находится в прямой зависимости от их обводненности и литологического состава. Свойства многолетней мерзлоты описаны, например, [Джурик и др., 2000]. Значительные колебания электрических параметров особенно характерны для мерзлых песчано-глинистых отложений. При замерзании УЭС таких пород может увеличиться в сотни и тысячи раз. Геоэлектрические характеристики многолетней мерзлоты Байкальской рифтовой зоны приведены в работе [Огильви, 1990]. Определения УЭС проводилось различными методами, в том числе и с помощью параметрических ВЭЗ. Получены очень высокие значения, достигающие тысяч и десятков тысяч Ом·м.

Учитывая предшествующий опыт и изложенное в этом разделе, сформулируем основные задачи, которые можно решать на основе интерпретации полевых данных геоэлектрики для тектонических впадин:

- определить геометрические и электрические параметры основных литологических комплексов осадочного чехла и фундамента;
- установить геоэлектрические характеристики криогенных образований и очертить области их размещения;
- построить модель поверхности фундамента и определить параметры и направления основных разрывных нарушений;
- подтвердить основные особенности строения, в частности, байкальскую асимметричность;
- обосновать происхождение отдельных структурных элементов впадины — куйтунов.

ХАРАКТЕРИСТИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МАТЕРИАЛА

В середине прошлого века в Баргузинской впадине был проведен комплекс геофизических работ, направленный на изучение глубинного строения. Работы выполняли полевые партии геофизических организаций Иркутска [Булмасов, 1968]. В комплекс входила гравитационная, магнитная съемка, а также сейсморазведка методами МОВ и КМПВ. Значительный объем исследований выполнен с использованием электротеллурии, а именно электрические зондирования с установкой Шлюмберже (ВЭЗ), а также магнитотеллурические зондирования (МТЗ). Шаг между пунктами ВЭЗ в среднем составлял 2 км. В северной части впадины, наиболее слабо изученной, зондирования проведены с шагом в 1 км. Вследствие того, что глубины исследования предполагались порядка нескольких километров, а также учитывая присутствие вечной мерзлоты и грубообломочных пород в верхах разреза, максимальный полуразнос питающей линии составил 8 км. Так как впадина имеет сравнительно малую ширину при большой глубине залегания опорного горизонта, то чтобы избежать искажений, вызванных бортами впадины, установка ориентировалась по простиранию впадины. Контрольные пункты были выполнены в достаточном количестве. Точность измерений оценивается около 5 % на малых разносах и ± 7 до ± 15 % на больших. На рис. 1, Б—Г показана схема размещения профилей и пунктов наблюдений ВЭЗ соответственно для южной, центральной и северной частей Баргузинской впадины.

Анализ полевого материала ВЭЗ показал, что на правую асимптоту выходит большая часть кривых кажущегося сопротивления, что позволяет определить мощность осадочной толщи и сопротивление опорного электрического горизонта. На рис. 2 показаны характерные полевые кривые, полученные в Баргузинской впадине. Для первой кривой (ВЭЗ-97) возможна интерпретация в рамках горизонтально-слоистой модели среды. Приведена теоретическая кривая и наиболее вероятная геоэлектрическая модель, полученная с помощью решения обратной задачи. Справа показан график ВЭЗ-117 с характерными для этого региона искажениями. В области максимума наблюдается влияние локальной высокоомной неоднородности. Значения УЭС для второго и третьего слоев в несколько тысяч Ом·м свидетельствуют о присутствии глубокой многолетней мерзлоты. Следует отметить, что искажена в основном только область максимума. Это позволяет определить основные геоэлектрические параметры разреза по неискаженной части кривой.

Далее приведем некоторые результаты геофизических исследований 1950-х годов. В гравиметрических данных Баргузинская впадина представляет полосу отрицательных гравитационных аномалий. Внутри нее на фоне отрицательного поля выявлен ряд локальных аномалий, совпадающих с крупными аллювиальными равнинами, такими как Баргузинская, Усть-Миндайсая, Хонхинская и Усть-Гаргинская. Увеличение отрицательных значений силы тяжести вдоль впадины и местные аномалии на этом фоне

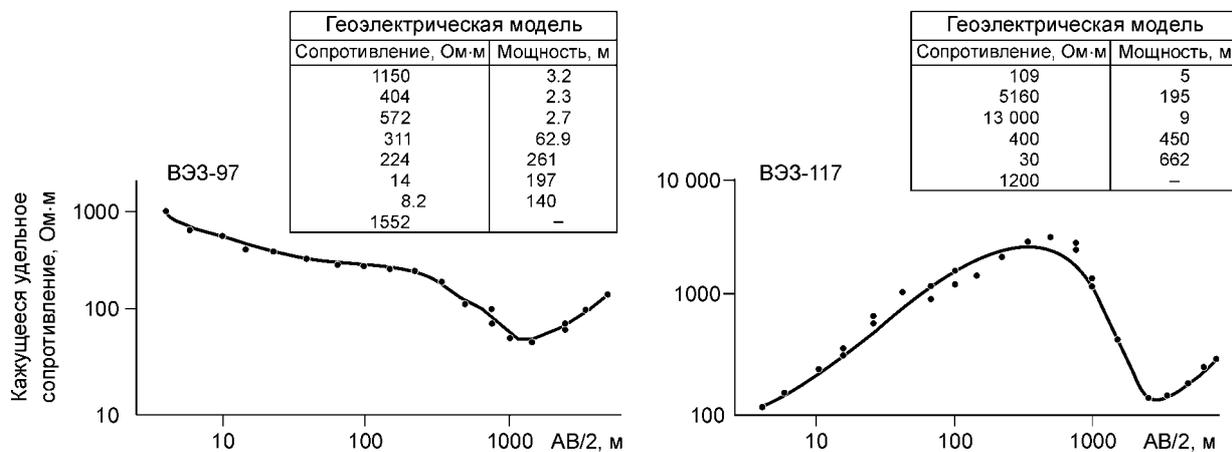


Рис. 2. Характерные кривые ВЭЗ.

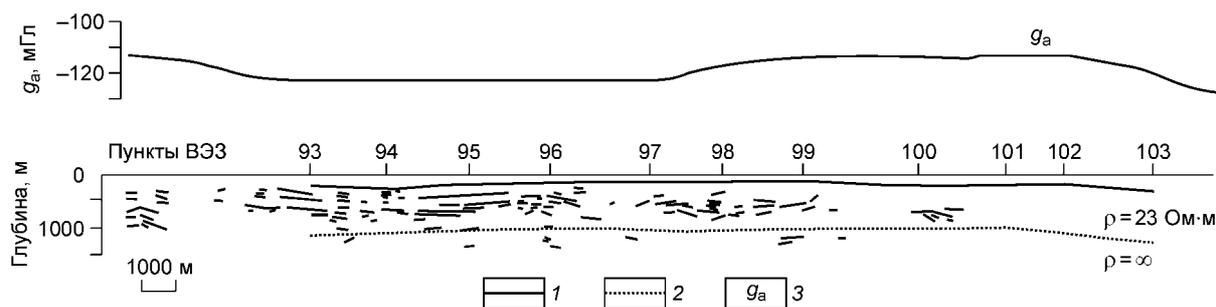


Рис. 3. Результаты геофизических работ 50-х годов XX века по профилю 16.

Границы: 1 — сейсмические, 2 — геоэлектрическая; 3 — график аномального гравитационного поля.

находятся в прямой зависимости от общего погружения фундамента и максимальной мощности кайнозойских осадков. Гравимагнитные минимумы и отвечающие им прогибы отчетливо сдвинуты в сторону Баргузинского хребта [Зорин, 1971].

На рис. 3 показаны результаты трех геофизических методов, полученные в 50-е годы прошлого века для профиля 16 (см. рис. 1, Б). Исползованные модификации сейсморазведки в целом не позволили получить количественные оценки, хотя по отражающим площадкам, в принципе, прослеживается форма залегания слоев осадочной толщи. Выделенная по сейсмическим данным граница на глубинах 200—250 м в те годы не была обоснована геологическими сведениями. Результаты гравиметрии (график g_a) свидетельствуют об отсутствии крупных прогибов и поднятий на этом профиле. По данным электроразведки удалось выделить только одну геоэлектрическую границу: фундамент — осадочный чехол. Сопротивление фундамента определено как бесконечность, а сопротивление проводящего горизонта оценено в 20 Ом·м. Весь процесс обработки полевых данных электроразведки строился тогда вручную по палеткам. Несомненно, была проведена огромная для того времени работа по интерпретации экспериментального материала, но многослойные, частично искаженные кривые не позволили провести количественную интерпретацию в полном объеме.

СОВРЕМЕННЫЕ СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И СПЕЦИФИКА ИНТЕРПРЕТАЦИИ ПОЛЕВОГО МАТЕРИАЛА

Полевые данные ВЭЗ 1950-х годов были представлены графиками кажущегося удельного сопротивления на билогарифмических бланках. На первом этапе материал был переведен в электронный вид с помощью разработанных программных средств.

Для создания различных карт и схем фактического материала, а также визуализации результатов интерпретации применялись географические информационные системы (ГИС), главным элементом которых является компьютерная карта. ГИС-технологии значительно упрощают работу с фактическим и априорным материалом, так как позволяют запрашивать, анализировать и отображать любые данные, имеющие географическую привязку [Кошкарёв, Тикунов, 1993]. Рабочие схемы для Баргузинской котловины были созданы с помощью программ ArcView 3.1 и ENVI 3.2. Фактически, используя три независимые карты: топографическую, геологическую и тектоническую, была создана новая карта, содержащая всю полезную дополнительную информацию, востребованную при интерпретации и визуализации электроразведочных данных. Рассмотрим, например, рабочую схему для Баргузинской впадины (см. рис. 1, Б), где показаны граница горного обрамления, скважины (использована информация геологических карт), размещение оригинальных форм рельефа — куйтунов, а также нанесены линии профилей и пункты измерений. Показаны некоторые зафиксированные геологами разломы. Следует отметить, что с помощью ГИС-технологии можно получить отметки рельефа дневной поверхности и затем учесть его влияние на измерения. Также с помощью этих систем осуществляется визуализация результатов и точная координатная привязка полученных в результате интерпретации, геоэлектрических структур.

Формирование начальной модели для программных комплексов. В процессе обработки и интерпретации полевых материалов широко применяются программные комплексы, позволяющие проводить моделирование и инверсию с использованием горизонтально-слоистых моделей. На первом этапе интерпретация полевых данных по Баргузинской впадине проводилась с помощью комплексов „СОНЕТ“ и PPI [Эпов и др., 1990; Электрическое..., 1988, 1992]. Алгоритм решения обратной задачи основан на известных методах минимизации погрешности подбора и быстром решении прямой задачи. Формирование начального приближения является важным элементом алгоритма. Если известна какая-либо априор-

ная информация, например о распределении удельного сопротивления с глубиной, то на ее основе можно построить предполагаемую геоэлектрическую горизонтально-слоистую модель.

При работе с материалом Баргузинской впадины для формирования начальной модели в полной мере учитывался весь комплекс различных геологических сведений, скважинная информация, петрофизические характеристики пород, а также геоэлектрические параметры, полученные ранее. Рассмотрим, например, соответствие разреза по скв. Р-1 с геоэлектрическими моделями (рис. 4). Основной особенностью литологического разреза скважины является то, что до глубин 600—700 м наблюдаются различные песчано-гравелитовые отложения со значительным содержанием конгломератов, гравия и гальки. Ниже по разрезу на больших глубинах присутствует более тонкослоистый материал. Были рассмотрены геоэлектрические модели для всех пунктов ВЭЗ, находящихся в окрестности скважины. На рис. 4, Б, В приведены полевые и синтетические кривые, а также геоэлектрические модели для ВЭЗ-136 и 121, 122, 169. Хорошо соответствуют разрезу скважины, например, модель для ВЭЗ-136. Параметрических измерений не проводилось, поэтому не следует ожидать полного совпадения геоэлектрического и скважинного разрезов. Тем не менее согласование неплохое. Глубина скважины в общем соответствует суммарной мощности осадочных отложений на геоэлектрическом разрезе. Сопротивление опорного электрического горизонта составляет 4000 Ом·м. Такие значения вполне могут иметь породы фундамента, в частности гнейсы. Выше по разрезу находится слой мощностью 800 м со значением УЭС = 16 Ом·м. По геологическим данным, это тонкослоистые отложения глубокого озера среднего плиоцена, их мощность соответствует разрезу скважины. Судя по характеристикам пород в интервале глубин от 50 до 600 м, они вполне могут иметь УЭС = 1300 Ом·м. В этом же интервале на геоэлектрическом разрезе присутствует наиболее высокоомный слой (УЭС = 3500 Ом·м). В описании скважины отмечены слои многолетней мерзлоты мощностью до 100 м. Геоэлектрические параметры моделей для ВЭЗ-121, 169, 122 и 136 довольно хорошо согласуются. В пункте 121 подтверждается значение УЭС в 1300 Ом·м, характерное для отложений верхнего плиоцена. Граница на глубинах около 200—250 м, которая фиксируется по сейсмическим данным, согласуется с глубинами до верхней кромки глубинной многолетней мерзлоты, полученными по данным геоэлектрики. Дополнительное обоснование начальной модели проведено далее с помощью двумерного моделирования

В южной части впадины полный разрез осадочной толщи получен по трем скважинам. Все они находятся в нескольких километрах от пунктов измерений, близко к горному обрамлению. Рассмотрим соответствие разреза по скв. 10 и геоэлектрической модели ВЭЗ-101. Скважина на глубине 430 м вскрыла граниты, непосредственно на гранитах залегают тонкослоистые осадки, а в интервале от дневной поверхности до 200 м наблюдаются породы с примесью гравия. В геоэлектрической модели также присутствует мощный низкоомный слой с УЭС, равным 19 Ом·м, залегающий на высокоомном опорном горизонте. Вышележащие породы имеют достаточно высокое сопротивление — 450 Ом·м. Анализ всех имеющихся данных позволяет сделать вывод, что тип разреза единообразен для южной и центральной частей впадины.

Для ситуации, когда дополнительные сведения практически отсутствуют, как, например, в северной части впадины, основным источником информации является сама кривая зондирования. Кроме того, может быть использована модель, выбранная для территорий с присутствием скважин, так как геологическая ситуация и характер осадконакопления были практически одинаковы для всей территории депрессии.

Трудности интерпретации. В ходе интерпретации полевого материала даже при хорошо обоснованной модели возникают трудности, связанные с вопросами эквивалентности и неоднозначности решения обратной задачи. Для геоэлектрического разреза Баргузинской впадины наблюдается значительная эквивалентность по продольной проводимости (*S*-эквивалентность) и по поперечному сопротивлению (*T*-эквивалентность). Первый тип эквивалентности проявляется для проводящих слоев разреза в особенности для мощного нижнего слоя, залегающего на фундаменте. *T*-эквивалентность выражена для глубинных прослоев вечной мерзлоты, которые, по данным электрометрии, могут иметь мощность до нескольких сотен метров. Программные комплексы позволяют оценить границы областей эквивалентности для заданной начальной модели. Но это мало способствует выбору наиболее вероятной модели. Проблема достоверности модели отчасти решается с использованием имеющихся данных по скважинам. Но этой информации часто недостаточно, например, для пунктов, расположенных на большом расстоянии от скважин. Поэтому при имеющейся эквивалентности по продольной проводимости были привлечены геологические материалы о хорошей выдержанности мощности проводящего слоя (осадков глубокого озера) по простиранию впадины. Для этого слоя и электрические параметры меняются в очень узком интервале, так как отложения литологически однородны. Эти сведения позволяют резко ограничить интервал эквивалентных значений мощности и сопротивления. Решение в пользу какой-либо модели с эквивалентностью по *T* выбирается также с использованием геологических данных. Так как криогенные

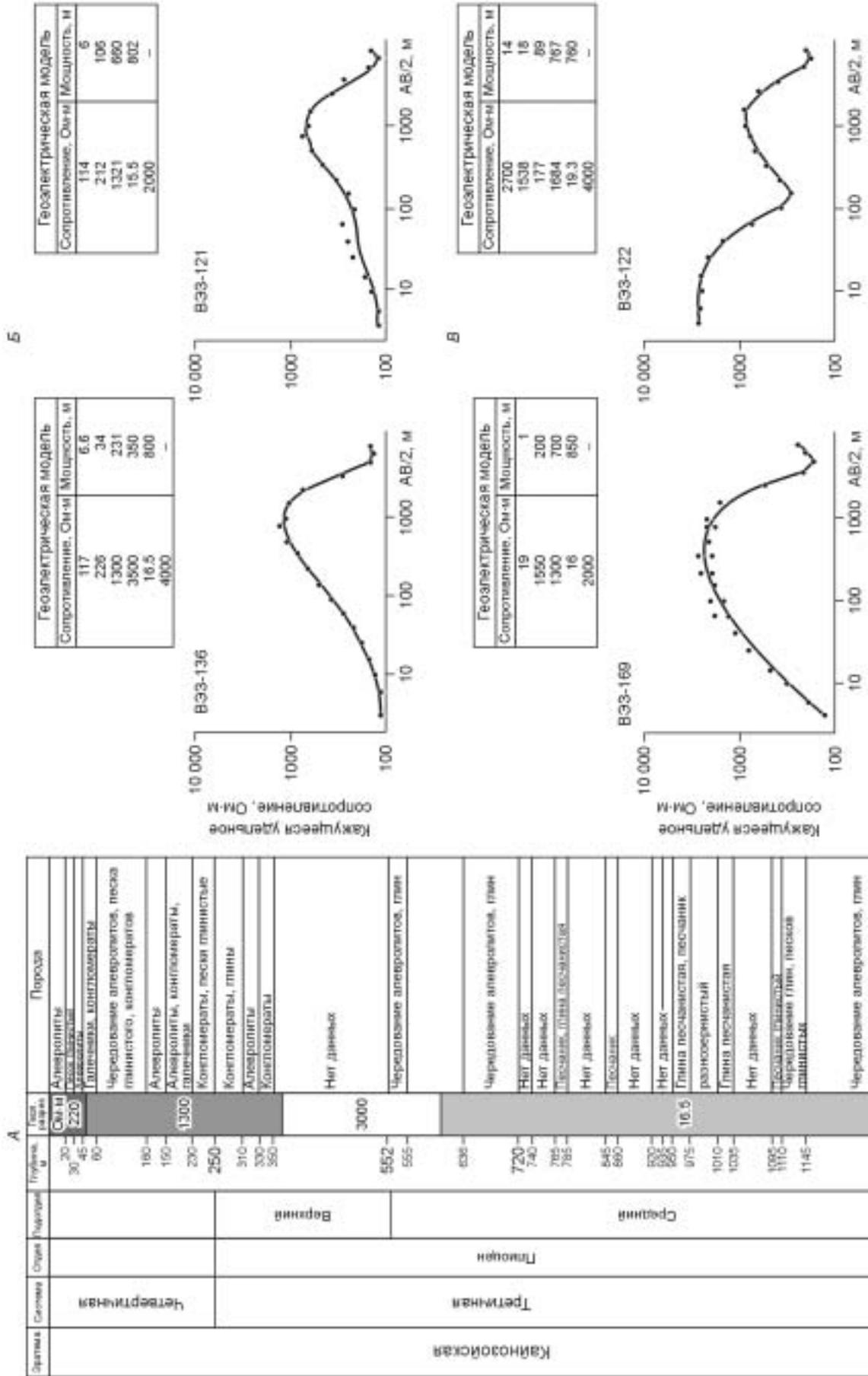


Рис. 4. Разрез по скв. Р-1 (А), кривые ВЗЗ и геозлектрические модели (Б, В) в районе скв. Р-1.

слои, для которых наблюдается T -эквивалентность, имеют крайне изменчивые параметры, то использовались также двумерные программы моделирования и инверсии.

ДВУМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИНВЕРСИЯ

Следующий этап интерпретации связан с применением двумерных программ моделирования и инверсии. Модель, в которой изменение удельного сопротивления зависит только от одной координаты, является идеализированной и характерна для спокойных платформенных и морских отложений. Существует достаточно большой класс хорошо выраженных двумерных и трехмерных структур. Реальные геологические объекты, как правило, имеют еще более сложное строение. Обычно наблюдается сочетание горизонтально-слоистого разреза и различных приповерхностных и глубинных неоднородностей. Один и тот же объект исследования в зависимости от применяемой методики, шага съемки можно рассматривать как одномерную, двумерную или трехмерную структуру. Следует отметить, что достаточно часто понижение размерности модели среды вполне удовлетворяет структуре экспериментальных данных, и результаты интерпретации хорошо соответствуют строению реальной геологической среды. Необходимо сказать также, что геоэлектрические разрезы с присутствием развитой вечной мерзлоты сложны для всех геофизических методов, но именно электроразведке при исследованиях криолитозоны отводится значительная роль.

В начале программы двумерного моделирования и инверсии были использованы для анализа правильности построения геоэлектрических разрезов Баргузинской впадины, полученных с помощью поточечной интерпретации.

Двумерное моделирование. Применялась программа IE2DL, разработанная на кафедре геофизики МГУ [Электрическое зондирование..., 1992]. Приведем краткие сведения о ее возможностях и алгоритме. Программа предназначена для решения прямых задач электроразведки на постоянном токе в произвольных сложнопостроенных двумерных (2D) средах для различных установок, в том числе для установки Шлюмберже. Значение MN конечное. Точка записи относится к середине MN . Прямая задача решается методом интегральных уравнений. В основе метода лежит представление о том, что под действием первичных токовых источников на границах неоднородностей геоэлектрического разреза возникают

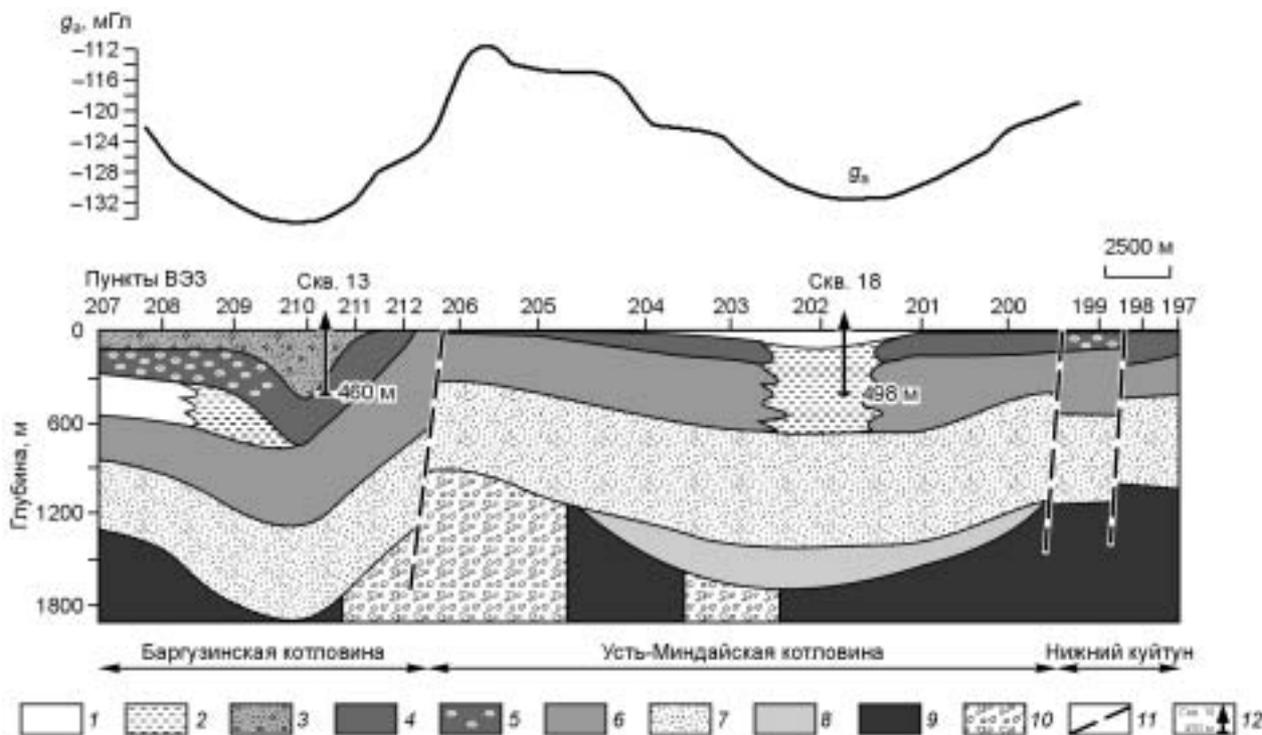


Рис. 5. Геоэлектрический разрез по профилю IX и график аномального гравитационного поля.

1 — вечная мерзлота (удельное электрическое сопротивление >3900 Ом·м); 2 — породы с прослоями вечной мерзлоты (2000—2650 Ом·м); четвертичные отложения: 3 — песок с гравием (220—320 Ом·м), 4 — 230—280 Ом·м, 5 — с присутствием гравия (650—1900 Ом·м); 6 — верхнеплиоценовые отложения (100—600 Ом·м); песчано-глинистый и диатомитовый горизонты среднего плиоцена: 7 — 15—29 Ом·м, 8 — 38—50 Ом·м; породы фундамента: 9 — >1000 Ом·м, 10 — в разломных зонах <1000 Ом·м; 11 — предполагаемые разломы; 12 — скважина, ее номер и глубина.

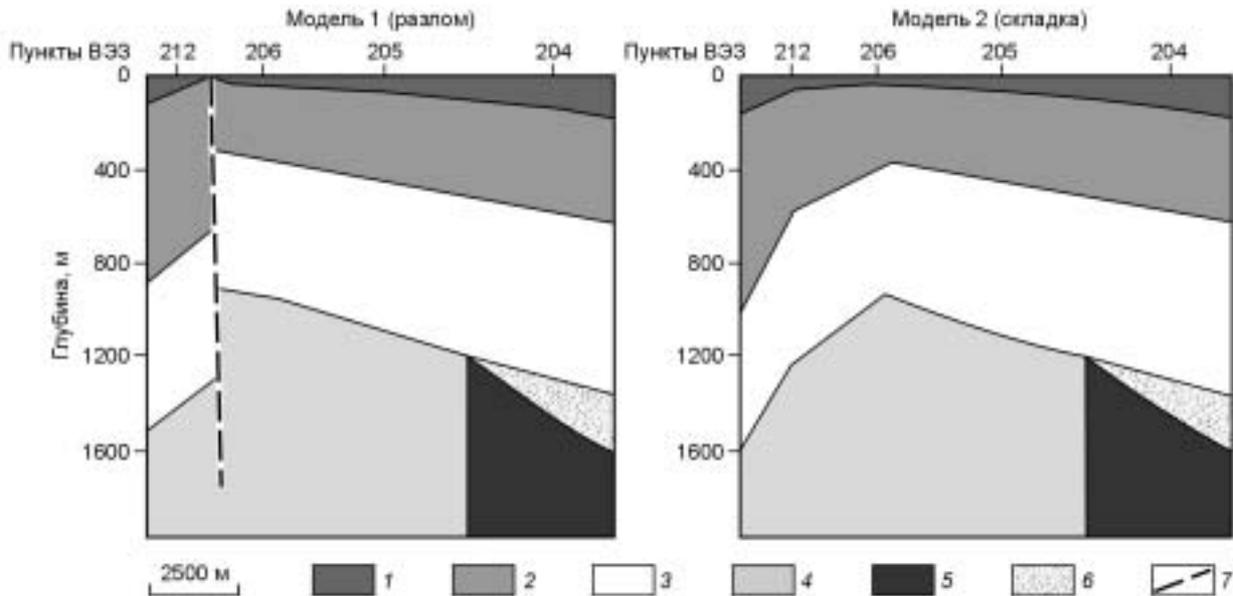


Рис. 6. Модели разлома и складки (профиль IX, пункты ВЭЗ-212, 206, 205, 204).

Отложения: 1 — четвертичные (удельное электрическое сопротивление 230—280 Ом·м), 2 — верхнеплиоценовые (100—600 Ом·м). Песчано-глинистый и диатомитовый горизонты среднего плиоцена: 3 — 15—29 Ом·м, 4 — 38—50 Ом·м. Породы фундамента: 5 — >1000 Ом·м, 6 — в разломных зонах <1000 Ом·м; 7 — предполагаемый разлом.

вторичные токовые источники. Суммарное электрическое поле рассчитывается как суперпозиция полей первичных (E_0) и вторичных (E_s) источников: $E = E_0 + E_s$.

Далее приведем несколько примеров использования этой программы для полевого материала Баргузинской впадины. Для первого примера была выбрана разломная структура на профиле IX (рис. 5) в южной части. Для 2D моделирования были использованы построения, полученные с помощью поточечной интерпретации, и полевые данные для пунктов ВЭЗ-212, 206, 205, 204. Понятно, что разлом, показанный на рис. 6, является предполагаемым. Нельзя исключить вариант присутствия в этом месте складки. Поэтому моделирование по программе IE2DL проводилось для двух геологических обстановок. Первая модель соответствовала разломной структуре, а вторая складчатой (см. рис. 6). Затем сравнивались расчеты для этих двух моделей с полевыми данными. Результаты для пункта ВЭЗ-206, который расположен в приразломной зоне, приведены в табл. 1.

Анализ среднеквадратичных отклонений (см. табл. 1) для обеих моделей показал, что модель с разломом предпочтительнее. Следует упомянуть, что для остальных кривых ВЭЗ, включенных в моделирование, среднеквадратичные отклонения для обеих моделей практически одинаковы.

Приведем еще один аналогичный пример. Двумерное моделирование проводилось для разломной структуры профиля 13 в центральной части впадины (рис. 7). Использовались модели и полевые данные для пунктов ВЭЗ-179, 180, 181 (табл. 2).

На рис. 8, А приведены две синтетические кривые ρ_k для моделей складки и разлома, рассчитанные по двумерной программе. Экспериментальные данные ВЭЗ-180 показаны точками. Очевидно, что модель с присутствием разлома здесь также предпочтительнее.

Двумерные модели рассчитывались и для остальных разломных структур, показанных на геоэлектрических разрезах. Был сделан вывод, что присутствие разломов на разрезах достаточно обосновано.

Далее приведем пример использования двумерных программ для выбора оптимальной модели в присутствии эквивалентности. Моделирование проводилось для профиля 9 в центральной части впадины (ВЭЗ-136, 137, 138, 139, 140) с разными моделями ВЭЗ-136. Профиль расположен в районе скв. Р-1. В разрезе присутствуют мощные высокоомные слои. Для данных пункта ВЭЗ-136 были выбраны две вероятные геоэлектрические модели (табл. 3), погрешности подбора для них практически одинаковые.

Обе модели в общем соответствуют скважинному разрезу. Наблюдается эквивалентность для третьего и четвертого слоев по поперечному сопротивлению, а для пятого по продольной проводимости. Далее рассмотрим рис. 8, Б с результатами моделирования по двумерной программе. На рисунке показаны точками полевые данные, а также синтетические кривые, рассчитанные по двумерной программе для двух

Таблица 1.

Результаты двумерного моделирования для ВЭЗ-206

| Параметр | ВЭЗ-206 | | | | | |
|----------|----------------|----------|---------------|------------|---------------|------------|
| | Полевые данные | 1D | Разлом | | Складка | |
| | | | Модель 1 (2D) | | Модель 2 (2D) | |
| AB/2 | ρ_k | ρ_k | ρ_k | Невязка, % | ρ_k | Невязка, % |
| 25 | 183.0 | 181.8 | 188.1 | 3.5 | 188.1 | 3.5 |
| 40 | 171.0 | 179.3 | 181.8 | 1.4 | 181.7 | 1.3 |
| 65 | 169.0 | 166.3 | 166.7 | 0.2 | 166.5 | 0.1 |
| 100 | 145.0 | 148.5 | 148.1 | 0.2 | 147.5 | 0.6 |
| 150 | 130.0 | 133.1 | 132.9 | 0.2 | 131.0 | 1.6 |
| 220 | 125.0 | 122.1 | 122.6 | 0.4 | 115.7 | 5.2 |
| 340 | 105.0 | 107.6 | 109.4 | 1.7 | 98.5 | 8.5 |
| 500 | 90.0 | 90.7 | 94.6 | 4.2 | 76.1 | 16.1 |
| 750 | 70.0 | 67.9 | 73.6 | 8.5 | 56.0 | 17.4 |
| 1000 | 55.0 | 56.2 | 60.9 | 8.3 | 48.5 | 13.8 |
| 1500 | 58.0 | 55.1 | 55.1 | 0.0 | 51.2 | 7.1 |
| 2500 | 70.0 | 76.9 | 63.2 | 17.8 | 64.8 | 15.8 |
| 3500 | 100.0 | 101.7 | 84.0 | 17.4 | 79.1 | 22.3 |
| 5000 | 140.0 | 138.9 | 108.6 | 21.8 | 104.1 | 25.0 |
| 6500 | 180.0 | 176.2 | 139.3 | 20.9 | 133.6 | 24.2 |
| 8000 | 227.0 | 213.4 | 161.1 | 24.5 | 153.6 | 28.0 |
| Среднее | — | — | — | 8.2 | — | 11.9 |

Примечание. Здесь и далее: ρ_k — кажущееся удельное сопротивление; AB/2 — полуразнос установки ВЭЗ.

Таблица 2.

Результаты двумерного моделирования для ВЭЗ-180

| Параметр | ВЭЗ-180 | | | | | |
|----------|----------------|----------|---------------|------------|---------------|------------|
| | Полевые данные | 1D | Разлом | | Складка | |
| | | | Модель 1 (2D) | | Модель 2 (2D) | |
| AB/2 | ρ_k | ρ_k | ρ_k | Невязка, % | ρ_k | Невязка, % |
| 15 | 303.00 | 305.99 | 305.99 | 0.00 | 306.00 | 0.00 |
| 25 | 299.00 | 305.95 | 305.96 | 0.00 | 305.99 | 0.01 |
| 40 | 250.00 | 305.79 | 305.83 | 0.01 | 305.94 | 0.05 |
| 65 | 280.00 | 305.12 | 305.30 | 0.06 | 305.76 | 0.21 |
| 100 | 283.00 | 302.96 | 303.58 | 0.20 | 305.15 | 0.72 |
| 150 | 295.00 | 296.72 | 298.57 | 0.62 | 303.24 | 2.20 |
| 220 | 298.00 | 281.75 | 283.74 | 0.70 | 296.96 | 5.40 |
| 340 | 263.00 | 243.21 | 254.26 | 4.54 | 281.70 | 15.82 |
| 500 | 218.00 | 200.54 | 211.80 | 5.61 | 250.59 | 24.95 |
| 750 | 155.00 | 153.25 | 166.44 | 8.60 | 200.50 | 30.83 |
| 1000 | 144.00 | 125.47 | 140.88 | 12.28 | 163.48 | 30.29 |
| 1500 | 83.00 | 89.49 | 111.45 | 24.54 | 119.35 | 33.37 |
| 2500 | 56.00 | 50.34 | 51.43 | 2.17 | 53.72 | 6.71 |
| 3500 | 40.00 | 41.47 | 38.70 | 6.68 | 39.89 | 3.82 |
| 5000 | 49.00 | 49.65 | 45.94 | 7.47 | 46.88 | 5.58 |
| 8000 | 89.00 | 77.80 | 59.00 | 24.16 | 58.68 | 24.58 |
| Среднее | — | — | — | 6.1 | — | 11.5 |

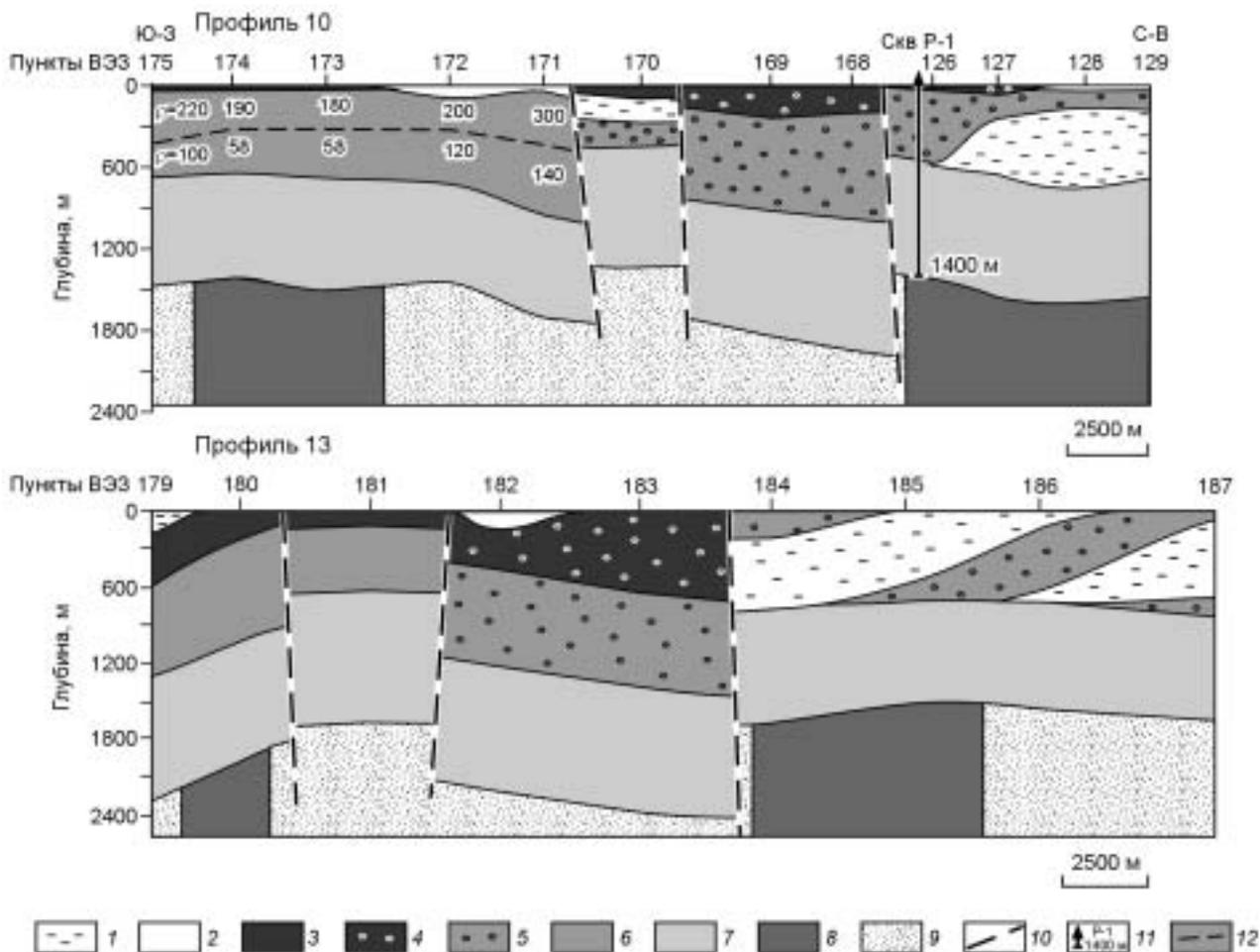


Рис. 7. Геоэлектрические разрезы по профилям 10 и 13.

1 — породы с прослоями вечной мерзлоты (удельное электрическое сопротивление 2700—4500 Ом·м); 2 — вечная мерзлота (>5000 Ом·м); четвертичные отложения: 3 — 300—500 Ом·м, 4 — с присутствием гравия 1600—2600 Ом·м; 5 — верхнеплиоценовые отложения с присутствием галечника (500—1200 Ом·м); 6 — 100—600 Ом·м; 7 — песчано-глинистый и диатомитовый горизонты среднего плиоцена (10—32 Ом·м); породы фундамента: 8 — >1200 Ом·м, 9 — в разломных зонах <1000 Ом·м; 10 — предполагаемые разломы; 11 — скважина, ее номер и глубина; 12 — геоэлектрическая граница.

моделей в этом пункте. Можно видеть, что кривая для модели 1 значительно лучше соответствует экспериментальным данным.

Далее исследовался вопрос, как влияют небольшие колебания геоэлектрических параметров третьего слоя с УЭС 3500 Ом·м для ВЭЗ-136. Были выбраны три модели с изменением мощности этого слоя (примерно на 7 %) в пределах эквивалентности (табл. 4). Двумерное моделирование проводилось для профиля 9 с использованием этих моделей.

Результаты моделирования для трех вариантов приведены в табл. 5. Анализ невязок показывает, что вторая модель наиболее соответствует экспериментальным данным. Для остальных ВЭЗ, включенных в моделирование, невязки практически не меняются.

Необходимо отметить, что двумерное моделирование направлено на изучение глубинных структур. Большие невязки на начальных разносах обусловлены тем, что приходилось упрощать модель (слои мощностью менее 20 м не учитывались). Повышение погрешностей на самых больших разносах (по сравнению с одномерной моделью) на данном этапе можно объяснить существенной трехмерностью геологических структур.

Таким образом, использование двумерных программ позволяет:

- верифицировать построения, выполненные с помощью инверсии в рамках горизонтально слоистой модели;
- выбирать оптимальные модели в присутствии эквивалентности геоэлектрических моделей, когда неоднозначность интерпретации очень высокая.

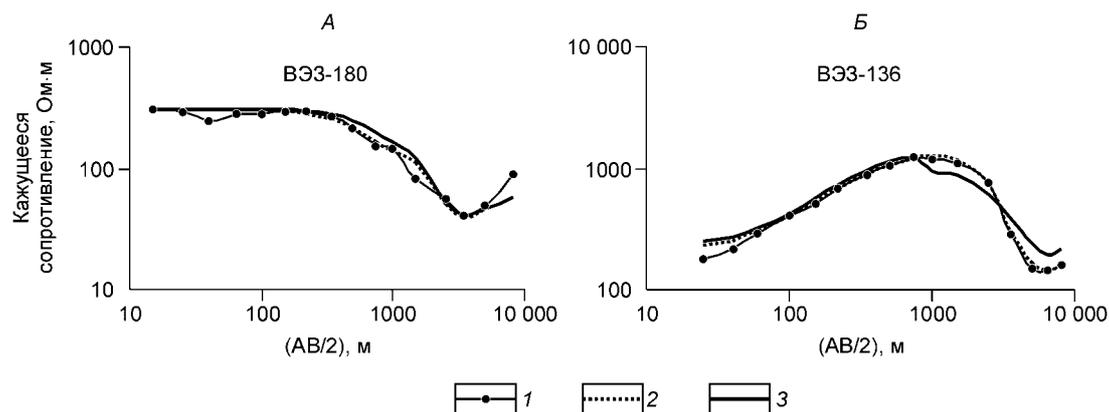


Рис. 8. Результаты двумерного моделирования:

A — для ВЭЗ-180, *B* — для ВЭЗ-136; 1 — 1D; 2 — модель 1 (разлом), 3 — модель 2 (складка).

Программа двумерной инверсии. Применялась программа RES2DINV компании GEOTOMO, позволяющая проводить двумерную инверсию. Эта программа автоматически строит двумерную модель сопротивления среды по профильным данным ВЭЗ. Для вычисления кажущегося сопротивления используется процедура прямого моделирования, а для инверсии — нелинейная оптимизация методом наименьших квадратов. С помощью оптимизационного метода в основном делается попытка уменьшить разницу между вычисленными и измеренными величинами кажущегося сопротивления путем подбора модели

Таблица 3. Геоэлектрические модели для ВЭЗ-136

| Номер слоя | Модель 1 | | Модель 2 | |
|------------|---------------|--------------|---------------|--------------|
| | ρ (Ом·м) | H слоя (м) | ρ (Ом·м) | H слоя (м) |
| 1 | 226 | 40 | 226 | 40 |
| 2 | 1300 | 231 | 1800 | 428 |
| 3 | 3500 | 340 | 3100 | 246 |
| 4 | 16.5 | 800 | 14 | 674 |
| 5 | 4000 | — | 10000 | — |

Таблица 4. Модели для ВЭЗ-136, эквивалентные по поперечному сопротивлению

| Модель 1 | | Модель 2 | | Модель 3 | |
|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|
| ρ (Ом·м) | H слоя (м) | ρ (Ом·м) | H слоя (м) | ρ (Ом·м) | H слоя (м) |
| 226 | 34 | 226 | 34 | 226 | 34 |
| 1300 | 232 | 1300 | 232 | 1300 | 232 |
| 4822 | 254 | 3500 | 350 | 2700 | 450 |
| 16.5 | 800 | 16.5 | 800 | 16.5 | 800 |
| 4000 | — | 4000 | — | 4000 | — |

Таблица 5. Результаты двумерного моделирования для ВЭЗ-136

| Параметр | ВЭЗ-136 | | | | | | |
|----------|----------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|
| | Полевые данные | Модель 1 | | Модель 2 | | Модель 3 | |
| | | 2D | | | | | |
| AB/2 | ρ_k | ρ_k | Невязка, % | ρ_k | Невязка, % | ρ_k | Невязка, % |
| 40 | 217.00 | 255.08 | 17.55 | 255.06 | 17.54 | 255.04 | 17.53 |
| 60 | 291.00 | 312.49 | 7.38 | 312.39 | 7.35 | 312.28 | 7.31 |
| 100 | 399.00 | 408.63 | 2.41 | 408.27 | 2.32 | 407.90 | 2.23 |
| 150 | 509.00 | 534.49 | 5.01 | 533.35 | 4.78 | 532.19 | 4.56 |
| 220 | 683.00 | 679.29 | 0.54 | 676.12 | 1.01 | 672.86 | 1.48 |
| 340 | 876.00 | 873.75 | 0.26 | 864.88 | 1.27 | 855.65 | 2.32 |
| 500 | 1072.00 | 1070.06 | 0.18 | 1052.17 | 1.85 | 1033.28 | 3.61 |
| 750 | 1241.00 | 1272.24 | 2.52 | 1244.93 | 0.32 | 1215.71 | 2.04 |
| 1000 | 1170.00 | 1289.35 | 10.20 | 1263.65 | 8.00 | 1235.49 | 5.60 |
| 1500 | 1103.00 | 1207.60 | 9.48 | 1195.56 | 8.39 | 1181.97 | 7.16 |
| 2500 | 761.00 | 744.38 | 2.18 | 747.61 | 1.76 | 751.91 | 1.19 |
| 3500 | 295.00 | 297.50 | 0.85 | 302.80 | 2.65 | 310.36 | 5.21 |
| 5000 | 152.00 | 181.45 | 19.37 | 169.15 | 11.28 | 174.24 | 14.63 |
| 6500 | 145.00 | 176.14 | 21.48 | 141.97 | 2.09 | 139.72 | 3.64 |
| 8000 | 163.00 | 250.15 | 53.47 | 157.01 | 3.68 | 155.26 | 4.75 |
| Среднее | — | — | 10.19 | — | 4.95 | — | 5.55 |

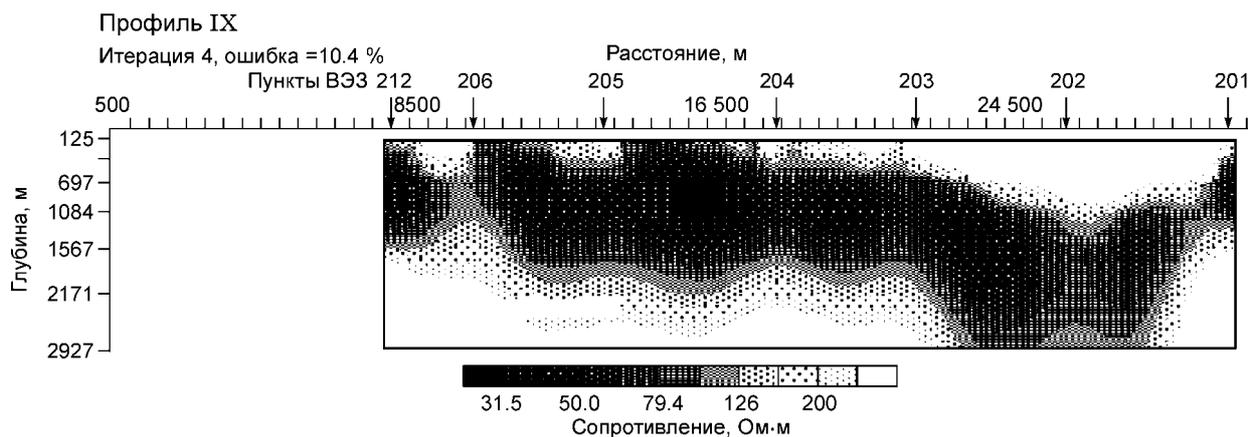


Рис. 9. Двумерная инверсия. Профиль IX.

блоков. Величина этой разницы выражается в среднеквадратической ошибке. Следует отметить, что программы двумерной инверсии позволяют судить о распределении электрических параметров разреза. Особенно хорошее разрешение объектов получается по латерали, при этом мощность геологических тел в вертикальном направлении можно оценить приближенно. Пример использования этой программы для полевых данных профиля IX показан на рис. 9. Результат 2D инверсии представлен в изолиниях удельного сопротивления, цветовая гамма выбирается программой автоматически. Рисунок 9 был сопоставлен с рис. 5, на котором показан этот же разрез по результатам поточечной интерпретации и 2D моделирования. Совместный анализ рисунков свидетельствует, что величины удельных сопротивлений и глубины залегания литологических комплексов, установленные по разным программам, в принципе согласуются. Слои многолетней мерзлоты присутствуют в пунктах 201, 202, 203, УЭС этих пород достигает нескольких тысяч Ом-м. Результат двумерной инверсии свидетельствует, что при имеющемся шаге съемки мы не вправе объединять мерзлые слои в различных пунктах. Скорее всего, это отдельные трехмерные образования, имеющие сложную форму.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассмотрим основные результаты интерпретации. На рис. 5, 7, 10 показаны разрезы по профилям, расположенным в различных частях депрессии. Вначале рассмотрим подробнее геоэлектрический разрез по профилю IX на юге впадины (см. рис. 5). Профиль расположен ближе к Баргузинскому хребту. В нижней части разреза указаны названия основных геологических структур, через которые проходит профиль. В верхней части рисунка изображен график аномального гравитационного поля. Наблюдается качественное совпадение результатов двух методов, гравитационные минимумы соответствуют локальным впадинам на геоэлектрическом разрезе. На рис. 5 показано несколько разрывных нарушений. На первом этапе интерпретации присутствие этих разломов обосновывается резкой сменой мощности осадочной толщи в соседних пунктах зондирования. Есть также еще один признак, в разломной зоне достаточно часто имеет место понижение сопротивления опорного электрического горизонта. Далее разломные структуры были обоснованы с помощью двумерных программ.

Особенности строения центральной части впадины хорошо иллюстрируют геоэлектрические разрезы по двум параллельным профилям 10 и 13 (см. рис. 7). Эти разрезы интересны тем, что на них прослеживаются подобные тектонические структуры, состоящие из приподнятых и погруженных блоков. Если рассмотреть эти структуры в плане, то их простирание совпадает с основным направлением разломов Баргузинской депрессии, установленных геологами, — с юго-запада на северо-восток. Более подробные характеристики разломов по данным геоэлектрики получить не удастся. Это связано с достаточно большим шагом съемки. На северо-восточном участке профилей 10, 13 выделены мощные слои, отнесенные к многолетней мерзлоте (УЭС составляет несколько тысяч Ом-м).

В северной части депрессии было выполнено два параллельных профиля с более детальным шагом съемки. На рис. 10 представлен геоэлектрический разрез по профилю 1s. Разрез здесь достаточно сложный. Профиль проходит по самому краю Верхнего куйтуна. Результаты интерпретации для южной и центральной частей впадины показали, что основные тектонические движения происходили на границах геологических структур, выраженных в рельефе как куйтуны. В пределах самих песчаных возвышенностей тектонических нарушений практически не наблюдается. Это подтверждает анализ геоэлектрических параметров по профилю 2s, который расположен в пределах Верхнего куйтуна.

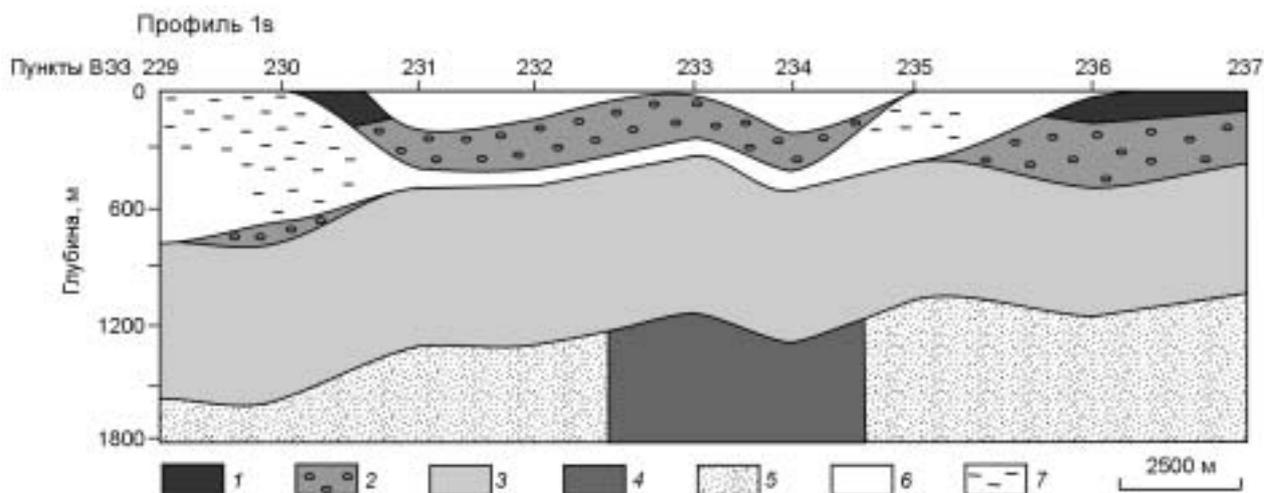


Рис. 10. Геоэлектрический разрез по профилю 1а.

1 — четвертичные отложения (удельное электрическое сопротивление 370—760 Ом·м); 2 — верхнеплиоценовые отложения (700—1550 Ом·м); 3 — песчано-глинистый и диатомитовый горизонты среднего плиоцена (50—170 Ом·м); породы фундамента: 4 — >10 000 Ом·м, 5 — 500—1700 Ом·м; 6 — вечная мерзлота (>6000 Ом·м); 7 — породы с прослоями вечной мерзлоты (1955—4000 Ом·м).

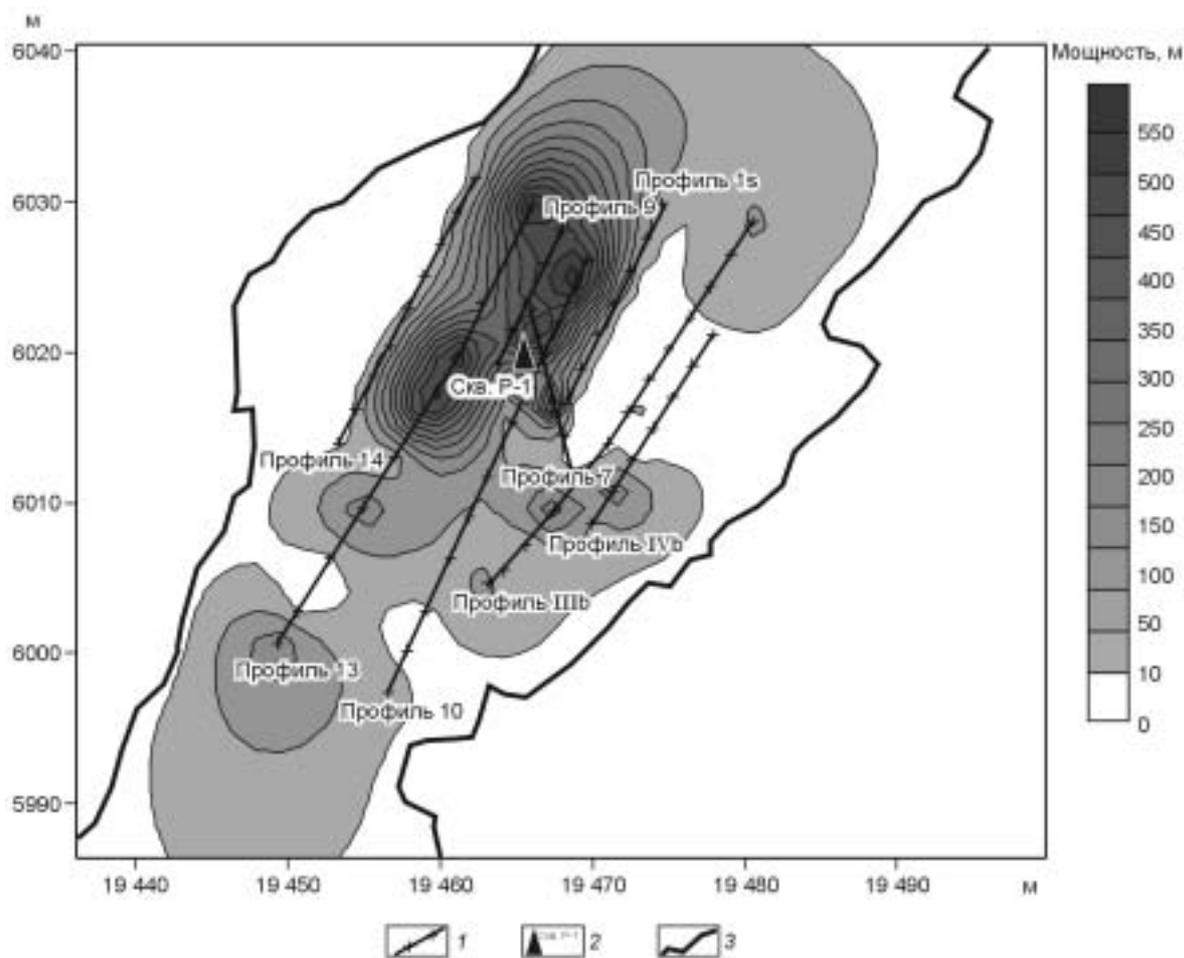


Рис. 11. Карта распространения многолетней мерзлоты в центральной части впадины.

1 — пункты и профили ВЭЗ; 2 — скважина и ее номер; 3 — граница горного обрамления.

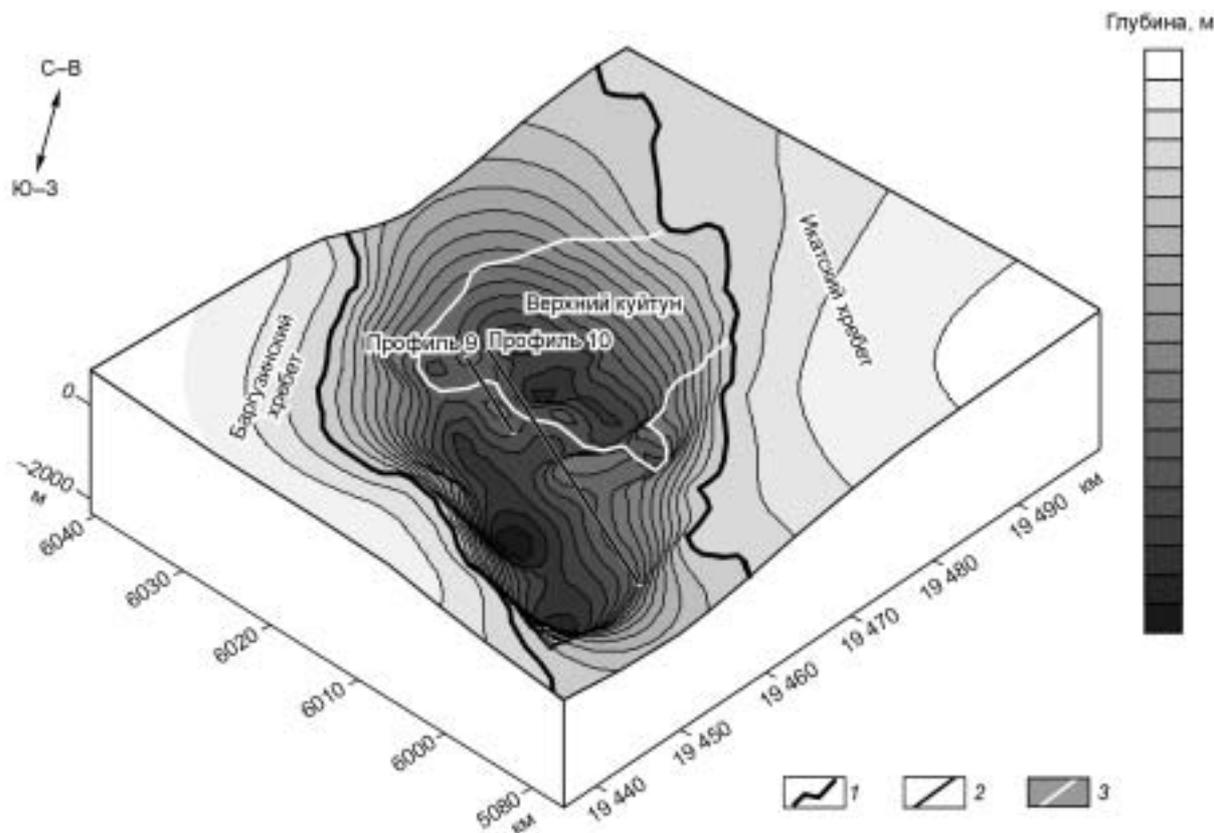


Рис. 12. Поверхность фундамента центральной части впадины.

1 — граница горного обрамления; 2 — профили ВЭЗ; 3 — граница Верхнего куйтуна.

Мощности слоев здесь хорошо выдержаны и разрез близок к горизонтально-слоистому. Еще одной особенностью строения северных территорий являются очень мощные и протяженные слои многолетней мерзлоты, выделенные по высокому УЭС, превышающему 4000 Ом·м. Следует также отметить, что электрические характеристики всех осадочных отложений северной части несколько иные. Например, УЭС проводящего слоя, залегающего на фундаменте, здесь значительно возрастает и находится в интервале от 50 до 150 Ом·м, что можно объяснить предположением о присутствии пропластков многолетней мерзлоты в пределах этого слоя.

Представленные геоэлектрические разрезы отражают основные особенности строения депрессии. Наибольшие глубины до опорного электрического горизонта получены в центральной части на профилях, расположенных ближе к Баргузинскому хребту. Можно отметить, что мощность осадочных отложений в пределах куйтунов также значительна. По результатам интерпретации удалось определить не только общую мощность осадочных пород, но и получить геоэлектрические характеристики основных литологических комплексов. На многих геоэлектрических разрезах выявлены тектонические нарушения. Проведенное двумерное математическое моделирование подтвердило, что наиболее вероятно присутствие здесь именно разрывных структур, а не складчатых. Следует отметить, что для полного обоснования выделенных геологических структур необходимо проводить трехмерное моделирование.

По величинам УЭС многолетней мерзлоты, значительно превышающим УЭС осадочных отложений вне криолитозоны, удастся очертить области развития криогенных пород и определить их геоэлектрические параметры. Результаты двумерной инверсии (см. рис. 9) показали, что, скорее всего, криогенные линзы имеют сложную форму и представляют собой трехмерные структуры. Шаг съемки, выбранный с целью изучения глубинного строения, не дает возможности восстановить их реальную конфигурацию. Мы получаем только мощности и сопротивления этих пород в каждом пункте измерений и в общем область их распространения на территории депрессии. На рис. 11 представлена карта распространения вечной мерзлоты в центральной части впадины. Линзы криогенных пород достигают мощности более 300 м, значения УЭС превышают 3000 Ом·м. Напомним, что вечномерзлые породы были обнаружены в скв. Р-1. На представленной карте область их распространения включает район скважины и находится на

двух участках юго-западнее и северо-восточнее от нее. Линзы многолетней мерзлоты зафиксированы в южной части депрессии, но наибольшая их мощность получена для северной территории.

Рельеф поверхности фундамента показан в виде трехмерной модели. Такие модели позволяют судить о характере тектонических движений, основных направлениях складчатости и разрывных нарушениях в межгорных впадинах. Для Баргузинской депрессии модель поверхности фундамента особенно сложна для центральной части (рис. 12). На рисунке отмечена область Верхнего куйтуна, занимающего значительную часть территории. Показаны линии профилей 9 и 10, вдоль которых центральную часть впадины можно разделить на две структуры — глубокий прогиб, смещенный к Баргузинскому хребту, и область Верхнего куйтуна. Профили 9, 10 проходят по межвпадинной перемычке, образованной в результате сложных тектонических движений и состоящей из системы отдельных блоков. Наибольшие глубины выделены в прогибе фундамента, примыкающем к Баргузинскому хребту, там мощность осадков превышает 2.5 км (южная часть профиля 13, см. рис. 7). Осадочный чехол в пределах Верхнего куйтуна также имеет значительную мощность (до 2 км). Представленные результаты интерпретации данных электроразведки позволяют обосновать происхождение куйтунов. В частности, Верхнему куйтуну соответствует немного приподнятый (по отношению к более глубокому прогибу у Баргузинского хребта) блок фундамента, который отделен от остальной территории впадины сложной системой разрывных нарушений. На юго-востоке Верхний куйтун плавно переходит в Икатский хребет. Похожее строение можно наблюдать для Нижнего куйтуна (см. рис. 5). Профиль IX проходит по краю Нижнего куйтуна в районе пунктов 197—199, там также наблюдается приподнятый блок фундамента и разрывные нарушения, отделяющие куйтун от глубокой Баргузинской котловины. Наибольшая мощность осадочной толщи южной части депрессии также наблюдается ближе к Баргузинскому хребту по профилю IX, а для северной части по профилю 1s. Следует отметить, что поперечный профиль впадины значительно сложнее, чем описанный ранее в геологической литературе [Флоренсов, 1960].

В заключение подчеркнем, что несмотря на перечисленные трудности поточечная интерпретация позволяет индивидуально работать с каждой полевой кривой, а это повышает достоверность общей геоэлектрической модели. Результаты двумерного моделирования и инверсии дают возможность эту модель уточнить и верифицировать.

ВЫВОДЫ

1. Современные компьютерные средства позволили обработать весь объем полевых данных электроразведки и построить глубинную геоэлектрическую модель Баргузинской впадины.

2. Использование географических информационных систем позволяет получить точную географическую привязку геоэлектрических структур. Это может иметь практическое значение в использовании полученных материалов при бурении скважин и поиске минеральных ресурсов.

3. Методика обработки и интерпретации предусматривает самое широкое использование априорных материалов, что повышает достоверность результатов.

4. Показаны возможности программ двумерного моделирования и инверсии при работе с полевым материалом Баргузинской впадины.

5. По данным геоэлектрики обосновано образование структурных элементов впадины — куйтунов. Они плавно примыкают к Икатскому хребту и отделены от основной территории впадины сериями разрывных нарушений и в общем соответствуют локальной впадине, в которой мощность осадков меньше, чем в основном прогибе у Баргузинского хребта.

6. Именно куйтуны обуславливают очень сложный поперечный профиль депрессии, но тем не менее подтверждается байкальская асимметричность.

7. Получены характеристики некоторых разломных структур, в том числе перекрытых четвертичными осадками.

8. Предложенная методика может быть применена для интерпретации материалов электроразведки, полученных в любых других сейсмоактивных сложнопостроенных районах.

В заключение хочется выразить глубокую признательность иркутским геофизикам, особенно М.М. Мандельбауму, получившим в свое время качественные экспериментальные данные с уникальными установками в сложных условиях межгорных впадин Байкальского рифта.

ЛИТЕРАТУРА

Булмасов А.П. Некоторые особенности геофизических полей и структуры земной коры Прибайкалья // Байкальский рифт / Ред. Н.А. Флоренсов. М., Наука, 1968, с. 113—123.

Бухаров А.А. Кайнозойское развитие Байкала по результатам глубоководных и сейсмостратиграфических исследований // Геология и геофизика, 1996, т. 37 (12), с. 98—107.

Голдырев Г.С. Осадкообразование и четвертичная история котловины Байкала. Новосибирск, Наука, 1982, 182 с.

Джурик В.И., Дреннов А.Ф., Басов А.Д. Прогноз сейсмических воздействий в условиях криолито-зоны. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2000, 272 с.

Жирова Н.В., Мандельбаум М.М., Морозова Г.М., Неведрова Н.Н., Эпов М.И. Геоэлектрическая характеристика сейсмогенных структур Байкальского прогностического полигона // Геология и геофизика, 1993, т. 34 (1), с. 133—144.

Замараев С.М., Васильев Е.П., Мазукабзов А.М., Ружич В.В., Рязанов Г.В. Соотношение древней и кайнозойской структур в Байкальской рифтовой зоне / Ред С.Ф. Павлов. Новосибирск, Наука, 1979, 124 с.

Зорин Ю.А. Новейшая структура и изостазия Байкальской рифтовой зоны и сопредельной территории. М., Наука, 1971, 168 с.

Кошкарёв А.В., Тикунов В.С. Геоинформатика. М., Картгеоцентр-Геодиздат, 1993, 213 с.

Ламакин В.В. Неотектоника Байкальской впадины. М., Наука, 1968, 245 с.

Логачев Н.А. Осадочные и вулканогенные формации Байкальской рифтовой зоны // Байкальский рифт / Ред. Н.А. Флоренсов. М., Наука, 1968, с. 72—101.

Логачев Н.А., Зорин Ю.А., Шерман С.И. Геодинамика континентальных рифтов // Геология и геофизика, 1982 (12), с. 13—22.

Мандельбаум М.М., Дашевский Ю.А., Морозова Г.М., Неведрова Н.Н., Грехов И.О., Мартынов А.А. Технология геоинформационных систем при решении обратной задачи глубинных электрических зондирований // Геофизика, 1996, № 1, с. 29—37.

Мац В.Д., Уфимцев Г.Ф., Мандельбаум М.М. Кайнозой Байкальской рифтовой впадины. Строение и геологическая история. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2001, 248 с.

Неведрова Н.Н., Эпов М.И., Антонов Е.Ю., Дашевский Ю.А., Дучков А.Д. Реконструкция глубинного строения Чуйской впадины Горного Алтая по данным электромагнитных зондирований // Геология и геофизика, 2001, т. 42 (9), с. 1399—1416.

Нефедьев М.А. Строение и оценка перспектив рудных полей и месторождений Бурятии по геофизическим данным. Улан-Удэ, Изд-во Бурятского научного центра СО РАН, 2003, 205 с.

Огильви А.А. Основы инженерной геофизики. М., Недра, 1990, 501 с.

Очерки по глубинному строению Байкальского рифта / Ред. Н.А. Флоренсов. Новосибирск, Наука, 1977, 152 с.

Плиоцен и плейстоцен Среднего Байкала / Ред. Н.А. Флоренсов. Новосибирск, Наука, 1982, 193 с.

Проблемы разломной тектоники. Новосибирск, Наука, 1981, 174 с.

Саркисян С.Г. Мезозойские и третичные отложения Прибайкалья, Забайкалья и Дальнего Востока. М., Изд-во АН СССР, 1958, 337 с.

Сейсмогеология и детальное сейсмическое районирование Прибайкалья / Ред. В.П. Солоненко. Новосибирск, Наука, 1981, 168 с.

Солоненко В.П. Очерки по инженерной геологии Восточной Сибири. Иркутск, Иркут. кн. изд-во, 1960, 87 с.

Флоренсов Н.А. Мезозойские и кайнозойские впадины Прибайкалья. М.; Л., Изд-во АН СССР, 1960, 258 с.

Электрическое зондирование геологической среды / Под ред. В.К. Хмелевского, В.А. Шевнина. М., Изд-во Моск. ун-та, 1988, ч. 1, 170 с.; 1992, ч. 2, 200 с.

Эпов М.И., Дашевский Ю.А., Ельцов И.Н. Автоматизированная интерпретация электромагнитных зондирований. Новосибирск, ИГиГ СО АН СССР, 1990, 29 с.

*Поступила в редакцию
26 сентября 2005 г.*