

Е. Н. КАЛЕНОВ

**ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ
ИСТОЛКОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ
МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОЙ
РАЗВЕДКИ**

Е. Н. КАЛЕНОВ

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ
ИСТОЛКОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ
МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОЙ
РАЗВЕДКИ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НЕДРА»
Москва 1974

Каленов Е. Н. Геологическое истолкование результатов магнитотеллурической разведки. М., «Недра», 1974, с. 152.

Излагаются сущность модификаций магнитотеллурического метода, применяемых в нефтегазовой электроразведке, и основы методики интерпретации. Приведены результаты геологического истолкования наблюдений по каждой из модификаций в различных районах Советского Союза.

Даются выводы о разведочных возможностях модификаций, указываются условия как для благоприятного применения магнитотеллурических наблюдений, так и ограничивающие решение поисково-разведочных задач. Приводятся некоторые сведения об экономической эффективности исследований.

Книга предназначена для геологов-нефтяников и геофизиков.

Табл. 14, ил. 59, список лит. — 43 назв.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Основным методом нефтегазовой электроразведки с 1935 до 1950 г. было вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ). Этот метод постоянного тока использовался преимущественно для решения поисковых задач и в редких случаях — при региональных исследованиях. Глубина разведки, как правило, не превышала 1000 м.

Создание в начале 50-х годов электроразведочной станции в Научно-исследовательском институте геофизической разведки (А. М. Алексеев, Н. А. Буланов и другие) позволило более чем вдвое увеличить глубину исследования. В это же время были разработаны (Л. М. Альшин) теория и методика дипольного зондирования (ДЗ). Наряду с глубоким ВЭЗ, применение новой методики ДЗ расширило возможности электрического исследования при помощи постоянного тока.

С 1955 г. в практику электроразведочных работ начал внедряться метод, основанный на изучении короткопериодных колебаний электрической компоненты естественного электромагнитного поля Земли. Идея этого способа исследований, который получил название метода теллурических токов (ТТ)¹, принадлежит французскому ученому К. Шлумберже (30-е годы текущего столетия). В последующем над этим методом в СССР работали В. Н. Дахнов, К. П. Козин, М. Л. Озерская и др. Систематическая разработка теории и методики полевого использования метода ТТ была начата в конце 40-х годов С. М. Шейнманом и М. Н. Бердичевским. Дальнейшие теоретические и полевые исследования (М. Н. Бердичевский, К. И. Никитенко, К. С. Морозов, Ю. С. Копелев, В. А. Липилин, В. И. Поспеев, Г. Н. Анищенко, Д. С. Кубарев) способствовали внедрению метода ТТ в производство. Аппаратура была создана во ВНИИГеофизике (А. М. Алексеев, Н. А. Буланов, А. Е. Ланцов, Ю. В. Хоменюк) и в Институте машиноведения и автоматики (К. В. Карандеев,

¹ Поле теллурических токов [telluris (лат.) — земля] принято называть полем лишь электрической компоненты электромагнитного поля Земли.

Л. Я. Мизюк, Г. А. Штамбергер). Метод ТТ, отличающийся от ВЭЗ и ДЗ рядом крупных преимуществ (не требует искусственных источников питания и измерительных линий большой длины, позволяет вести исследования на больших глубинах при промежуточных высокоомных экранах, более производительен), получил широкое применение в нефтегазовой геофизике.

В начале 60-х годов в практику электроразведки внедряются новые модификации, основанные на изучении электрической и магнитной компонент электромагнитного поля Земли. К ним относятся так называемые магнитотеллурическое профилирование (МТП) и магнитотеллурическое зондирование (МТЗ). Кроме того, практически опробуется модификация, называемая магнитовариационной разведкой (МВР). В 1964—1965 гг. В. А. Лишилин и В. П. Бубновым (трест Геофизнефтеуглеразведка) была успешно опробована модификация, названная комбинированным магнитотеллурическим профилированием (КМТП) и получившая в дальнейшем практическое применение.

Идею МТЗ высказал еще в 1950 г. А. Н. Тихонов. Теория МТЗ для горизонтально-однородной слоистой среды была разработана в середине 50-х и начале 60-х годов (А. Н. Тихонов, Л. Каньяр, Н. В. Липская, Д. Н. Шахсуваров, С. М. Шейнман, М. Н. Бердичевский, Л. Л. Ваньян). К этому времени были вычислены палетки теоретических кривых МТЗ в горизонтально-однородной среде, которые легли в основу интерпретации практических наблюдений.

Магнитотеллурическое профилирование, как упрощенную модификацию МТЗ, предложил и разработал к концу 50-х годов М. Н. Бердичевский. Им же предложена модификация МВР. Над совершенствованием МТП и МТЗ работают Б. Е. Брюнелли, В. П. Бубнов, Н. П. Владимиров, М. А. Добровольская, В. Г. Дубровский, Т. Н. Завадская, А. А. Ковтун, Г. В. Кошлаков, К. И. Никитенко, Ю. Н. Попов, В. И. Поспеев, Е. И. Терехин, В. И. Фомина, Г. А. Чернявский, А. Л. Шейнман, И. А. Яковлев. Крупные теоретические исследования по МТЗ в конце 60-х и начале 70-х годов принадлежат В. И. Дмитриеву, Г. А. Кокотушкину, М. Н. Бердичевскому, Г. Г. Обухову, А. А. Кауфману, Л. А. Таборовскому. В 1971 г. был издан альбом палеток, вычисленных В. И. Дмитриевым и Г. А. Кокотушкиным для МТЗ в неоднородных средах.

Серийная аппаратура для МТЗ и МТП, получившая название магнитотеллурической лаборатории (МТЛ-62), разработана в начале 60-х годов А. М. Алексеевым, М. Н. Бердичевским, В. М. Бобровым, Б. Е. Брюнелли, О. А. Бурдо, А. Е. Ланцовым. Позже выпущена несколько модифицированная аппаратура МТЛ. В Институте физики Земли АН СССР сконструирована (Н. П. Владимиров, С. М. Крылов и др.) полевая магнитотеллурическая станция (ПМТС), которая прошла промышленное испытание во второй половине 60-х годов. Начало 70-х годов знаменуется внедре-

нием в практику МТЗ цифровой электроразведочной станции ЦЭС-1 (А. М. Алексеев, И. А. Безрук, В. Н. Ключкин и др.).

Все способы электрического исследования, основанные на изучении естественного электромагнитного поля Земли, известны в геофизике как магнитотеллурические методы разведки. Однако, имея в виду, что каждый из них представляет собой лишь разновидность исследования магнитотеллурического поля, правильнее считать их модификациями единого магнитотеллурического метода. Так мы и будем называть их в дальнейшем.

Модификациями магнитотеллурического метода (преимущественно ТТ), которыми в настоящее время почти полностью заменены способы разведки постоянным током, исследованы обширные площади в нефтеносных и других районах Советского Союза. Магнитотеллурический метод применяется и за рубежом (ГДР, Венгрия, Австрия, Канада).

Теория и методика магнитотеллурической разведки, обработка наблюдений изложены в многочисленных статьях и монографиях. Геологическое истолкование материалов магнитотеллурической разведки и практические результаты в литературе освещены очень слабо. В настоящей работе автор пытается в какой-то мере восполнить этот пробел. Книга предназначена преимущественно для геологов.

Автор выражает искреннюю признательность за ценные рекомендации доктору технических наук М. Н. Бердичевскому, доктору геолого-минералогических наук Н. В. Неволину, а также Е. В. Бирюкову и М. А. Станкевич за помощь при подготовке рукописи к печати.

ГЛАВА I

МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ (МТЗ)

ПЕРЕМЕННОЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЗЕМЛИ И ЕГО ИЗУЧЕНИЕ ПРИ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОЙ РАЗВЕДКЕ

К современным модификациям магнитотеллурического метода разведки относятся магнитотеллурическое зондирование (МТЗ), магнитотеллурическое профилирование (МТП), исследование поля теллурических токов (ТТ), магнитовариационная разведка (МВР) и комбинированное магнитотеллурическое профилирование (КМТП). В основе всех этих модификаций лежит изучение естественного переменного электромагнитного поля Земли, называемого часто магнитотеллурическим полем. Остановимся кратко на некоторых определениях и свойствах этого поля [4].

Переменное электромагнитное поле охватывает весь земной шар и имеет космическое происхождение, будучи тесно связанным с явлениями на Солнце и в ионосфере. Это поле складывается из двух полей: электрического с вектором напряженности E и магнитного с вектором напряженности H . Составляющие векторов E и H по осям прямоугольных координат xuz (оси x и y лежат на земной поверхности, ось z направлена вертикально вниз) обозначаются соответственно E_x, E_y, E_z и H_x, H_y, H_z . На земной поверхности составляющая E_z принимается равной нулю. Вертикальная составляющая H_z магнитного поля не равна нулю. Но при магнитотеллурической разведке, наряду с E_x и E_y , изучают обычно лишь горизонтальные составляющие H_x и H_y . Исследование вертикальной составляющей магнитного поля стало развиваться лишь в самое последнее время и нами здесь не рассматривается.

Магнитотеллурическое поле Земли пульсирующее. Оно, как правило, изменяется во времени по величине и направлению. Эти изменения, которые называют колебаниями или вариациями поля, зависят, в частности, и от геоэлектрических условий участка наблюдения. Существование электрического поля (поля ТТ)

легко обнаруживается при помощи простой измерительной установки — линии OX , заземленной на концах. В поле ТТ между электродами O и X возникает напряжение, которое нетрудно измерить. Частное от деления величины этого напряжения, выраженного в милливольтках (мВ), на длину OX измерительной установки в километрах (мВ/км) принимается за меру интенсивности (напряженности) поля ТТ по направлению OX . Магнитное поле обнаруживается и измеряется при помощи специальных приборов — магнитометров. Интенсивность его определяется в единицах напряженности — гаммах (γ) ($1\gamma = 10^{-6}$ Э).

Интенсивность электрического и магнитного полей Земли, как показывают многочисленные наблюдения, колеблется в широких пределах. Это связано с географическим положением местности, временами года и суток. Интенсивность поля зависит и от геоэлектрических условий. Например, напряженность поля ТТ возрастает с уменьшением глубины залегания изучаемого высокоомного горизонта и увеличением среднего продольного сопротивления пород над этим горизонтом.

С помощью двух взаимно перпендикулярных заземленных измерительных линий OX и OY длиной не более 500—1000 м и двух магнитометров, установленных взаимно перпендикулярно, при магнитотеллурической разведке производится запись вариаций составляющих E_x , E_y , H_x и H_y на фотоленте осциллографа. На каждой записи, которые часто имеют вид почти синусоидальных (квазисинусоидальных) кривых с чередующимися максимумами и минимумами, можно выделить импульсы полей ТТ и магнитного. Под импульсами понимают изменения (вариации) величин составляющих поля в интервале времени между двумя соседними максимумами или минимумами (экстремумами). Момент времени, который соответствует экстремуму импульса, называют фазовым моментом импульса. Расстояние по вертикали между экстремумом импульса и линией, соединяющей его начальную и конечную точки, называется амплитудой импульса. Длительность T импульса (в секундах) называется периодом импульса или периодом вариаций, а количество импульсов в 1 с — частотой вариаций. Таким образом, частота — величина обратная периоду T колебаний. Регистрируют колебания поля с периодом T от единиц до сотен секунд. По современной классификации вариаций переменного электромагнитного поля Земли такие колебания названы короткопериодными (КПК) [33—36].

Записываемый диапазон периодов колебаний составляет обычно 15—80 с. Это — наиболее регулярная и устойчивая часть спектра вариаций. Такие колебания поля возникают почти ежедневно в утренние и дневные, иногда вечерние часы. При МТЗ регистрируемый диапазон периодов значительно расширяется. Пределы изменения напряженности наблюдаемого электрического поля составляют от десятых долей до 3—10 мВ/км и более, а магнитного — от 0,2 до 1—10 гамм и более.

По записям составляющих магнитотеллурического поля в точках наблюдения нетрудно определить изменения величины и направления векторов E и H напряженности полей ТТ и магнитного в любой момент времени регистрации. Линии, которые описывают своими концами векторы E и H за промежуток времени наблюдения, называются соответственно годографами электрического и магнитного полей. Годографы электрического поля и горизонтальной компоненты магнитного поля представляют собой нередко весьма сложные кривые. По виду годографов судят о поляризации поля, т. е. преимущественном его направлении в пункте наблюдения.

Различают близкую к линейной (квазилинейную) и нелинейную поляризацию поля. При квазилинейной поляризации поле изменяется преимущественно по величине, оставаясь почти одинаковым по направлению. Годограф вытянут в этом направлении; продольные размеры годографа значительно (в 10 раз и более) превышают поперечные. Прямая, вдоль которой направлен годограф, называется осью поляризации поля. Фазовые сдвиги между составляющими E_x и E_y , H_x и H_y при линейной поляризации близки к нулю или к 180° . Линейная (квазилинейная) поляризация электрического поля часто встречается в области склонов протяженных поднятий или в узких вытянутых впадинах. Поляризация магнитного поля может быть при этом нелинейной.

В случае нелинейной поляризации поля годограф представляет собой совокупность овалов и петель нередко со многими точками самопересечения. Фазовые сдвиги между составляющими поля имеют произвольные углы. Такой тип поляризации полей ТТ и магнитного относится главным образом к обширным поднятиям и впадинам платформенных территорий.

Рассмотрим особенности магнитотеллурического зондирования, которые помогут уяснить сущность других модификаций магнитотеллурической разведки, подобно тому как знакомство с основами вертикального электрического зондирования постоянным током (ВЭЗ) позволяет отчетливее понять физический смысл различных видов электрического профилирования. Следует заметить, что между ВЭЗ и МТЗ можно найти много общих черт.

ОСНОВЫ МЕТОДИКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ МТЗ

Кривые МТЗ. Магнитотеллурическое зондирование относится к основной модификации метода с помощью переменного электромагнитного поля Земли. Теория МТЗ разработана, исходя из представления о геоэлектрическом разрезе, сложенном рядом горизонтальных однородных, изотропных слоев с различными мощностями, удельными сопротивлениями и диэлектрическими проницаемостями; магнитная проницаемость всех слоев принята равной единице. Такую среду называют горизонтально-однород-

ной слонстой средой (для сокращения будем именовать ее горизонтально-однородной).

Теоретические исследования привели к выводу, что изучение на земной поверхности компонент E и H переменного электромагнитного поля позволяет получать кривые, которые, подобно графикам ВЭЗ при изучении поля, созданного постоянным током, характеризуют послойное распределение параметров (мощности и сопротивления слоев) геоэлектрического разреза и, таким образом, позволяют расчленять осадочный чехол и оценивать глубины залегания непроводящего основания — фундамента. Процесс изучения электромагнитного поля Земли для получения таких кривых назван магнитотеллурическим зондированием, а сами кривые кривыми, или графиками, МТЗ.

В результате выполнения МТЗ можно получать амплитудные и фазовые кривые. Амплитудные кривые МТЗ строят по значениям отношения амплитуд импульса поля (составляющих электрического и магнитного полей); фазовые кривые — по значениям разности фазовых моментов импульсов этих составляющих, выраженных в градусах.

Мы не будем останавливаться на фазовых кривых МТЗ, интерпретация которых пока еще не разработана. В последнее время ими занимаются Г. Н. Анищенко, К. И. Никитенко, А. С. Сафонов, В. К. Хмелевской и др. В дальнейшем нами рассматриваются только амплитудные кривые МТЗ. Они отражают изменение некоторого параметра, который называется кажущимся сопротивлением ρ_T , в зависимости от периода T вариации поля, аналогично тому, как кривые ВЭЗ отражают изменение кажущегося сопротивления ρ_k в зависимости от разноса электродов AB .

Выполнение МТЗ в данной точке, которое еще недавно занимало 6—7 сут. и более, предусматривает изучение вариаций как электрического поля, так и горизонтальных составляющих магнитного поля в диапазоне периодов T от долей секунды до нескольких минут. Следует заметить, то при выполнении глубокого МТЗ с целью изучения глубоких слоев и верхней мантии Земли (глубины до первых сотен км) регистрируются вариации поля с периодами T , достигающими многих часов. Мы не будем касаться проблемы этого зондирования, ограничиваясь лишь рассмотрением МТЗ, которое выполняется для исследования верхних слоев земной коры в разведочных целях.

Практически до недавнего времени из-за ограниченных возможностей используемой аппаратуры (МТЛ-62 и МТЛ-63) нижний предел периодов колебаний ограничивался при регистрации лишь десятью секундами и только с 1969 г., когда начала применяться цифровая электроразведочная станция ЦЭС-1 [19], появилась принципиальная возможность записи колебаний, начиная с достаточно малых периодов.

Полевая магнитотеллурическая станция ПМТС позволяет регистрировать вариации магнитотеллурического поля с периодами

от сотых долей секунды до 10—15 с. При сочетании ее со стандартной аппаратурой (МТЛ-62, МТЛ-63) можно выполнять МТЗ в широком диапазоне периодов.

Результаты МТЗ в виде амплитудных кривых, так же как графики ВЭЗ, интерпретируют с помощью вычисленных палеток или применяя другие более простые способы. В последние годы для интерпретации кривых МТЗ используются электронно-вычислительные машины (В. И. Дмитриев, Б. К. Матвеев, Н. Г. Шкабарня [39] и др.). При количественном истолковании кривых МТЗ определяются глубины залегания непроводящего опорного горизонта (фундамента). В благоприятных случаях оцениваются мощности и сопротивление отдельных слоев осадочного чехла. До последнего времени магнитотеллурическое зондирование на практике использовалось в небольшом объеме из-за получения неполных кривых МТЗ (т. е. кривых, не отмечающих верхнюю часть разреза вследствие невозможности записи вариаций поля при малых T) и очень низкой производительности. С введением ЦЭС-1 выполнение исследований значительно совершенствуется; время полевой записи одного МТЗ сокращается до одних суток, а диапазон регистрируемых вариаций расширяется. Практически выполнение МТЗ и получение амплитудной кривой кратко сводится к следующему.

В точке исследования размещается передвижная регистрирующая станция. При помощи двух взаимно перпендикулярных заземленных на концах приемных линий Ox и Oy , располагаемых по возможности так, чтобы направление одной из них совпадало с простиранием пород, а другой — с падением, и двух магнитометров X и Y , устанавливаемых также перпендикулярно друг другу, записываются вариации составляющих магнитотеллурического поля E_x , E_y , H_x и H_y . Для получения кривых МТЗ существуют различные способы обработки таких записей. Задача этой обработки — определение абсолютных величин (модулей) так называемого входного импеданса Z . Термин «импеданс» (англ. impedance — задержка, препятствие) взят из теории длинных электрических линий, где он означает полное сопротивление цепи переменному электрическому току, вызванное как обычным (омическим), так и индуктивным и емкостным сопротивлением цепи. По аналогии можно показать, что входной импеданс выражает комплексное сопротивление среды индуцированному в ней току. Модуль входного импеданса среды определяется отношением электрической и магнитной составляющих поля:

$$|Z| = \frac{|E_x|}{|H_y|} = |Z_{xy}| \quad \text{и} \quad |Z| = \frac{|E_y|}{|H_x|} = |Z_{yx}|,$$

где $|E_x|$, $|E_y|$, $|H_x|$, $|H_y|$ — модули амплитуд составляющих поля при данном периоде T .

Согласно теории [4], входной импеданс связан с периодом вариаций и параметрами мощности и сопротивления слоев, которые слагают исследуемый разрез. Кроме того, входной импеданс зависит от поляризации поля и ориентации осей установки. Если среда горизонтально-однородна, то входной импеданс остается неизменным при любом повороте установки, т. е. над горизонтально-однородной средой $|Z_{xy}| = |Z_{yx}|$. В случае же горизонтально-неоднородной среды (наклонное залегание слоев, выклинивание их, поднятия и прогибы, тектонические нарушения и т. п.) $|Z_{xy}| \neq |Z_{yx}|$. Значения эти в горизонтально-неоднородных средах изменяются с изменением ориентации установки. Кажущееся удельное сопротивление вычисляют для фиксированных периодов T по формулам $\rho_{Гxy} = 0,2 T |Z_{xy}|^2$ и $\rho_{Гyx} = 0,2 T |Z_{yx}|^2$. Эти значения используются для построения амплитудных кривых МТЗ. Они строятся на бланках с билогарифмическим масштабом (модуль 6,25 или 10 см). По оси абсцисс откладывают значения \sqrt{T} в с^{1/2}, по оси ординат — $\rho_{Гxy}$ и $\rho_{Гyx}$ в ом-метрах. В каждом

пункте МТЗ получают, таким образом, две кривые: $\rho_{Гxy}$ и $\rho_{Гyx}$. Легко представить себе, что в горизонтально-однородной среде обе эти кривые сливаются в одну кривую $\rho_{Г}$. В горизонтально-неоднородной среде кривые $\rho_{Гxy}$ и $\rho_{Гyx}$ отличаются друг от друга тем больше, чем значительнее горизонтальная неоднородность среды.

Примеры практических кривых МТЗ приведены на рис. 1. Ось установки x направлена по простиранию пород, ось y вкrest простирания. Графики построены в диапазоне периодов вариаций от 20 до 400—900 с. Подобные графики (нередко начиная с периода $T = 10$ с) получают с использованием стандартной аппаратуры. Кривые $\rho_{Гxy}$ (рис. 1, а) вычислены по данным регистрации составляющей электрического поля вдоль оси x , а кривые $\rho_{Гyx}$ — вдоль оси y . В точке наблюдения I кривые $\rho_{Гxy}$ и $\rho_{Гyx}$ значительно расходятся между собой. Это — признак горизонтальной неоднородности исследуемой среды. В точке II, где эти кривые практически совпадают друг с другом, среда близка к горизонтально-однородной.

На рис. 1, б представлен пример достаточно полных кривых МТЗ, полученных в одной и той же точке с использованием опытного образца высокочастотной полевой магнитотеллурической станции ПМТС. Диапазон записанных периодов T вариаций от 0,09 до 400 с. Полные кривые МТЗ, подобно кривым ВЭЗ, могут давать послынную характеристику разреза, начиная с верхних его горизонтов. Кривые $\rho_{Гxy}$ и $\rho_{Гyx}$, полученные при той же ориентации осей установки, еще больше расходятся между собой, чем кривые на рис. 1, а; причем в этом случае $\rho_{Гyx} > \rho_{Гxy}$. Район исследования отличается сильным нарушением горизонтальной однородности среды.

В естественных условиях чаще всего приходится встречаться именно с горизонтальной неоднородностью геоэлектрического

разреза. Поэтому обычно кривые МТЗ (ρ_{Txy} и ρ_{Tyx}) в большей или меньшей степени расходятся между собой. В точке исследования, кроме кривых ρ_{Txy} и ρ_{Tyx} , получают еще третью кривую МТЗ — некоторую среднюю между ними и называемую эффективной кривой МТЗ $\rho_{Tэф}$ на рис. 1, б. Она вычисляется по средним значениям импеданса, которые в теории МТЗ получили название эффективных, не зависящих от поляризации поля и ориентации установки: $\rho_{Tэф} = \sqrt{\rho_{Txy}\rho_{Tyx}}$. Кривая $\rho_{Tэф}$ всегда

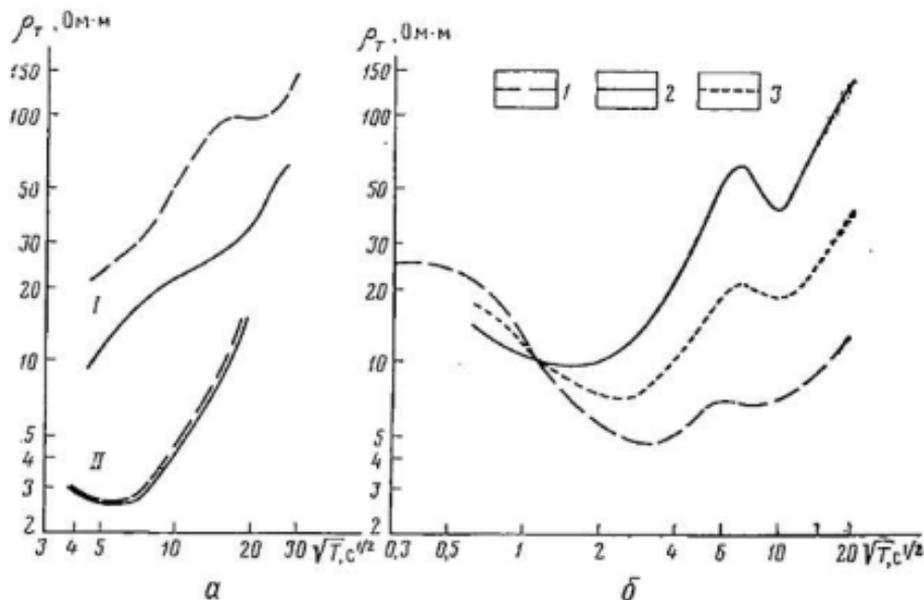


Рис. 1. Кривые МТЗ.

а — неомные; б — омные; 1 — ρ_{Txy} ; 2 — ρ_{Tyx} ; 3 — $\rho_{Tэф}$.

располагается между кривыми ρ_{Txy} и ρ_{Tyx} и сглаживает влияние горизонтальных неоднородностей среды.

Теоретические кривые МТЗ в горизонтально-однородной среде. Теория магнитотеллурического зондирования позволяет вычислять кривые МТЗ для любого количества слоев горизонтально-однородного геоэлектрического разреза. Это дает возможность выяснить основные закономерности изменения ρ_T в зависимости от мощностей и сопротивлений слоев среды. Набор палеток теоретических кривых МТЗ для двуслойного, трехслойного и более сложных разрезов вычислена в Институте физики Земли АН СССР и ВНИИ Геофизике (Д. Н. Шахсуваров, Л. Л. Ваньян, В. Р. Хомизури). Эти палетки и применяются для интерпретации практических кривых МТЗ.

Теоретические кривые МТЗ построены в билогарифмическом масштабе с модулем 6,25 см. Вычисленные кривые строят в той

же системе координат, которая принята при построении теоретических палеток: по осям отложены безразмерные величины ($\sqrt{10 \rho_1 T} / h_1$ — по оси абсцисс, ρ_T / ρ_1 — по оси ординат). Здесь h_1 и ρ_1 — соответственно сопротивление (в ом-метрах) и мощность (в километрах) верхнего слоя разреза, T — период вариаций поля (в секундах); $\sqrt{10 \rho_1 T}$ обозначает длину λ_1 (км) электромагнитной волны в верхнем слое разреза.

На рис. 2 изображена палетка амплитудных кривых¹ МТЗ для двуслойной среды при $\rho_2 / \rho_1 > 1$ и $\rho_2 / \rho_1 < 1$.

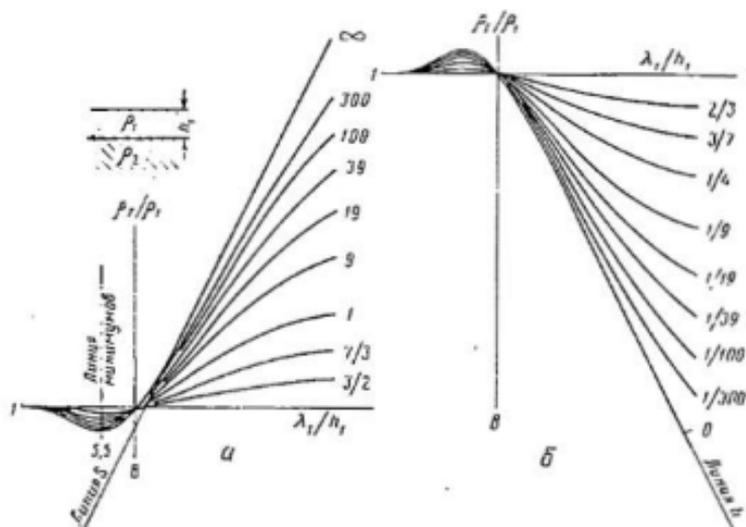


Рис. 2. Палетки двуслойных кривых МТЗ.

а — $\rho_2 > \rho_1$; б — $\rho_2 < \rho_1$. Шифр кривых — ρ_2 / ρ_1 .

Так же, как и графики ВЭЗ, кривые МТЗ отражают изменение сопротивления слоев разреза с глубиной. Верхний (первый) слой разреза отмечается при малых периодах T колебаний (больших частотах), когда $\rho_T = \rho_1$. С увеличением периода колебаний (уменьшением частоты) на кривых ρ_T отражается более глубокий слой разреза. Влияние проводящих пород отмечается уменьшением величины ρ_T , влияние пород большого сопротивления — увеличением ρ_T . Наблюдается аналогия с кривыми ВЭЗ, если отвлечься от возникающих в начальной части кривых МТЗ небольших минимумов (при $\rho_2 / \rho_1 > 1$) и максимумов (при $\rho_2 / \rho_1 < 1$), которых нет на палеточных кривых ВЭЗ. Промежуточные высокоомные слои разреза на кривых МТЗ из-за индукционного характера поля отражаются значительно слабее, чем на кривых ВЭЗ.

¹ Здесь и в дальнейшем вычисленные кривые ρ_T / ρ_1 для сокращения будем называть кривыми ρ_T .

Мощность (в км) и сопротивление

| Номера слоев | Номера групп | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------|
| | Группа I | | | | | | | | Группа II | | | | | | | |
| | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 | | 6 | | 7 | | 8 | |
| | h | ρ | h | ρ | h | ρ | h | ρ | h | ρ | h | ρ | h | ρ | h | ρ |
| 1 | 3,5 | 17 | 3,5 | 17 | 3,5 | 17 | 3,5 | 17 | 2 | 10 | 2 | 10 | 2 | 10 | 2 | |
| 2 | ∞ | ∞ | 0,75 | 5 | 1,5 | 5 | 3,0 | 5 | 1,5 | 320 | 1,5 | 320 | 1,5 | 320 | 1,5 | |
| 3 | | | ∞ | ∞ | 1,5 | 10 | 1,5 | 5 | 1,5 | |
| 4 | | | | | | | | | | | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | |
| 5 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | | | | | | | |

Не приводя здесь известных палеток трехслойных и четырехслойных кривых МТЗ, рассмотрим в качестве примера несколько вычисленных кривых МТЗ для горизонтально-однородных трехслойного, четырехслойного и более сложных разрезов, чтобы можно было отчетливо представить себе изменение формы кривых с изменением параметров слоев. Серия таких кривых МТЗ была вычислена с помощью ЭВМ для интерпретации материалов в Ухтинской геофизической экспедиции (К. С. Морозов, 1966 г.). На рис. 3 приведена небольшая часть из них в практических координатах (\sqrt{T} и ρ_T). В табл. 1 приведены параметры слоев, для которых вычислены кривые. Графики построены для трех групп разрезов. По кривым МТЗ группы I видно (рис. 3, а), как увеличение мощности среднего проводящего слоя трехслойного разреза при неизменных мощности и сопротивлении первого слоя изменяет форму графиков. Сравнение графиков МТЗ и ВЗЗ показывает, что кривая МТЗ обладает более высокой разрешающей способностью.

Группе II соответствуют четырехслойные кривые МТЗ (рис. 3, б). Верхние два слоя постоянной мощности; сопротивление второго из них превышает сопротивление первого в 32 раза. Кривые

Таблица 1

(в Ом · м) слоев геологических разрезов

| разрезов и точек МТЗ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------|----------|----------|----------|----------|-----|----------|----------|----------|----------|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | | | | | | | | | Группа III | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | 11 | | 12 | | 13 | | 14 | | 15 | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ρ | h | ρ | h | ρ | h | ρ | h | ρ | h | ρ | h | ρ | h | ρ | h | ρ | h | ρ | h |
| 10 | 2 | 10 | 2 | 10 | 2 | 5 | 2 | 5 | 2 | 5 | 2 | 5 | 2 | 5 | 2 | 5 | 2 | 5 | 2 |
| 320 | 1,5 | 320 | 1,5 | 320 | 1,5 | 160 | 1,5 | 160 | 1,5 | 2000 | 1,5 | 160 | 1,5 | 2000 | 1,5 | 160 | 1,5 | 2000 | 1,5 |
| 2,5 | 3,0 | 5 | 3,0 | 2,5 | 1,0 | 5 | 1 | 5 | 1 | 5 | 1 | 5 | 1 | 5 | 1 | 5 | 1 | 5 | 1 |
| ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | 0,5 | 2000 | 0,5 | 2000 | 0,5 | 2000 | 0,5 | 2000 | 0,5 | 2000 | 0,5 | 2000 | 0,5 | 2000 | 0,5 |
| | | | | | | ∞ | ∞ | 0,5 | 5 | 0,5 | 5 | 5 | 2 | 5 | 2 | 5 | 2 | 5 | 5 |
| | | | | | | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ |

отражают изменение как сопротивления третьего (проводящего) слоя, так и его мощности. Лишь кривые 8 и 9 остаются неизменными: они отмечают эквивалентные разрезы (с одинаковой суммарной продольной проводимостью S). В этом неблагоприятном для электроразведки случае пропорционального увеличения мощности и сопротивления проводящего слоя при переходе из одной точки наблюдения в другую по кривым МТЗ (и ВЗЗ) нельзя проследить изменение глубины залегания опорного горизонта. Однако надо подчеркнуть, что явление принципа эквивалентности при МТЗ проявляется слабее, чем при ВЗЗ. Наиболее отчетливо изменяются кривые МТЗ, когда сопротивление проводящего горизонта уменьшается с увеличением его мощности (кривые 6 и 9, 8 и 10). Промежуточный слой повышенного сопротивления отмечается на кривых МТЗ тем более отчетливо, чем больше проводимость нижележащего слоя. Интересно сравнение теоретической кривой ВЗЗ, соответствующей верхней части разреза в точке МТЗ 10 (без высокоомного основания) с кривой МТЗ 10. Промежуточный слой повышенного сопротивления ($\rho_2/\rho_1 = 32$) служит при ВЗЗ почти экраном, в то время как при МТЗ он отмечается лишь небольшим увеличением ρ_T .

Кривые МТЗ (рис. 3, в) для разрезов группы III в случае шести-слойного разреза с двумя промежуточными слоями еще более высокого относительного сопротивления, чем в предыдущем случае, показывают, что ни изменение сопротивления этих высоко-

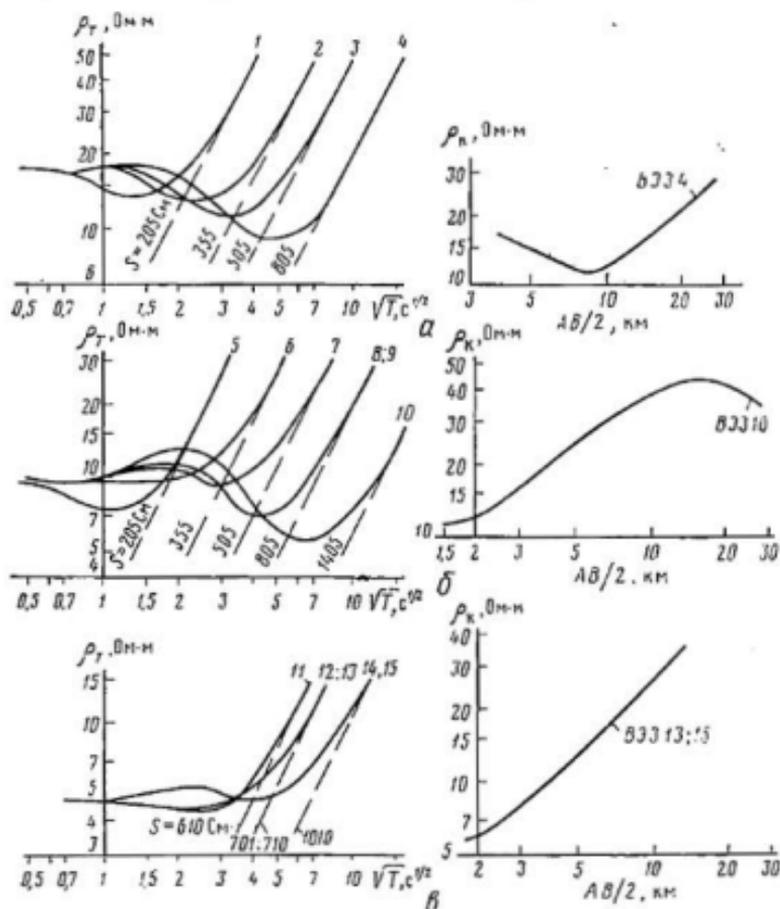


Рис. 3. Вычисленные кривые МТЗ для многослойных горизонтально-однородных разрезов (по К. С. Морозову).

Цифры у кривых — номера точек МТЗ.

омных слоев, ни обмен их местами в разрезе не изменяют форму кривых. Кривые изменяются, как и во всех предыдущих случаях, в зависимости от величины суммарной продольной проводимости разреза S , связанной почти полностью со слоями малого сопротивления. Кривая ВЭЗ для точек 13 или 15, как видим, отмечает первый высокоомный промежуточный слой, который экранирует выжележащие горизонты. Это еще раз подчеркивает преимущество МТЗ перед ВЭЗ. Горизонтально залегающий промежуточный

слой большого сопротивления даже при значительной его мощности оказывает при МТЗ слабое экранирующее действие.

В области больших периодов T колебаний поля (низких частот, длинных волн) на кривых ρ_T отмечается восходящая или нисходящая ветвь, которая отражает подстилающее практически неограниченной мощности основание n разреза.

Если сопротивление основания $\rho_n = \infty$, как во всех рассмотренных случаях, правая восходящая ветвь кривой МТЗ сливается с прямой (асимптотой), наклоненной под углом около 63° к оси абсцисс (рис. 3).

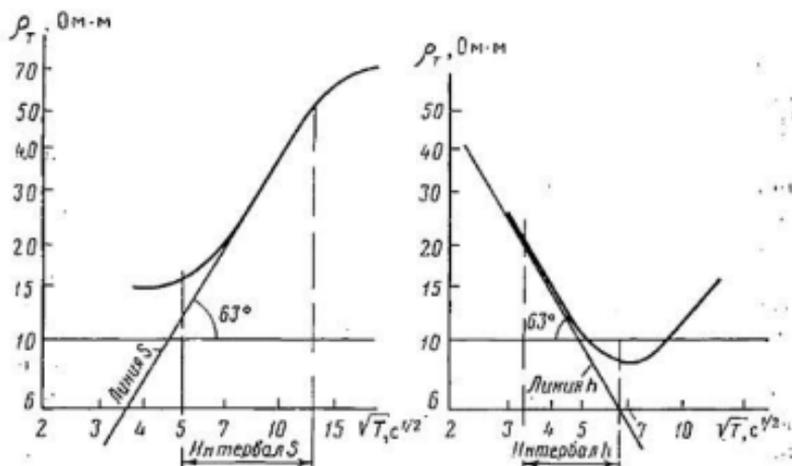


Рис. 4. Линии и интервалы S и h кривых МТЗ.

Как следует из теории МТЗ [4], в области относительно больших периодов колебаний поля (в области относительно низких частот) входной импеданс $|Z|$ зависит преимущественно от суммарной продольной проводимости S разреза. Частотный интервал (или интервал периодов), в пределах которого существует тесная связь между $|Z|$ и S , называется интервалом S (рис. 4). Он относится к восходящей ветви кривой ρ_T . Асимптоту этой ветви, наклоненную к оси абсцисс под углом приблизительно 63° , называют линией S . В интервале S , если $\rho_n = \infty$, значения ρ_T лежат на линии S , по которой определяется суммарная продольная проводимость разреза.

Если мощность горизонта с сопротивлением $\rho_n = \infty$ не очень велика, то с увеличением периода T за пределы интервала S импеданс перестает зависеть от S , и в случае горизонтально-однородной среды отражает удельное сопротивление слоев, залегающих ниже высокоомного горизонта. Иное происходит в горизонтально-неоднородной среде. На этом мы остановимся несколько позже. При $\rho_n = 0$ нисходящая ветвь кривой МТЗ имеет асимптотой прямую, наклоненную приблизительно под углом -63°

к оси абсцисс. Эта асимптота (см. рис. 4) носит название линии h [при n -слойном разрезе h — суммарная мощность верхних $(n - 1)$ слоев]. Из теории следует [42], что в области относительно больших периодов T , соответствующих нисходящей ветви кривой МТЗ, входной импеданс $|Z|$ зависит главным образом от глубины h залегания мощного проводящего горизонта. Интервал периодов (или частот), в пределах которого наблюдается тесная связь между h и $|Z|$ называется интервалом h (рис. 4). Практические кривые МТЗ с хорошо выраженной нисходящей ветвью наблюдаются в районах, где мощная (2—3 км) проводящая толща осадочных пород залегает на значительной (3—5 км) глубине под осадками повышенного сопротивления. В этих условиях наиболее часто наблюдаемый спектр периодов — от 10 до 40—50 с относится к нисходящей ветви кривых МТЗ.

При конечных значениях ρ_n основания разреза правые восходящая или нисходящая ветви кривых МТЗ в горизонтально-однородной среде стремятся к горизонтальной прямой $\rho_T = \rho_n$, так же, как и правые ветви кривых ВЭЗ в этом случае приближаются к горизонтальной прямой $\rho_n = \rho_n$.

Основы интерпретации кривых МТЗ. Палетками вычисленных кривых МТЗ для горизонтально-однородной среды пользуются при количественном истолковании практических графиков МТЗ. Сопоставляя их с теоретическими кривыми [8], можно определить глубину залегания подстилающего основания и в благоприятных условиях оценить значения мощностей и сопротивления слоев изучаемого разреза. Такая интерпретация (ее называют формальной) дает хорошие результаты на участках, где горизонтальные неоднородности слабо влияют на электромагнитное поле. Эти условия встречаются редко. На практике чаще всего приходится сталкиваться с существенными геоэлектрическими неоднородностями.

Кроме методики вычисления кривых МТЗ, разработаны графические способы их построения [17, 21, 37]. При помощи вычисленных двух- и трехслойных кривых МТЗ эти способы позволяют несложным путем получать многослойные кривые ρ_T для заданных параметров горизонтально-однородного разреза. Точность графически построенных кривых вполне достаточна для того, чтобы ими можно было пользоваться при интерпретации, наряду с вычисленными. Графические способы построения кривых облегчают истолкование практических графиков МТЗ, позволяют в полевых условиях выяснять степень влияния параметров слоев на форму кривых, обосновывать предположения об особенностях разреза, не говоря уже о возможности построения набора палеток для интерпретации практических кривых.

Анализ вычисленных кривых МТЗ для горизонтально-однородного разреза позволил Т. Н. Завадской [16] установить ряд зависимостей между некоторыми параметрами трехслойного, четырехслойного и более сложных геоэлектрических разрезов и

координатами точек максимума и минимума кривых МТЗ. Этими зависимостями также пользуются при геологическом истолковании хорошо выраженных практических кривых МТЗ.

Один из основных этапов интерпретации кривых МТЗ — определение суммарной продольной проводимости S разреза, связанной простым соотношением с глубиной h до опорного горизонта большого сопротивления и средним продольным сопротивлением ρ_l всей залегающей над ним толщи пород: $S = h/\rho_l$.

Значения S определяют по восходящей ветви кривых МТЗ, отмечающей изолирующее основание ρ_n . Если эта ветвь практически сливается с линией S , наклоненной к оси абсцисс под углом около 63° (случай, когда $\rho_n/\rho_l \geq 1000$), то S легко определяется по формулам

$$S = 356 \sqrt{T_s^{(1)}} \text{ или } S = 114 \sqrt{T_s^{(10)}},$$

где $\sqrt{T_s^{(1)}}$ и $\sqrt{T_s^{(10)}}$ — абсциссы точки пересечения линии S с линиями $\rho_T = 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, или $\rho_T = 10 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ [4]. При достаточно четко выраженном минимуме кривой перед восходящей ветвью (см. рис. 3, б, точку 10) значение S может быть получено приближенно по формуле $S = 520 \sqrt{T_{\min}/\rho_{T \min}}$ ($\sqrt{T_{\min}}$, $\rho_{T \min}$ — координаты минимума кривой ρ_T).

Если восходящая ветвь кривых ρ_T наклонена к оси абсцисс под углом, меньшим 63° , величину S определяют при помощи двуслойной палетки МТЗ. Пользуясь двуслойной палеткой МТЗ, можно определить и удельное сопротивление ρ_n опорного горизонта по кривой ρ_T , если $\rho_n \neq \infty$. Предполагается при этом, что мощность опорного горизонта достаточно велика.

Для приближенного определения значений ρ_l в точках исследования, кроме известных приемов с использованием скважин или результатов сейсморазведки, могут быть в благоприятных условиях использованы графики зависимости $\rho_l/\rho_{T \min}$ от h_2/h_1 , ρ_2/ρ_1 , составленные Т. Н. Завадской [15], $\rho_{T \min}$ — минимум кривой МТЗ, h_1 , h_2 , ρ_1 и ρ_2 — соответственно мощности и сопротивления первого и второго слоев разреза. Графики получены по вычисленным трехслойным кривым МТЗ при $\rho_3 = \infty$. В табл. 2 приведены определенные по этим графикам с погрешностью до $\pm 10\%$ средние значения $\rho_l/\rho_{T \min}$ при различных интервалах изменения параметров трехслойного разреза.

Как видно, в случае горизонтально-однородного трехслойного разреза с промежуточным проводящим слоем при h_2/h_1 в пределах от 2 до 10 и ρ_2/ρ_1 от $1/4$ до $1/39$ значение $\rho_{T \min}$ кривой МТЗ приблизительно равно ρ_l . Следовательно, в этих условиях произведение $S\rho_{T \min}$ приближенно определяет глубину залегания опорного высокоомного горизонта. Зависимости, указанные в

табл. 1, могут быть с тем же приближением использованы и для определения ρ_1 в случаях четырехслойных разрезов, где над опорным горизонтом $\rho_1 = \infty$ залегает достаточно мощная проводящая толща (h_3, ρ_3). Следует лишь вместо h_2/h_1 и ρ_2/ρ_1 принять $h_3/(h_2 + h_1)$ и ρ_3/ρ_{112} , где ρ_{112} — среднее продольное сопротивление двух верхних слоев разреза.

По величинам S и ρ_1 легко оценить глубину h залегания не проводящего основания: $h = S \cdot \rho_1$. Этот способ наиболее прост и, так же как при ВЭЗ, широко используется при количественной интерпретации кривых МТЗ. При определенных сочетаниях

Т а б л и ц а 2

Зависимость $\rho_1/\rho_{T \min}$ от параметров трехслойного разреза ($\rho_3 = \infty$)

| h_2/h_1 | ρ_2/ρ_1 | $\rho_1/\rho_{T \min}$ |
|-----------|-----------------|------------------------|
| 1—2 | 1/9—1/39 | 0,82 |
| 2—5 | 1/4—1/39 | 1,0 |
| 5—10 | 2/3—1/39 | 1,15 |
| 10 | 2/3—1/39 | 1,31 |

параметров разреза, о которых говорилось выше, $h = S\rho_{T \min}$.

В районах, где мощная проводящая толща ($h_2 = 2—3$ км) осадочных пород залегает на значительной глубине ($h_1 \approx 3—5$ км и более) под осадками повышенного сопротивления и подстилается изолирующим основанием, кривые МТЗ в диапазоне обычно регистрируемых периодов вариаций имеют нисходящую ветвь, минимум и восходящую

ветвь. На нисходящую ветвь приходится наиболее часто наблюдаемый спектр периодов — от 10 до 50 с. Вспомним, что диапазон периодов, который относится к нисходящей ветви кривой МТЗ, называется интервалом h в отличие от интервала S , соответствующего восходящей ветви кривой.

Исследуя вычисленные кривые МТЗ для таких случаев, И. А. Яковлев показал [41, 43], что по нисходящей ветви можно приближенно оценить глубину залегания проводящей толщи, т. е. мощность h_1 верхнего горизонта повышенного сопротивления. Это допустимо, если нисходящая ветвь имеет достаточную протяженность и наклонена к оси абсцисс под углом не менее -50° . Для определения h_1 используется теоретическая двуслойная палетка кривых МТЗ при $\rho_2 < \rho_1$, с помощью которой находят точку пересечения линии h палетки с осями $\rho_T = 1$ Ом · м или $\rho_T = 10$ Ом · м интерпретируемой кривой МТЗ (см. рис. 4).

Абсциссы $\sqrt{T_h^{(1)}}$ или $\sqrt{T_h^{(10)}}$ этих точек пересечения решают задачу приближенного определения глубины залегания проводящей толщи: $h_1 = 0,396 \sqrt{T_h^{(1)}}$ или $h_1 = 1,28 \sqrt{T_h^{(10)}}$.

По И. А. Яковлеву, относительная погрешность оценки h_1 при h_2/h_1 от 0,3 до 1 и ρ_2/ρ_1 от 1/19 до 1/9 составляет не более $\pm(10 \div 20)\%$.

Теоретические кривые МТЗ в горизонтально-неоднородной среде. *H*- и *E*-поляризации поля. До сих пор речь шла о свойствах земного электромагнитного поля в условиях горизонтально-

однородной среды, для которых и разработана теория МТЗ. К настоящему времени имеется ряд теоретических и лабораторных исследований, которые посвящены МТЗ в горизонтально-неоднородных средах. Ознакомимся с результатами этих исследований, которые имеют большое значение для решения практических задач интерпретации.

Простейшую модель горизонтально-неоднородной среды — выклинивающийся проводящий слой, подстилаемый непроводящим основанием, — рассмотрел М. Н. Бердичевский [4]. Задача о магнитотеллурическом поле в этом случае была решена приближенно. Тем не менее это решение дает представление о характере искажения поля (тем самым и об искажении кривых МТЗ) и используется на практике при истолковании результатов магнитотеллурической разведки.

Под искаженной кривой МТЗ обычно понимают кривую, которая получена на участке среды с трехмерным изменением (по площади и с глубиной) геоэлектрических свойств, существенно отличающемся от кривой МТЗ, вычисленной в той же точке для горизонтально-однородной среды (т. е. с одномерным — только по вертикали — распределением геоэлектрических свойств). Та-

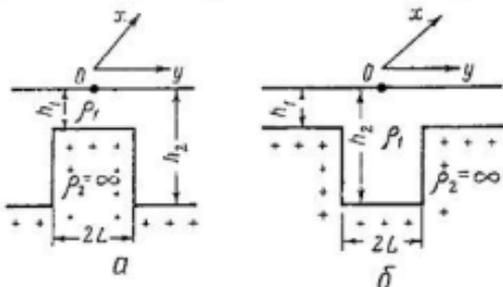


Рис. 5. Модели горста (а) и грабена (б).

кую теоретическую кривую называют нормальной. Различие между искаженной и нормальной кривыми зависит от степени влияния горизонтальных геоэлектрических неоднородностей на электромагнитное поле.

В середине 60-х годов была полностью решена задача электромагнитного поля для горизонтально-неоднородных сред, представленных весьма протяженными двумерно-неоднородными структурами (электрические свойства изменяются лишь с глубиной и вкрест простирания структур) [26, 27]. В. И. Дмитриевым и Г. А. Кокотушкиным вычислены палетки кривых МТЗ для горста, грабена и уступа [14].

Остановимся на некоторых особенностях изменения кривых МТЗ над горстом и грабеном (рис. 5). Прежде всего следует заметить, что электромагнитное поле, в котором ток течет вдоль двумерно-неоднородной линейной структуры (электрическая компонента поля E направлена по простиранию структуры) называют E -поляризованным полем. Магнитное поле при этом поляризовано вкрест простирания структуры. Если же по простиранию структуры поляризована магнитная компонента (ток течет вкрест простирания структуры), то поле называется H -поляризованным. Форма кривых МТЗ в одном и том же пункте исследования

горизонтально-неоднородной среды изменяется в зависимости от E -или H -поляризации поля. Кривые МТЗ, полученные при течении тока вдоль или поперек линейно вытянутой структуры, называют соответственно продольными или поперечными кривыми и обозначают ρ_T^{\parallel} и ρ_T^{\perp} .

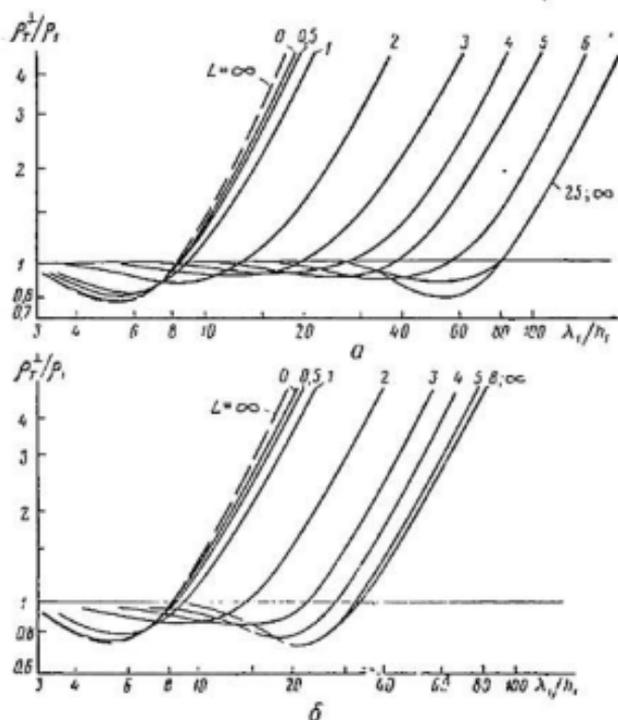


Рис. 6. Палетки кривых МТЗ над горстом при H -поляризованном поле (по В. И. Дмитриеву, Г. А. Кокотушкину).

а — $h_2/h_1 = 10$, $L/h_1 = 1$; б — $h_2/h_1 = 4$, $L/h_1 = 1$. Шифры кривых — y/h_1 .

Для рассматриваемых моделей установка МТЗ располагается на плоской поверхности над структурами так, что ось x направлена по простиранию структуры, ось y — вкrest простирания. Поэтому вычисленные кривые ρ_{Txy} представляют собой кривые ρ_T^{\parallel} , а кривые ρ_{Tyx} — ρ_T^{\perp} .

Горст. Модель имитирует структуру, сложенную породами бесконечно большого сопротивления ($\rho_2 = \infty$) и перекрытую проводящей средой с ρ_1 (рис. 5). Поверхность горста залегает на глубине h_1 , основание — на глубине h_2 . Ширина горста равна $2L$. Вычисление кривых МТЗ произведено для различных относительных размеров горста: h_2/h_1 (от 2 до 10) и L/h_1 (от 0,1

до 2). Точки МТЗ перемещаются с относительным шагом y/h_1 по линии вкрест простирация горста от оси его симметрии.

На рис. 6 приведены палетки кривых ρ_T^\perp при H -поляризации поля над горстом с параметрами $h_2/h_1 = 10$ и 4 , $L/h_1 = 1$ при различных расстояниях y/h_1 от оси симметрии горста. Для сравнения (пунктиром) показаны нормальные кривые МТЗ, соответствующие бесконечно большой ширине горста ($L = \infty$), т. е. случаю, когда разрез представляет собой горизонтально-одно-

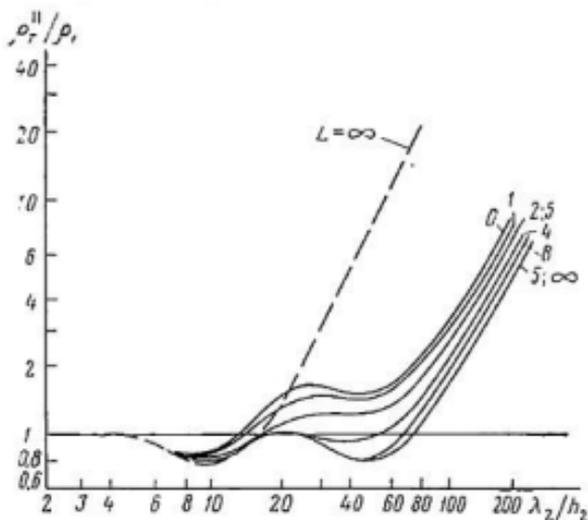


Рис. 7. Палетки кривых МТЗ над горстом при E -поляризованном поле (по В. И. Дмитриеву, Г. А. Кокотушкину).

$h_2/h_1 = 2.5$, $L/h_1 = 5$. Шифр кривых — y/h_1 .

родный проводящий слой мощностью h_1 , подстилаемый непроводящим основанием.

Как видим, кривые ρ_T^\perp над осью симметрии горста ($y = 0$) незначительно отличаются от кривой при $L = \infty$ (нормальной кривой), указывая, однако, несколько завышенные значения суммарной проводимости S по сравнению с истинным ($S = h_1/\rho_1$) над горстом. Эти значения постепенно возрастают к краю горста и более резко за его пределами. Но вблизи от горста кривые еще отмечают заниженные значения S по сравнению с истинной суммарной проводимостью среды вне горста ($S = h_2/\rho_2$), и лишь на некотором предельном расстоянии, которое зависит от относительной высоты h_2/h_1 , начинают указывать истинное значение S . При $h_2/h_1 = 10$ предельное $y/h_1 = 25$, при $h_2/h_1 = 4$ этот предел уменьшается до 8.

Палетки всех вычисленных кривых ρ_T^\perp для горста при H -поляризованном поле показывают, что кривые эти отмечают несколько

завышенные значения S над поверхностью горста. Завышение незначительно при относительной ширине горста $L/h_1 \geq 1$ и возрастает с ее уменьшением. Относительная высота горста при этом оказывает слабое влияние.

За пределами горста кривые ρ_T^{\perp} отмечают заниженные значения по сравнению с истинными значениями S . Уменьшение тем

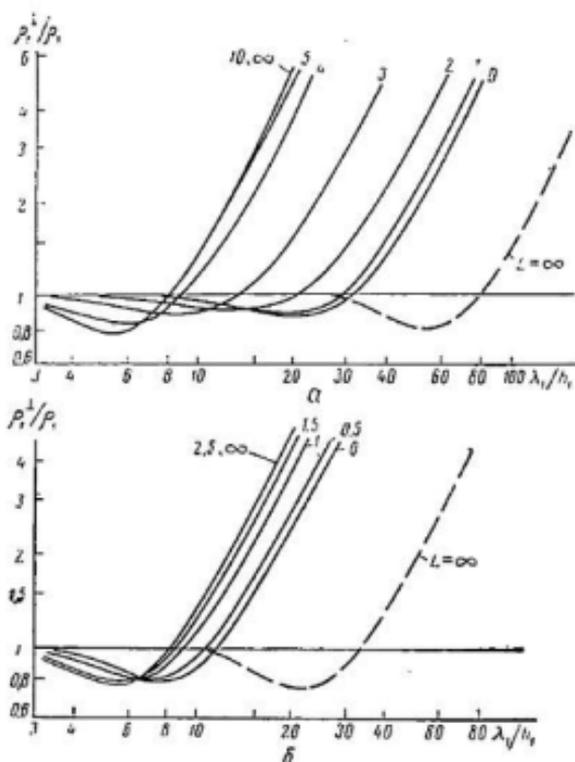


Рис. 8. Палетки кривых МТЗ над грабелом при H -поляризованном поле (по В. П. Дмитриеву, Г. А. Кокотушкину).

α — $h_2/h_1 = 10$, $L/h_1 = 4$; β — $h_2/h_1 = 4$, $L/h_1 = 1$. Шифр кривых — y/h_1 .

более значительно, чем ближе точка МТЗ к горсту и больше относительная высота его.

При E -поляризованном поле кривые МТЗ (кривые ρ_T^{\parallel}) над горстом в значительной мере искажаются. Они дают ложное представление об изменении геоэлектрического разреза. На рис. 7 приведены палетки кривых ρ_T^{\parallel} над горстом ($h_2/h_1 = 5$; $L/h_1 = 2,5$). Мы видим, что кривые ρ_T^{\parallel} резко искажены по сравнению с нормальной (пунктирной) кривой при $L = \infty$. Истолкование их может привести к ошибочному представлению о разрезе с промежуточным проводящим слоем.

Грабен. Рассмотрим вычисленные кривые МТЗ над моделью грабена. При H -поляризованном поле вычисления выполнены для h_2/h_1 от 2 до 10, L/h_1 от 0,5 до 10. Посмотрим, как изменяются кривые в точках зондирования, расположенных по линии вкрест простирания грабена (рис. 8). В точке $y = 0$ кривые ρ_T^\perp отмечают заниженные значения S по сравнению с истинными S (истинное $S = h_2/\rho_1$). По мере приближения к борту грабена величины S , определяемые по кривым ρ_T^\perp , продолжают уменьшаться и достигают истинных значений $S = h_2/\rho_1$ в точках вне грабена, удаленных на различные расстояния y/h_1 в зависимости от h_2/h_1 и L/h_1 .

Палетки показывают, таким образом, что кривые МТЗ над грабеном при H -поляризации поля имеют четко выраженную асимптотическую восходящую ветвь, по которой определяются величины суммарной продольной проводимости S , значительно заниженные по сравнению с истинными. Степень отклонения от нормальной кривой ($L = \infty$) возрастает с увеличением глубины (h_2/h_1) грабена и особенно с уменьшением его ширины (L/h_1).

Это видно, например, из рис. 9, где представлены кривые ρ_T^\perp в точках зондирования над осью симметрии грабена ($y = 0$) при ширине его $L/h_1 = 8$ и $L/h_1 = 1$ и глубинах h_2/h_1 , равных 2, 4 и 6.

При E -поляризованном поле кривые ρ_T^\parallel над грабеном искажены и по существу не позволяют его проследить. Небольшое количество вычисленных палеток для относительно глубоких и широких грабенов ($h_2/h_1 = 10$ и 20 , $L/h_1 = 10$; 20 ; 25 ; 50 ; 100) показывает, что кривые ρ_T^\parallel , как и в случае горста, заметно отличаются от кривых ρ_T^\perp , давая ложное представление о геoeлектрическом разрезе.

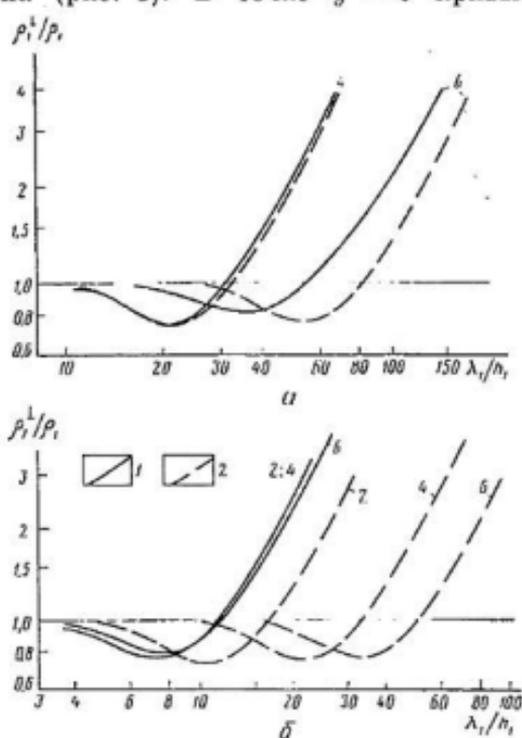


Рис. 9. Палетки кривых МТЗ над осью симметрии грабена при H -поляризованном поле и нормальные кривые МТЗ (по В. И. Дмитриеву, Г. А. Кокотушкину).

$a - L/h_1 = 8$; $b - L/h_1 = 1$; 1 — кривые ρ_T^\perp/ρ_1 ; 2 — нормальные кривые ($L = \infty$) Шифр кривых — y/h_1 .

На рис. 10 показана палетка кривых ρ_T^{\parallel} над грабеном при $h_2/h_1 = L/h_1 = 10$. Кривые МТЗ в точках непосредственно над грабеном ($y/h_1 = 0; 0,5$), как видим, имеют резко выраженный минимум, восходящая ветвь наклонена к оси абсцисс под углом более 63° . За пределами грабена кривые отражают геоэлектрический разрез без искажения лишь в точках на расстоянии $y/L = = 12$ от оси грабена.

Рассмотрение кривых МТЗ над моделями двумерно-неоднородных структур в виде горста и грабена приводит к выводу,

что при исследовании линейных структур подобного типа предпочтительнее использовать для геологического истолкования кривые ρ_T^{\perp} , полученные по составляющей электрического поля вкrest простирания этих протяженных структур.

Клин. Необходимо остановиться и на модели горизонтально-неоднородной среды — протяженном проводящем выклинивающемся слое (клине), подстилаемом основанием бесконечно большого сопротивления. Задача об электромагнитном поле в этом случае, как уже говорилось, в свое время была решена приближенно. Однако и такое решение играет большую роль

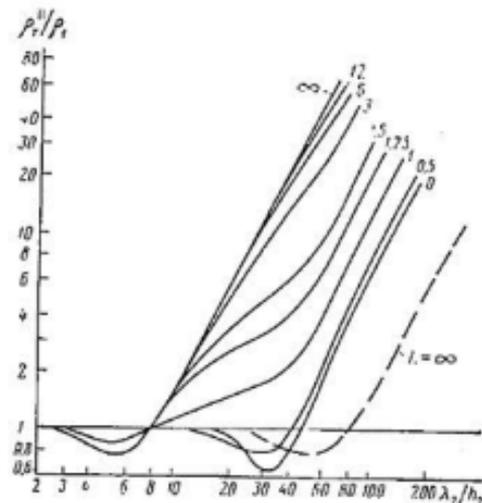


Рис. 10. Палетки кривых МТЗ над грабеном при E -поляризованном поле (по В. И. Дмитриеву, Г. А. Кокотушкину).

Шифр кривых — y/h_1 .

при интерпретации результатов магнитотеллурических исследований. Модель проводящего клина с углом падения α представлена на рис. 11, а. Ось x установки МТЗ направлена по падению клина, ось y — по простиранию. Расчеты показывают, что кривая ρ_T^{\perp} (при H -поляризованном поле) в точке наблюдения, по-существу, не отличается от нормальной кривой ρ_T , т. е. кривой, полученной в той же точке для горизонтально-однородного слоя. Отсюда следует, что и значения S^{\perp} , определяемые по кривым ρ_T^{\perp} , близки к истинным значениям в точках исследования.

Кривая ρ_T^{\parallel} (при E -поляризованном поле) оказывается расположенной выше кривой ρ_T^{\perp} (рис. 11, а), т. е. $\rho_T^{\parallel} > \rho_T^{\perp}$, отсюда $S^{\parallel} < S^{\perp}$. Кривая несколько искажена — имеет более крутую восходящую ветвь с выполаживанием при больших периодах T .

Теоретические и экспериментальные исследования показывают, что с увеличением угла α расхождение между кривыми ρ_T^{\parallel} и ρ_T^{\perp} увеличивается. Таким образом, и на поверхности

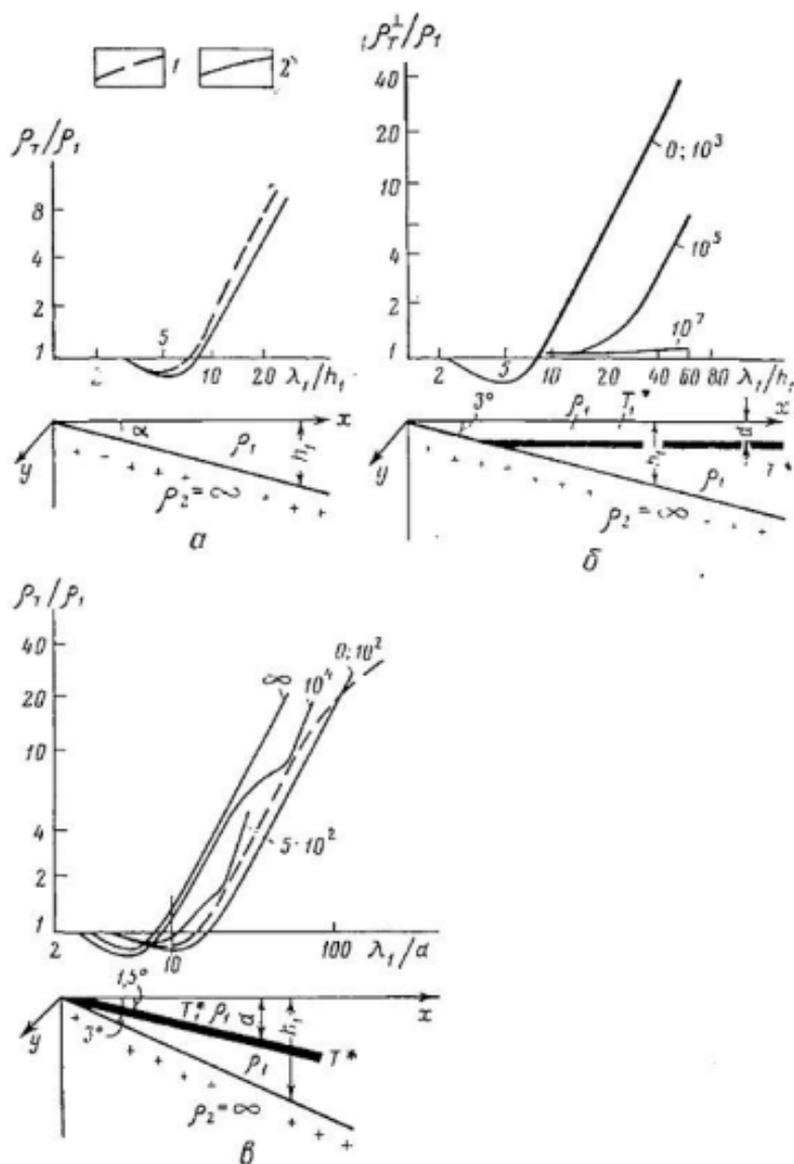


Рис. 11. Вычисленные кривые МТЗ над горизонтально-неоднородным разрезом (по М. Н. Вердичевскому).

а — проводящий клин; б — то же, с горизонтальным экраном; в — то же, с наклонным экраном; 1 — кривые ρ_T^1 / ρ_1 ; 2 — кривые ρ_T / ρ_1 . Шифр кривых — $m = T^* / T_1^*$.

протяженного однородного проводящего выклинивающего слоя, который подстилается мощным горизонтом большого сопротивления, наиболее достоверный результат МТЗ может быть получен в случае H -поляризации, т. е. когда электрическое поле направлено вкрест простирания слоев.

На рис. 11, б приведена более сложная модель горизонтальной неоднородности, рассмотренная М. Н. Бердичевским. Внутри проводящего клина, подстилаемого изолятором, на глубине d , расположен горизонтальный пропласток малой мощности h^* , но высокого поперечного сопротивления $T^* = h^* \rho^*$ по сравнению с T_1^* вмещающей среды. Из приближенных расчетов следует, что в случае H -поляризации поля при не очень большом T^* ($\frac{T^*}{T_1^*} = m \leq 10^3$), кривая $\rho_{\frac{1}{T}}$ почти не отличается от нормальной кривой МТЗ. Но по мере увеличения T^* горизонтальный высокоомный пропласток оказывает все большее влияние на магнитотеллурическое поле, кривая $\rho_{\frac{1}{T}}$ становится более пологой в левой части и при очень большом T^* превращается почти в горизонтальную прямую (см. рис. 11, б). Искажающее влияние промежуточного высокоомного горизонтального пропластка (экрана) возрастает с увеличением угла α падения непроводящего основания.

Расчеты показывают, что при E -поляризованном поле экран не влияет на электромагнитное поле: кривые $\rho_{\frac{1}{T}}$ не отличаются от кривых МТЗ, получаемых при E -поляризованном поле на модели проводящего клина без экрана. В этом случае промежуточный высокоомный пропласток называют прозрачным.

Если экран внутри протяженного проводящего однородного клина будет наклонным (рис. 11, в), при E -поляризованном поле он, как и в случае горизонтального его залегания, прозрачен, и кривые $\rho_{\frac{1}{T}}$ совпадают с продольными кривыми МТЗ, полученными при отсутствии пропластка [5]. При H -поляризованном поле наклонный высокоомный пропласток экранирует лежащую ниже среду тем сильнее, чем больше его поперечное сопротивление T^* отличается от T_1^* вмещающей среды и чем больше угол наклона пропластка непроводящего основания.

На рис. 11, в приведена кривая $\rho_{\frac{1}{T}}$ при E -поляризованном поле. Она не отличается от кривой $\rho_{\frac{1}{T}}$ над выклинивающимся слоем без экрана. При H -поляризованном поле вид кривых $\rho_{\frac{1}{T}}$ зависит от поперечного сопротивления пропластка. В случае прозрачности последнего (m от 0 до 10^2) кривая $\rho_{\frac{1}{T}}$ мало отличается от кривой $\rho_{\frac{1}{T}}$, будучи лишь сдвинутой от нее в сторону больших периодов. Искажающее влияние наклонного экрана заметно при $m = 5 \cdot 10^2$. Экран наиболее сильно влияет в области малых периодов T . На кривой отражаются два опорных горизонта: наклонный высокоомный пропласток и непроводящее основание.

При $m = 10^4$ влияние экрана отмечается на кривой ρ_T^{\perp} уже достаточно резко. Абсолютно непрозрачный экран отражается на кривой ρ_T^{\perp} (см. рис. 11, е) как наклонное непроводящее основание.

Таким образом, в случае МТЗ над проводящим клином с включением в него промежуточным наклонным высокоомным пропластком, значения $\rho_T^{\perp} > \rho_T^{\parallel}$. Превышение достигает максимума, когда поперечное сопротивление пропластка очень велико. Экраниру-

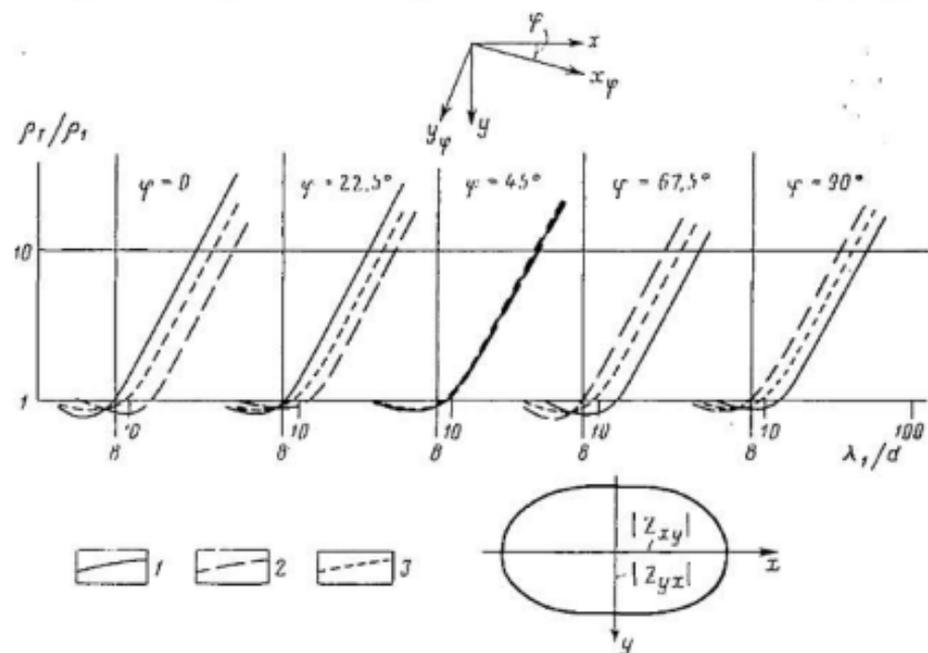


Рис. 12. Зависимость кривых МТЗ от ориентации установки и импедансная полярная диаграмма (по М. Н. Бердичевскому).

1 — ρ_{Txy} ; 2 — ρ_{Tyx} ; 3 — $\rho_{T\text{эф}}$.

ющее влияние пропластка увеличивается с возрастанием угла наклона его и изолирующего основания.

Кривые МТЗ над горизонтально-неоднородной средой изменяются в зависимости от ориентации установки [5, 38]. Из рассмотренного примера следует, что если при $m = \infty$ оси x, y направлены соответственно по падению и простиранию изолирующего основания, то кривая ρ_{Txy} (или ρ_T^{\perp}) отражает глубину залегания высокоомного промежуточного пропластка, а кривая ρ_{Tyx} (или ρ_T^{\parallel}) — глубину до изолирующего основания. Эффективная же кривая $\rho_{T\text{эф}} = \sqrt{\rho_T^{\parallel} \rho_T^{\perp}}$ будет отмечать глубину до некоторой средней поверхности, лежащей между высокоомным пропластком и изолирующим основанием. Поворот измерительной установки на угол φ (рис. 12) изменяет соотношение кривых. Кривая $\rho_{T\text{эф}}$

с вращением установки остается неизменной. Кривые ρ_{Txy} и ρ_{Tyx} при изменении угла φ от нуля до 45° сближаются между собой и с кривой $\rho_{T\varphi}$, причем остается прежнее соотношение: $\rho_{Txy} > \rho_{Tyx}$. При $\varphi = 45^\circ$ все три кривые сливаются в одну. При дальнейшем увеличении угла φ кривые снова расходятся, но соотношение между ними изменяется: теперь $\rho_{Txy} < \rho_{Tyx}$. Максимальное расхождение отмечается при $\alpha = 90^\circ$, когда оси установки поменялись местами: $\rho_{Txy} = \rho_{Tyx}$ и $\rho_{Tyx} = \rho_{Txy}$. В этом положении установки кривая ρ_{Txy} отмечает глубину залегания изолирующего основания, а кривая ρ_{Tyx} — глубину до высокоомного пропластка.

Таким образом, изменяя ориентацию установки, можно получить диаграмму, которая характеризует изменение ρ_T в зависимости от положения установки и называется полярной. Она обычно строится по значениям импедансов $|Z_{xy}|$ и $|Z_{yx}|$, относящихся к интервалу S кривой МТЗ. На рис. 12 приведена импедансная полярная диаграмма, вычисленная для случая выклинивающегося проводящего слоя с промежуточным наклонным экраном. Диаграмма имеет форму эллипса, большая и малая полуоси которого соответственно равны $|Z_{xy}|$ и $|Z_{yx}|$. Большая полуось направлена по падению изолирующего основания, малая — по простиранию. Иными словами, импедансная полярная диаграмма в этом случае показывает, что кривая ρ_{Txy} или $\rho_{T \max}$ соответствует H -поляризации поля, кривая ρ_{Tyx} или $\rho_{T \min}$ — E -поляризации.

Полярные диаграммы часто составляются при обработке магнитотеллурических наблюдений. Они позволяют определять направление падения и простирания экрана и непроводящего основания. С помощью таких диаграмм оценивается степень нарушения горизонтальной однородности разреза. Для этого вычисляется так называемый коэффициент M неоднородности, равный отношению большой a и малой b полуосей диаграммы ($M = a/b$). С увеличением горизонтальной неоднородности среды M увеличивается. Легко представить себе, что в средах горизонтально-однородных коэффициент M равен единице: полярная импедансная диаграмма в этом случае имеет форму окружности.

Вследствие того, что результаты МТЗ ($\rho_{\frac{1}{2}}$ и $\rho_{\frac{1}{4}}$) при значительной горизонтальной неоднородности среды зависят от азимута измерительной установки, при практическом выполнении МТЗ рекомендуется всегда по возможности придерживаться одного направления осей установки — по простиранию и вкrest простирания структур.

Если на участках развития линейных структур в одной и той же точке получают кривые $\rho_{\frac{1}{2}}$ и $\rho_{\frac{1}{4}}$, резко отличающиеся друг от друга, то теряет смысл построение кривых $\rho_{T\varphi}$. В этих случаях интерпретируют отдельно кривые $\rho_{\frac{1}{2}}$ и $\rho_{\frac{1}{4}}$. В районах распространения нелинейных структур (к последним относятся структуры без четко выраженных осей) кривые МТЗ уже не могут рассмат-

риваться как продольные и поперечные. При незначительном влиянии горизонтальных неоднородностей, искажающих кривые ρ_{Txy} и ρ_{Tyx} , в точках МТЗ могут быть вычислены средние кривые $\rho_{Tэф} = \sqrt{\rho_{Txy}\rho_{Tyx}}$, которые и используются при интерпретации.

Эффекты искажения кривых МТЗ. Остановимся на некоторых факторах, искажающих кривые МТЗ. При истолковании магнитотеллурических наблюдений надо всегда иметь в виду возможность искажающих влияний горизонтальных неоднородностей на электромагнитное поле. Мы не будем касаться теории эффектов, вызывающих искажения кривых МТЗ. За последние годы она была предложена многими исследователями — В. И. Дмитриевым, Г. А. Кокотушкиным, Г. Г. Обуховым, А. А. Кауфманом, Л. А. Таборовским, М. Н. Бердичевским, А. А. Ковтун, М. А. Добровольской и др. Попытаемся изложить лишь результаты изучения этих эффектов [20].

Ранее говорилось, что именно понимается под искажением кривой МТЗ. Признак искажения — изменение формы кривых в зависимости от направления осей установки МТЗ. Мы знаем, что кривые интерпретируются при помощи палеток, вычисленных для горизонтально-однородных слоистых сред. При таком способе интерпретации зависимость практических кривых от положения измерительной установки приводит к неоднозначным построениям в одной и той же точке наблюдения. Интерпретатору необходимо путем осреднения результатов или отбора из них наиболее достоверных дать по возможности правильное геологическое истолкование материалам разведки. Поэтому подход к интерпретации искаженных кривых МТЗ должен основываться на знании характера искажений электромагнитного поля в горизонтально-неоднородных средах.

Главная роль искажения кривых МТЗ принадлежит электрическому полю. Оно наиболее чувствительно к горизонтальным изменениям электропроводности. Искажения кривых МТЗ бывают двух типов: 1) гальванические (гальванический эффект), 2) индукционные (индукционный эффект). Слой геоэлектрического разреза связан гальванически, если ток перетекает из одного слоя в другой, и индукционно — при взаимной индукции токов в этих слоях.

К настоящему времени наиболее отчетливое представление сложилось об эффектах искажения кривых МТЗ над линейными структурами. Если ток течет поперек структур (в двумерно-неоднородных средах — это случай *H*-поляризации), то они, заряжаясь, вызывают аномальное электрическое поле, которое имеет преимущественно гальванический характер. Индукционное действие тока, направленного вкrest структур, незначительно. Таким образом, для поперечных кривых МТЗ характерны искажения гальванического типа. К ним относятся в первую очередь так называемые эффект *S* и эффект экранирования, которые в наибольшей мере искажают кривые МТЗ.

Чтобы уяснить сущность эффекта S , вспомним следующее. В горизонтально-однородной среде, содержащей промежуточный высокоомный горизонт значительной мощности, при низких частотах вариаций поля (больших периодах T) импеданс зависит от суммарной продольной проводимости S слоев, которые лежат над высокоомным горизонтом. Мы знаем, что этот частотный интервал называется интервалом S . При понижении частоты (увеличении T) за пределами интервала S импеданс перестает зависеть от суммарной продольной проводимости и отражает удельное сопротивление слоев, лежащих ниже высокоомного горизонта. Иное наблюдается в горизонтально-неоднородной среде. Промежуточный горизонт большого сопротивления нарушает гальваническую связь между слоями, залегающими выше и ниже его, что препятствует перераспределению тока в неоднородных зонах. Верхние слои становятся гальванически замкнутой системой. Изменения суммарной продольной проводимости такой системы влияют на электрическое поле, следовательно, и на импеданс даже в области низких частот далеко за пределами интервала S . Таким образом, в этих условиях горизонтально-неоднородной среды наблюдается повышенная чувствительность импеданса к изменениям суммарной продольной проводимости S , сохраняющаяся и при самых низких частотах.

Импеданс увеличивается с уменьшением величины S и уменьшается с возрастанием S . Если промежуточный высокоомный горизонт практически непроводящий, то импеданс обратно пропорционален величине S . Легко представить себе, что правая часть кривых $\rho_{\frac{1}{T}}$, отражающая разрез ниже высокоомного горизонта, искажается в сравнении с нормальной кривой, смещаясь по оси ординат вверх при уменьшении величины S и вниз при увеличении S (рис. 13, а). Такое искажение кривых $\rho_{\frac{1}{T}}$ и называется эффектом S . Он оказывается тем сильнее, чем больше относительные изменения S и поперечное сопротивление высокоомного горизонта.

Обращаясь к рис. 13, а, качественно характеризующему эффект S , видим, что в точке A , расположенной в зоне горизонтального залегания слоев, кривая $\rho_{\frac{1}{T}}$ не искажена. Точка B находится над поднятием промежуточного высокоомного горизонта. Здесь значение S понижено. Это влечет за собой увеличение импеданса и, следовательно, смещение правой части кривой $\rho_{\frac{1}{T}}$ вверх по сравнению с нормальной. В точке B , где значение S повышено, кривая $\rho_{\frac{1}{T}}$ смещается вниз. При интерпретации кривых с применением палеток нормальных кривых получается завышенная мощность высокоомного промежуточного горизонта в точке B и заниженная в точке A .

Если бы проводящая среда в разрезе (рис. 13, а) подстилалась основанием с бесконечно большим сопротивлением, то кривая $\rho_{\frac{1}{T}}$ в точке B отметила бы заниженное по сравнению с истинным

значение суммарной продольной проводимости всего разреза, а в точке B — завышенное. Следствием эффекта S могут, таким образом, оказаться ложные структуры в нижних слоях осадочной толщи и рельефе фундамента. Для распознавания эффекта S надо построить график зависимости между S^\perp и глубинами h до проводящей толщи под высокоомным горизонтом. Эти глубины определяются с помощью формальной интерпретации кривых

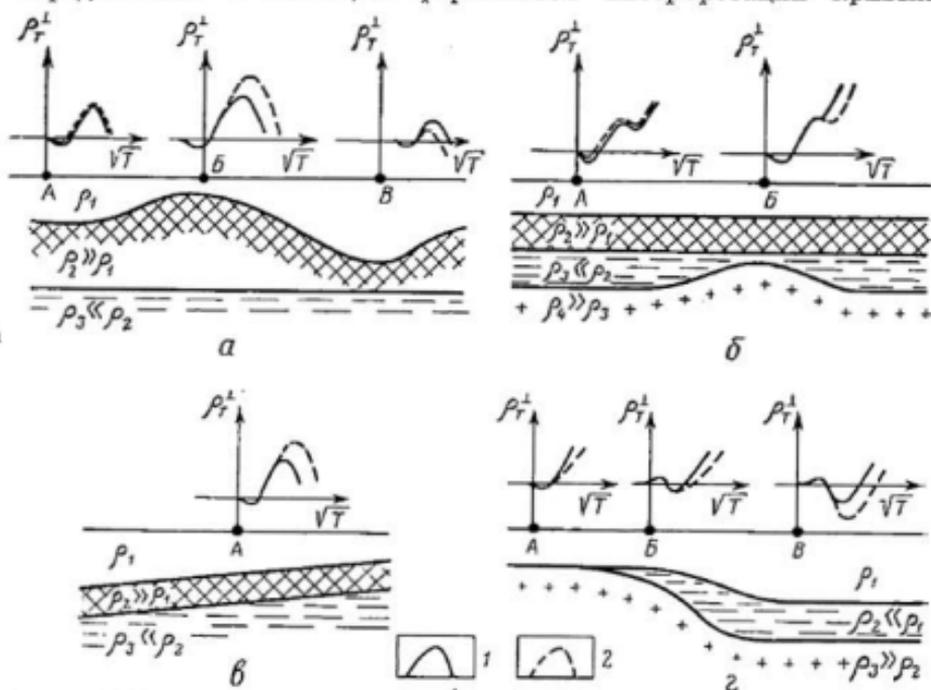


Рис. 13. Кривые ρ_T^\perp , искаженные гальваническими эффектами, над линейными структурами (по М. Н. Бердичевскому, В. И. Дмитриеву, И. А. Яковлеву и др.).

a — эффект S ; $б$ — эффект экранирования; $в$ — эффект наклона; $г$ — краевой эффект; 1 — нормальные кривые; 2 — искаженные кривые.

МТЗ. Обратная зависимость между S^\perp и h может свидетельствовать о влиянии эффекта S .

Эффект экранирования сопутствует эффекту S . Он состоит в том, что промежуточный высокоомный горизонт, нарушая гальваническую связь между верхними и нижними слоями, превращает последние в гальванически замкнутую систему. Поэтому изменения геоэлектрических свойств разреза здесь слабо влияют на электрическое поле, наблюдаемое в пункте МТЗ. Эффект экранирования проявляется тем сильнее, чем больше поперечное сопротивление высокоомного промежуточного горизонта. Если этот горизонт практически не пропускает ток, наблюдается полное экранирование.

На рис. 13, б видно, что кривые $\rho_{\frac{1}{T}}$ в точках *A* и *B* практически совпадают. Поднятие непроводящего основания (фундамента) в точке *B* не находит отражения на кривой $\rho_{\frac{1}{T}}$ вследствие эффекта экранирования. Формальная интерпретация результатов МТЗ в этом случае приводит к выравниванию структур в нижних слоях осадочного чехла и рельефе фундамента. Эффект экранирования можно обнаружить, сопоставляя результаты формальной интерпретации кривых $\rho_{\frac{1}{T}}$ и $\rho_{\frac{1}{T}}$. Если действует эффект экранирования, то структуры по поверхности непроводящего основания (фундамента), отчетливо выделяемые на карте по кривым $\rho_{\frac{1}{T}}$, будут плохо (или вовсе не будут) отмечаться на той же карте по кривым $\rho_{\frac{1}{T}}$.

Наклонное залегание высокоомного промежуточного горизонта вызывает гальваническое действие, с которым предположительно связан эффект, получивший название эффекта наклона. С этим эффектом мы отчасти ознакомились при рассмотрении модели проводящего клина, в который включен наклонный высокоомный пропласток. Приближенные расчеты позволяют предполагать, что вследствие эффекта наклона кривые $\rho_{\frac{1}{T}}$ отмечают завышенную мощность высокоомного промежуточного горизонта (рис. 13, в). По-видимому, эффект усиливается с повышением поперечного сопротивления промежуточного горизонта, увеличением его наклона и протяженности участка моноклиального падения.

К эффектам гальванического типа относится и так называемый краевой эффект. Он наблюдается в районах развития глубоких вытянутых впадин, заполненных проводящими отложениями [7, 23]. Эффект вызывается гальваническим действием высокоомных бортов впадины, препятствующих поперечному течению тока. Впадина служит каналом для тока — по ее оси поляризуется низкочастотное электрическое поле; поперечная же составляющая этого поля ослабляется. Правые ветви кривых $\rho_{\frac{1}{T}}$ искажаются, смещаясь вниз по оси.

На рис. 13, г показаны примеры вычисленных кривых $\rho_{\frac{1}{T}}$, искаженных краевым эффектом. Точки зондирования *A* и *B* — над бортом впадины. Краевой эффект начинается на участке восходящей ветви кривых $\rho_{\frac{1}{T}}$, отмечающей непроводящее основание (фундамент). Кривые дают ложное представление о наличии проводящего слоя внутри фундамента. Точка *B* находится в центральной части впадины. Начало краевого эффекта, как видим, относится к интервалу нисходящей ветви, связанной с проводящим слоем разреза. Кривая $\rho_{\frac{1}{T}}$ искажена по сравнению с нормальной кривой: минимум становится глубже, восходящая ветвь смещается вниз. При интерпретации ее получают завышенное значение мощности осадочной толщи. Отчетливые признаки краевого эффекта проявляются в устойчивой линейной поляризации низко-

частотного электрического поля вдоль оси впадины, смещении вниз правых ветвей поперечных кривых ($\rho_T^\perp < \rho_T^\parallel$) и увеличении отношения $\rho_T^\parallel/\rho_T^\perp$ при приближении к бортам впадины.

Мы ознакомились с искажениями кривых МТЗ в случае, когда ток течет поперек линейных структур. При течении тока вдоль структур кривые ρ_T^\parallel подвержены искажениям индукционного типа. При этом направлении тока структуры заряжаются гораздо слабее; их гальваническое действие мало. Избыточные токи, создаваемые горизонтальной неоднородностью, параллельны структурам, и их индукционное действие значительно. Таким образом, аномальное поле при продольном течении тока имеет индукционный характер.

Сущность индукционного эффекта сводится к следующему. Поле на высоких частотах вследствие скин-эффекта имеет локальный характер. Левая часть кривых ρ_T^\parallel отражает вертикальный разрез вблизи точки МТЗ. С понижением частоты, когда ослабевает скин-эффект, начинается индукционное действие избыточных токов, текущих вдали от точки наблюдения. Кривые ρ_T^\parallel искажаются из-за влияния соседних структур. Искажения тем заметнее, чем больше горизонтальные изменения суммарной продольной проводимости S слоев, залегающих над непроводящим основанием. При этом соседние области погружения его вызывают уменьшение ρ_T^\parallel в точке МТЗ, а поднятия — увеличение ρ_T^\parallel . Следовательно, на кривой ρ_T^\parallel находит отражение не только вертикальный разрез, но и особенности изменения рельефа непроводящего основания в горизонтальном направлении. С дальнейшим понижением частоты вариаций влияние соседних структур ослабевает. Характер индукционных искажений зависит от размеров структур. Поэтому различают локальный и региональный индукционный эффекты.

Над сравнительно узкими структурами — шириной лишь в несколько раз больше мощности отложений, перекрывающих непроводящее основание, — наблюдается локальный индукционный эффект. Пример его показан на рис. 14, а. Профиль МТЗ пересекает ряд узких поднятий и прогибов непроводящего основания. На кривую ρ_T^\perp в точке зондирования A над прогибом влияет соседнее поднятие. Поэтому восходящая ветвь кривой ρ_T^\perp смещена влево от нормальной кривой. В точке B на кривую ρ_T^\perp влияет соседний прогиб, и индукционный эффект сдвигает кривую вправо. С удалением от структур (точка B) индукционный эффект быстро затухает. Формальная интерпретация кривых ρ_T^\perp , как нетрудно представить себе, нивелирует структуры.

Региональный индукционный эффект вызывается действием широких структур (ширина их в десятки раз больше мощности слоев над непроводящим основанием). Это могут быть крупные впадины с протяженными бортовыми зонами.

На рис. 14, б представлены кривые, искаженные региональным индукционным эффектом. Точки зондирования *A* и *B* находятся в бортовой зоне обширной впадины. Восходящие ветви кривых ρ_T^{\parallel} из-за индукционного действия токов, текущих во впадине, распадаются на две части, разделенные перегибом (точка *A*) и минимумом (точка *B*). Искажения отмечаются на значительном удалении от впадины, усиливаясь при приближении к ней. Формальная интерпретация кривых приводит к ложному представлению о включении слоя с малым сопротивлением в непроводящее основание (фундамент). На центральном участке впадины (точка *B*) индукционный эффект отражается лишь увеличением угла наклона восходящей ветви кривых ρ_T^{\parallel} . С понижением частоты действие индукционного эффекта ослабевает и прекращается.

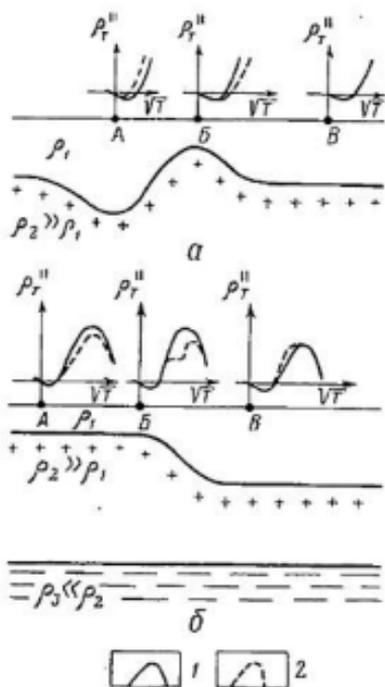


Рис. 14. Кривые ρ_T^{\parallel} , искаженные индукционными эффектами, над линейными структурами (по М. Н. Бердичевскому, В. И. Дмитриеву, И. А. Яковлеву и др.).

a — локальный индукционный эффект; *б* — региональный индукционный эффект; 1 — нормальные кривые, 2 — искаженные кривые.

Локальный индукционный эффект распознается путем сравнения кривых ρ_T^{\perp} и ρ_T^{\parallel} . Характерная особенность этого эффекта состоит в инверсии восходящих ветвей кривых над поднятиями и погружениями непроводящего основания: над поднятиями $\rho_T^{\perp} > \rho_T^{\parallel}$, над погружениями $\rho_T^{\perp} < \rho_T^{\parallel}$. Региональный индукционный эффект наиболее труден для распознавания.

При продольном течении тока могут наблюдаться и гальванические эффекты (например, эффект *S*). Их действие зависит от вытянутости и крутизны структур. Длина пологой структуры, в 5—10 раз превышающая ее ширину, достаточна для того, чтобы гальванические эффекты были мало заметны, если точки МТЗ располагаются над центральной частью структуры.

Из рассмотрения типичных искаженных кривых МТЗ над линейными структурами следует заключить, что нельзя, во избежание ошибочных выводов, интерпретировать кривые МТЗ формально — при помощи палеток для горизонтальнооднородных сред.

На основании изучения моделей линейных структур можно высказать следующее замечание о принципах интерпретации

поперечных и продольных кривых МТЗ. Если в осадочной толще нет промежуточных высокоомных горизонтов, то наиболее достоверное представление о геоэлектрическом разрезе при отсутствии краевого эффекта дают поперечные кривые ρ_T^\perp . Продольные кривые ρ_T^\parallel в этих условиях сглаживают локальные структуры, сохраняя информацию о региональном строении исследуемых слоев. Если же в осадочный чехол включается промежуточный высокоомный горизонт и при этом наблюдаются гальванические эффекты, то кривые ρ_T^\perp используются лишь для изучения толщи, залегающей над этим высокоомным горизонтом. О нижней части разреза дают представление кривые ρ_T^\parallel . При достаточно вытянутых структурах продольные кривые МТЗ в региональном плане отражают рельеф непроводящего основания (фундамента). Излишне подчеркивать, что для распознавания эффектов искажения надо иметь кривые МТЗ, полученные с установкой, оси которой ориентированы по простиранию и вкрест простирания структур. При произвольном расположении осей установки гальванические и индукционные искажения смешиваются и их распознать невозможно.

В районах с нелинейными структурами, которые заряжаются при любом течении тока, искажения кривых МТЗ всегда относятся к гальваническому типу — известные нам эффект S (он выражается слабее, чем над линейными структурами), эффект экранирования и рассматриваемые ниже эффекты, связанные с боковым обтеканием поднятий высокоомного горизонта, а также с концентрацией тока в прогибах.

Эффект обтекания вызывает смещение кривых ρ_{Txy} и ρ_{Tyx} относительно нормальной кривой ρ_T вверх или вниз в зависимости от расположения осей установки МТЗ над склоном резко выраженного локального поднятия горизонта большого сопротивления. Пусть точка исследования A находится над склоном круглого поднятия высокоомного горизонта и ось x установки МТЗ направлена в сторону вершины этого поднятия (рис. 15). Эффект бокового обтекания уменьшает составляющую E_x низкочастотного электрического поля и увеличивает составляющую E_y . Поэтому восходящие ветви кривой ρ_{Txy} смещаются вниз, а кривой ρ_{Tyx} — вверх относительно нормальной кривой ρ_T . Осреднение кривых ρ_{Txy} и ρ_{Tyx} приводит, по крайней мере, к частичной компенсации искажений: кривая $\rho_{T\text{эф}}$ близка к нормальной кривой

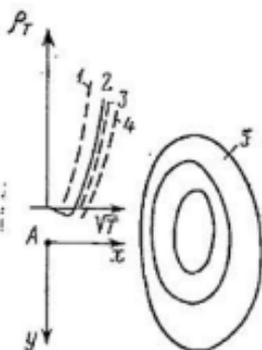


Рис. 15. Кривые МТЗ, искаженные эффектом обтекания, над нелинейной структурой (по М. Н. Бердичевскому, В. И. Дытлову, И. А. Яковлеву и др.).

Кривые: 1 — ρ_{Tyx} , 2 — ρ_T , 3 — $\rho_{T\text{эф}}$, 4 — ρ_{Txy} ; 5 — поднятие или прогиб высокоомного горизонта в изогипсах.

ρ_T . Интерпретация кривой $\rho_{T \text{эф}}$ дает почти истинную глубину до высокоомного горизонта.

Теперь представим себе (рис. 15) вместо поднятия той же формы прогиб, заполненный хорошо проводящими отложениями. Эффект концентрации тока в прогибе увеличивает составляющую E_x и уменьшает составляющую E_y . Следовательно, кривая ρ_{Txy} сместится вверх, кривая ρ_{Tyx} — вниз. Осреднение кривых ρ_{Txy} и ρ_{Tyx} сглаживает искажения и кривая $\rho_{T \text{эф}}$ близка к нормальной кривой ρ_T .

Кривые $\rho_{T \text{эф}}$ дают более достоверные результаты лишь в периферийных частях нелинейных структур. При приближении к центральным участкам структур кривые МТЗ искажаются более значительно. В частности, над сводом крупных поднятий высокоомного горизонта кривые МТЗ из-за эффекта обтекания могут иметь ложные минимумы. Поэтому построение кривых $\rho_{T \text{эф}}$ в таких случаях не приводит к повышению достоверности интерпретации.

ПРАКТИКА ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ИСТОЛКОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ МТЗ

Магнитотеллурическое зондирование в СССР применяется с 1960 г. К концу 1971 г. насчитывалось еще сравнительно небольшое количество точек исследования — около 2,2 тыс. МТЗ. Они выполнены в Европейской части Союза (Волго-Уральская и Тимано-Печорская нефтегазоносные провинции, Белоруссия, Украина, Центральные районы, Северный Прикаспий, Предкавказье и Закавказье), в Средней Азии, Казахстане, Западной и Восточной Сибири, на Сахалине. Больше всего работ по МТЗ проведено на территории Русской плиты Восточно-Европейской платформы.

Для получения кривой МТЗ до последнего времени требовалась регистрация синусоидальных (или почти синусоидальных) вариаций магнитотеллурического поля в широком диапазоне периодов. На эту запись, как уже упоминалось, приходилось затрачивать до 7 сут., а иногда до 10 сут. и более в одном пункте исследования. Разумеется, такая малая производительность не способствовала развитию модификации. Зондирования выполнялись в отдельных точках для рекогносцировочных и опорных исследований при съемках модификациями ТТ или магнитотеллурического профилирования. И только на некоторых территориях (например, в Прикаспийской впадине, Московской синеклизе, Днепровско-Донецкой впадине, Иркутском амфитеатре, на Сахалине) магнитотеллурическое зондирование проводилось с целью регионального прослеживания по площади или маршрутам рельефа высокоомного опорного горизонта (фундамента). Остановимся на некоторых практических результатах МТЗ.

Валдайский прогиб Московской синеклизы. Рассмотрим пример магнитотеллурического зондирования по небольшому маршруту

(35 км, 10 МТЗ) на юго-восточном борту Валдайского прогиба. Работы по профилю, расположенному к северо-западу от с. Максатиха к с. Никольское, выполнены Е. С. Киселевым, Ю. Н. Поповым и др. под руководством К. И. Никитенко (ВНИИ Геофизика, 1969 г.) с использованием цифровой электроразведочной станции ЦЭС-1. Обобщенный геоэлектрический разрез района исследования представлен в табл. 3.

Таблица 3

Обобщенный геоэлектрический разрез восточной части Валдайского прогиба

| Номер комплекса | Характеристика комплекса | Литологическая характеристика и возраст пород | Мощность, км | Сопротивление, Ом·м |
|-----------------|---------------------------|--|--------------|---------------------|
| I | Проводящий | Песчано-глинистые породы кайнозоя, мезозоя и верхней перми | До 0,3 | 15—20 |
| II | Высокоомный | Карбонатные отложения нижней перми и карбона | До 0,4 | 100—200 и более |
| III | Проводящий | Терригенные отложения фаменского и франского ярусов верхнего девона | 0,3—0,4 | 1—40 |
| IV | Повышенного сопротивления | Терригенно-карбонатные отложения среднего девона и ордовика | До 0,6 | До 50 |
| V | Проводящий | Терригенные отложения ордовика (нижней части) кембрия, верхнего протерозоя | До 2 и более | 1—2 |
| VI | Непроводящий | Кристаллические породы протерозоя и архея | ∞ | Сотни, тысячи |

Разрез в достаточной степени проводящий. Промежуточные высокоомные отложения с относительно небольшим поперечным сопротивлением вряд ли могут быть экранирующими. Длина линий прямоугольной установки для регистрации компонент электрического поля составляла от 250 до 500 м. Ось установки x была ориентирована преимущественно по простиранию слоев, ось y — вкрест простирания. Соответственно ориентировались и магнитометры для записи горизонтальных компонент магнитного поля. Периоды регистрируемых вариаций T

поля изменялись от 15 до 400 с, а в отдельных случаях — от 6 до 1000 с и более. Время выполнения МТЗ в одной точке не превышало 1 сут. В точках наблюдения были получены кривые $\rho_{T_{xy}}$ и $\rho_{T_{yx}}$ (рис. 16, а). Кривые $\rho_{T_{xy}}$, соответствующие поляризации электрического поля в направлении простирания пород

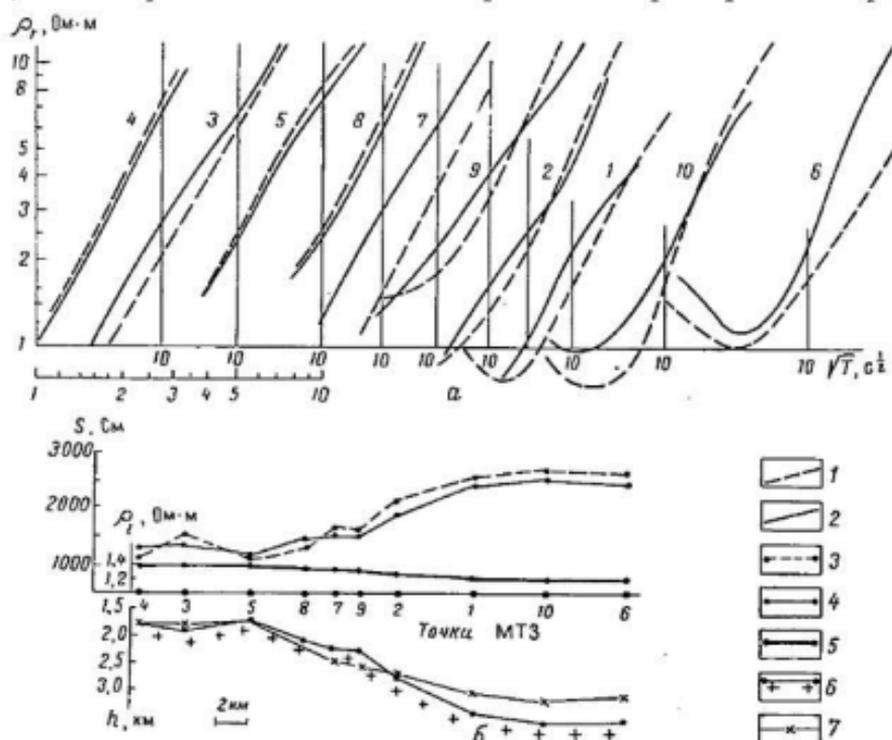


Рис. 16. Кривые МТЗ (а) и профили S (б) по маршруту на юго-восточном борту Валдайского прогиба (по Е. С. Киселеву, Ю. Н. Попову и др., 1969 г.).

Кривые: 1 — $\rho_{T_{xy}}^{\parallel}$, 2 — $\rho_{T_{xy}}^{\perp}$; профили: 3 — S^{\parallel} , 4 — S^{\perp} , 5 — ρ_T ; 6 — поверхность опорного горизонта (фундамента) по данным МТЗ; 7 — то же, по данным сейсморазведки.

(E -поляризации), обозначим через $\rho_{T_{xy}}^{\parallel}$, кривые $\rho_{T_{xy}}$, соответствующие поляризации электрического поля вкост простирания пород (H -поляризации) — через $\rho_{T_{xy}}^{\perp}$. Кривые $\rho_{T_{xy}}^{\parallel}$ и $\rho_{T_{xy}}^{\perp}$ не совпадают, что свидетельствует о горизонтальной неоднородности разреза. Судя по углу наклона (63°) к оси абсцисс восходящих ветвей кривых, они отмечают опорный горизонт очень большого сопротивления (фундамент). Минимум на кривых $\rho_{T_{xy}}^{\parallel}$ и $\rho_{T_{xy}}^{\perp}$ наблюдается лишь в точках МТЗ на северо-западном конце маршрута ($\rho_{T_{min}} \approx \approx 0,75-1,10 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $T_{min} \approx 25-40 \text{ с}$). Здесь, вероятно, можно ожидать наибольшее погружение опорного горизонта.

На рис. 16, б изображены профили S^{\parallel} и S^{\perp} и поведение поверхности фундамента по результатам бурения и сейсмораз-

ведки. Как видим, значения S^{\parallel} в погруженной части прогиба превышают значения S^{\perp} . В бортовой же зоне $S^{\parallel} < S^{\perp}$. При геологическом истолковании результатов за исходные были приняты значения S^{\perp} , которые, согласно известным теоретическим исследованиям, наиболее достоверно отражают суммарную продольную проводимость разреза при отсутствии в нем экрана. Впрочем, характер изменения S^{\parallel} и S^{\perp} по маршруту (рис. 16, б) одинаковый. Оба профиля качественно отмечают изменение глубин до фундамента. Этому способствует слабое изменение среднего продольного сопротивления ρ_l осадочной толщи вдоль маршрута. Оценка значений ρ_l выполнена приближенно. Достаточно точно ρ_l определено лишь в начале маршрута — у скв. Максатиха, где глубина залегания фундамента равна 1840 м, а S^{\perp} по кривой $\rho_{\frac{1}{T}}$ (МТЗ 4) составляет 1310 См. Отсюда $\rho_l = 1840/1310 = 1,4$ Ом·м. Значение ρ_l приближенно вычислено в точке МТЗ 10, где минимум кривой $\rho_{\frac{1}{T}}$ составляет около 1 Ом·м. Используя соотношения между $\rho_{T \min}$ и ρ_l по теоретическим кривым МТЗ и приближенными параметрами изучаемого разреза, было определено в точке 10 значение ρ_l , равным 1,3 Ом·м. Интерполяция значений ρ_l между точками МТЗ 4 и МТЗ 10 в зависимости от изменения $S^{\perp}_{\frac{1}{T}}$ позволила приближенно оценить ρ_l в каждой точке исследования.

Глубина залегания опорного горизонта определялась по формуле $h = S^{\perp} \rho_l$. Результаты, как видим, не противоречат данным сейсморазведки, дополняя их некоторыми возможными деталями строения поверхности фундамента (высолаживание юго-восточного борта прогиба (точки 7—9); более глубокое залегание фундамента в приосевой части прогиба).

В последующем материалы МТЗ по рассмотренному маршруту были дополнительно переработаны на ЭВМ. Это позволило [24] получить новые данные, указывающие на тектонические нарушения около точек 8 и 2—9.

Солигаличский грабен Московской синеклизы. Из приведенного примера исследования с помощью МТЗ на участке Валдайского прогиба видно, что изменение значений суммарной продольной проводимости S осадочного чехла, получаемых по кривым зондирования, в общем соответствует изменению глубин до фундамента: с погружением фундамента S увеличивается, с поднятием — уменьшается. Но наблюдаются случаи, когда изменение S по данным МТЗ вовсе не отражает изменение глубин до фундамента. Мы не будем пока касаться причин, которые связаны с явным изменением среднего продольного сопротивления разреза или глубин, вызванным различием мощности плохо проводящих пород в осадочной толще. Укажем случай, когда на изменение S оказывают влияние неглубоко и неспокойно залегающие высокоомные (галогеенные, карбонатные) осадки. К таким районам относится, например, осевая наиболее погруженная часть

Солигаличского грабена. Галогенно-карбонатные отложения пермского и более древнего возраста мощностью до 400—500 м значительно приподняты над грабеном фундамента (глубины залегания осадков перми уменьшаются до 150—100 м, местами породы обнажаются) и смяты в складки. Кривые МТЗ над Солигаличским грабеном неизменно отмечают резкое уменьшение S при наибольших глубинах до фундамента по данным сейсморазведки (КМПВ).

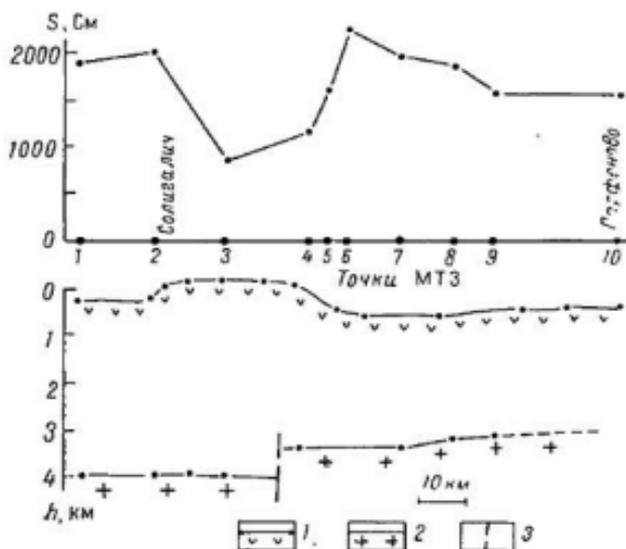


Рис. 17. Профиль S и результаты МТЗ в районе Солигаличского грабена Московской синеклизы (по А. Л. Шейнману, 1968 г.).

1 — поверхность высокоомных карбонатных пород перми по данным бурения; 2 — поверхность фундамента по данным сейсморазведки; 3 — разломы.

Значения S уменьшаются в приподнятых участках промежуточного высокоомного горизонта (рис. 17). Это наблюдается на протяжении всей части грабена, где выполнены МТЗ, причем значительного различия между кривыми ρ_T^E и ρ_T^I не отмечается.

Вместе с уменьшением суммарной продольной проводимости S возрастают значения $\rho_{T \min}$ кривых (более чем в 2—2,5 раза по сравнению с $\rho_{T \min}$ на участках вне грабена), что вызывает предположение о резком увеличении среднего продольного сопротивления ρ_l осадочной толщи в зоне резкого погружения фундамента. Представляется маловероятным такое увеличение ρ_l в ограниченной сравнительно узкой зоне. Скорее можно допустить, что решающее влияние на уменьшение продольной проводимости S и увеличение $\rho_{T \min}$ оказывает здесь и в других подобных случаях искажение электромагнитного поля, вызываемое близко

расположенной к дневной поверхности неширокой полосы распространения высокоомных осадков, смятых в складки.

Рассмотренный пример относится к случаю отчетливого проявления эффектов S и экранирования.

Карамышская впадина (Русская плита). Рассмотрим случай, когда магнитотеллурическим зондированием нельзя проследить за изменением глубин залегания фундамента. Такие неблагоприятные условия существуют в районах, где преобладающую роль в осадочном чехле играют высокоомные (карбонатные, галогенные) породы, и глубины до фундамента изменяются главным образом в зависимости от мощности этих пород.

Изменение величины S , полученное по неполным кривым МТЗ, не будет отражать здесь рельеф фундамента. В самом деле, если при прочих неизменных условиях мощность карбонатной толщи, например, с сопротивлением 500 Ом · м увеличится на 500 м, то S возрастет всего на 1 См, что, естественно, не будет отмечено кривой МТЗ.

В районе Карамышской впадины Саратовского правобережья, исследованном МТЗ под руководством Л. А. Горелова (Нижевожский разведочный геофизический трест), при сравнении качественных результатов МТЗ с данными бурения оказалось, что эти результаты не решают задачу прослеживания рельефа фундамента: график зависимости между $S_{эф}$ и глубинами залегания фундамента h указывает на отсутствие связи между этими величинами (рис. 18, а).

Из рассмотрения геоэлектрического разреза по скважинам можно заключить, что основная роль в разрезе принадлежит карбонатным осадкам каменноугольного и верхнедевонского возраста с сопротивлением в сотни ом-метров. Суммарная мощность их изменяется от 900 до 2200 м, тогда как общая мощность проводящих (до 6—12 Ом · м) терригенных отложений мезо-кайнозоя, карбона и главным образом девона колеблется в пределах 1000—1600 м. Изменение глубин до фундамента на изучаемой территории определяется преимущественно изменением суммарной мощности карбонатных пород, которое слабо влияет на

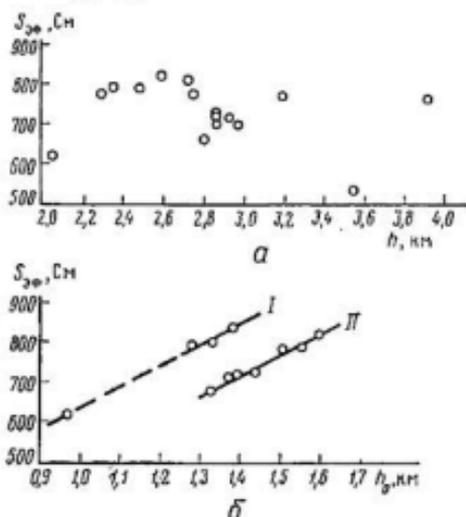


Рис. 18. Зависимость $S_{эф}$ от мощности h осадочного чехла (а) и от суммарной мощности h_0 терригенных проводящих пород осадочного чехла (б) в районе Карамышской впадины Саратовского правобережья (по Л. А. Горелову, 1966 г.).

суммарную продольную проводимость осадочной толщи. Поэтому и не наблюдается отчетливой связи между $S_{\Sigma\phi}$ и рельефом фундамента.

Значения $S_{\Sigma\phi}$ на территории исследования определяются в основном (80—90%) суммарной продольной проводимостью терригенных отложений. Естественно было предположить, что наблюдаемые изменения $S_{\Sigma\phi}$ связаны с изменениями суммарной мощности этих отложений. Предположение подтвердилось графиком зависимости между $S_{\Sigma\phi}$ и общей мощностью терригенной толщи (рис. 18, б). К прямой I, выражающей эту зависимость, относятся точки МТЗ на участке, где в разрезе отмечены сравнительно небольшие мощности высокоомных карбонатных пород (Аткарский выступ) и значения ρ_l невелики (2—3 Ом · м). Прямая II объединяет точки МТЗ на территории со значительным (на несколько сотен метров) увеличением суммарной мощности карбонатной толщи и возрастанием ρ_l до 4—5 Ом · м (Карамышская впадина и соседние участки).

Таким образом, в случаях, подобных приведенному, результаты МТЗ не дают возможности прослеживать поверхность фундамента, но позволяют определять изменение суммарной мощности проводящей толщи в разрезе и, в частности, мощности терригенного девона. В условиях Саратовского Поволжья эти сведения имеют важное значение при поисках нефтегазовых месторождений. Приходится сожалеть, что МТЗ здесь были прекращены.

Линденская впадина Вилюйской синеклизы (Сибирская платформа). Остановимся на примере применения МТЗ для регионального изучения Линденской впадины Вилюйской синеклизы [41, 43]. Работы производились Якутским территориальным геологическим управлением под непосредственным руководством И. А. Яковлева (ВНИИГеофизика). Это один из примеров изучения территории центральной части Якутии с помощью магнитотеллурического зондирования, которое было начато И. А. Яковлевым еще в 1961 г.

Площадь исследования лежит в междуречье Вилюй и Линды. Здесь было выполнено около 20 МТЗ (рис. 19) по маршруту А—А, секущему впадину почти в меридиональном направлении, и маршруту Б—Б по р. Линде. По обоим маршрутам ранее выполнялась сейсмозаписка МОВ.

Схематизированный и в большей части предполагаемый геoeлектрический разрез территории впадины представлен в табл. 4.

Особенности разреза, как видим, характеризуются толщей многолетнемерзлых пород мощностью до нескольких сотен метров и весьма мощным (до 6 км (?) проводящим комплексом III песчано-глинистых пород триаса и палеозоя, перекрытым не менее мощной толщей отложений мезозойского возраста повышенного сопротивления (комплекс II). Исследования в Вилюйской синеклизе показали, что поверхность проводящего комплекса III может прослеживаться при помощи МТЗ. Кривые ρ_T , благо-

Обобщенный геоэлектрический разрез Линденской впадины
(по П. А. Яковлеву и др.)

| Номер комплекса | Характеристика комплекса | Литологическая характеристика и возраст пород | Мощность, км | Сопротивление, Ом·м |
|-----------------|---------------------------|--|-----------------|---------------------|
| I | Высокоомный | Мерзлые породы кайнозоя и мезозоя. В летнее время перекрыты талым (действительным) проводящим слоем малой мощности | 0,3—0,6 | Сотни, тысячи |
| II | Повышенного сопротивления | Песчано-глинистые отложения мезозоя (до поверхности нижнего траса) | 1,5—6,0 | 20—50 |
| III | Проводящий | Песчано-глинистые отложения нижнего траса, верхнего и среднего палеозоя, насыщенные водами высокой минерализации | 2,0—6,0 (?) | 1—4 |
| IV | Высокоомный | Карбонатные отложения нижнего палеозоя | До 2,0 (?) | Сотни, тысячи |
| V | Проводящий | Карбонатно-терригенные отложения верхнего протерозоя (?) | До 2 и более | Единицы |
| VI | Непроводящий | Метаморфические и кристаллические породы архея | ∞ | ∞ |

даря глубокому залеганию этого комплекса и его значительной мощности, характеризуются здесь отчетливой нисходящей ветвью, позволяющей количественно оценивать глубины залегания комплекса.

В нижней части разреза лежит высокоомный карбонатный (возможно и галогенно-карбонатный) комплекс IV нижнепалеозойского возраста. Он, вероятно, служит опорным горизонтом с очень большим поперечным сопротивлением. В зонах погружения впадины можно предполагать развитие проводящих образований верхнего протерозоя (комплекс V). Тогда изолирующим основанием разреза здесь может быть архейский кристаллический фундамент при условии, если комплекс IV окажется достаточно прозрачным. Таким образом, поверхностью опорного горизонта большого сопротивления на участке исследования могут служить

поверхности комплекса IV или фундамента. Максимальная глубина залегания последнего во впадине оценивается в 10—12 км.

Авторы показали, что геоэлектрический разрез в районе исследования можно свести к эквивалентному трехслойному с мощным проводящим средним слоем и соотношением параметров: h_2/h_1 от 0,3 до 1, ρ_2/ρ_1 от 1/9 до 1/19. Теоретические кривые МТЗ при таком разрезе не отличаются от получаемых в Вилуйской синеклизе.

С помощью сейсморазведки МОВ достаточно уверенно картируется лишь поверхность, относящаяся к подошве отложений триаса; иногда при небольших глубинах залегания удается картировать границу, которая предположительно относится к поверхности карбонатных отложений нижнего палеозоя (поверхность комплекса IV?).

В задачу МТЗ входило региональное прослеживание поверхностей двух горизонтов: проводящего (комплекса III) и высокоомного (комплекса IV или фундамента). Расстояния между точками зондирования составляют в среднем около 25 км. Ориентация осей установки выбиралась по результатам гравиразведки и сейсморазведки. Ось x была направлена преимущественно по простиранию слоев, ось y — по падению. Кривые МТЗ ρ_{Txy} и ρ_{Tyx} (обозначим их условно через ρ_T^{\parallel} и ρ_T^{\perp} , так как структуры здесь нелинейны) получены при регистрации периодов вариаций поля в диапазоне от 10 до 200 с. На рис. 19 показано несколько таких кривых.

Почти все полученные кривые МТЗ имеют нисходящую ветвь с наклоном к оси абсцисс около 50° , отражающую проводящий комплекс III большой мощности. Восходящая ветвь кривых наклонена к оси абсцисс под углом более 60° и отмечает высокоомное основание разреза (комплексы IV или фундамент). Значения $\rho_{T \min}$ колеблются в больших пределах.

Кривые ρ_T^{\parallel} не совпадают с кривыми ρ_T^{\perp} , причем расположение их весьма разнообразно. Наблюдаются сдвиги кривых относительно друг друга и по оси ординат, и по оси абсцисс; в большинстве точек МТЗ $\rho_T^{\parallel} > \rho_T^{\perp}$, но есть случаи, когда $\rho_T^{\parallel} < \rho_T^{\perp}$. Все это указывает на значительную горизонтальную неоднородность разреза, вызванную, вероятно, сложным построенным многослойным разрезом впадины и влиянием толщи высокоомных многолетнемерзлых пород, залегающих на очень малой глубине. В этих условиях интерпретировались лишь графики $\rho_{T \infty} = \sqrt{\rho_T^{\parallel} \rho_T^{\perp}}$.

Изменения S_{∞} по исследованным маршрутам А—А и Б—Б (см. рис. 19) представлены на рис. 20. Здесь же нанесены и профили $\rho_{T \min}$ кривых. Как видим, значения $\rho_{T \min}$ по обоим маршрутам увеличиваются с северо-запада на юго-восток. Некоторые отклонения от общего хода отмечаются в точках 4,3 и 19,20. При этом наблюдаемые отклонения хорошо согласуются между собой по обоим маршрутам.

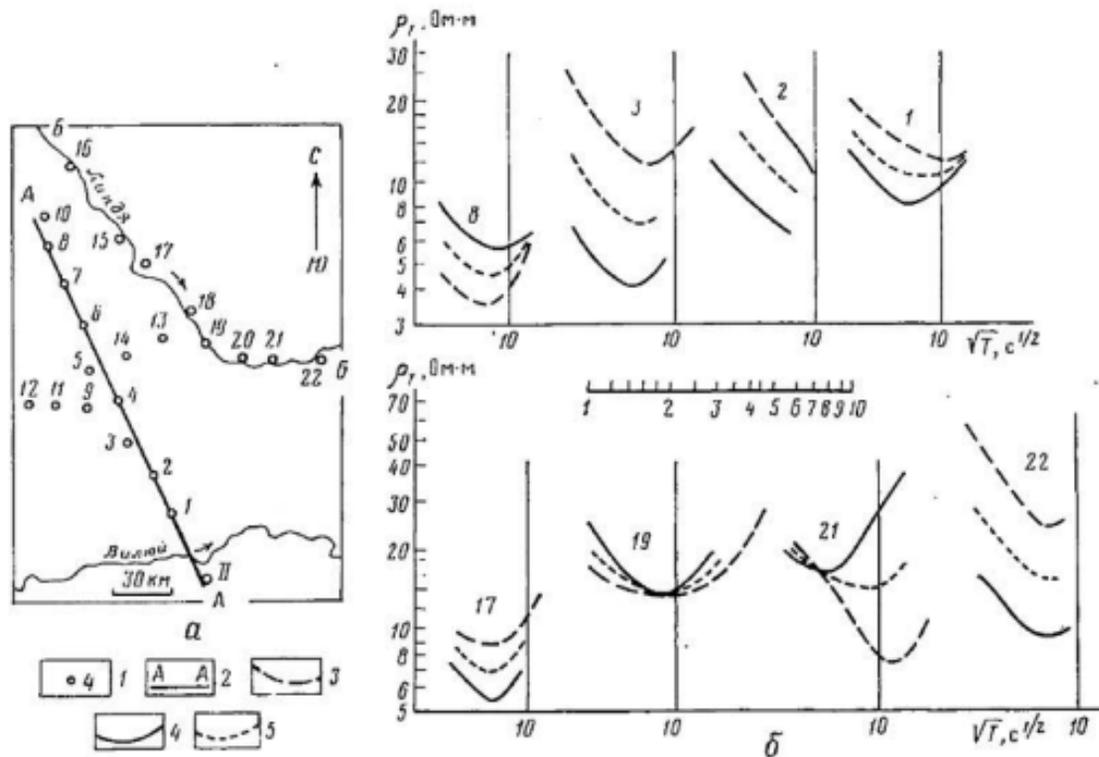


Рис. 19. Схема расположения точек (а) и кривые МТЗ (б) в районе Линденской впадины Виллойской синеклизы (по И. А. Яковлеву, 1965 г.).

1 — точки МТЗ и их номера; 2 — маршруты МТЗ; кривые: 3 — ρ_T^{\parallel} , 4 — ρ_T^{\perp} , 5 — $\rho_T^{\text{эф}}$

Значения $\rho_{T \min}$ были использованы для приближенного определения среднего продольного сопротивления ρ_l осадочных пород

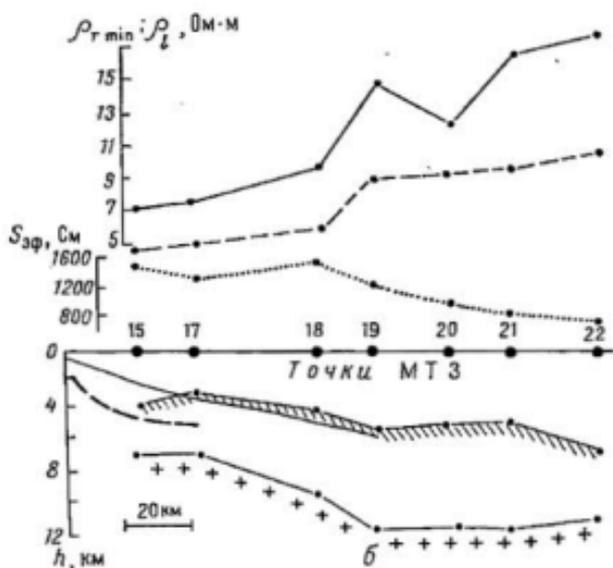
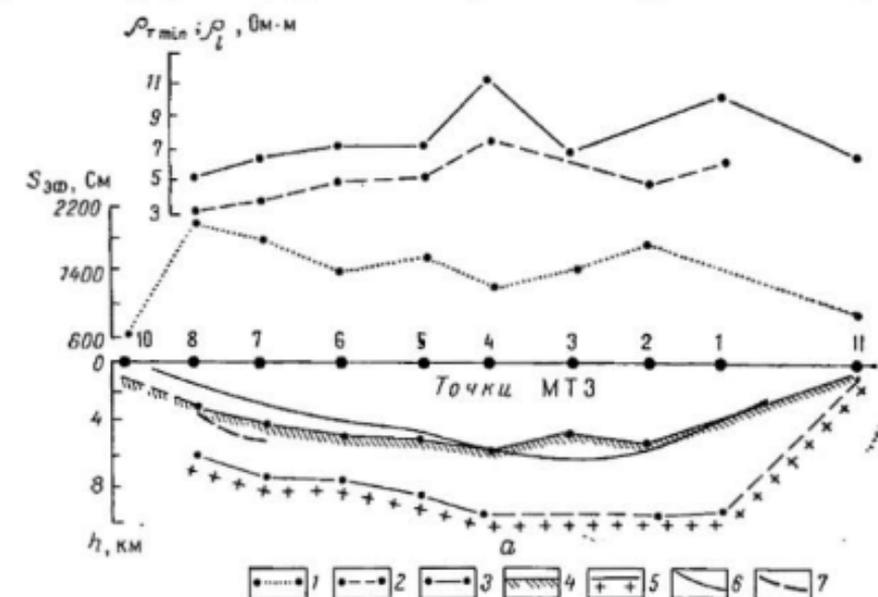


Рис. 20. Результаты МТЗ по маршрутам А—А (а) и В—В (б) (см. рис. 19) в районе Линденской впадины (по И. А. Яковлеву, 1965 г.).

Профили: 1 — $S_{3ф}$, 2 — ρ_l , 3 — $\rho_{T \min}$; поверхности: 4 — проводящего комплекса III, 5 — изолирующего основания (комплекса IV?), фундамента (?), 6 — подошвы трюса по данным МОВ, 7 — карбонатного нижнего палеозоя? по данным сейсморазведки.

в каждой точке зондирования. По известной закономерности между изменением $\rho_{T \min}$ трехслойных теоретических кривых МТЗ и значениями ρ_l отражаемых ими разрезов отношение $\rho_l / \rho_{T \min}$ было принято равным 0,67. Этот коэффициент был распространен на всю площадь исследования. Вычисленные значения ρ_l по мар-

шрутам приведены на рис. 20. Изменение ρ_1 , как видим, связано обратной зависимостью с изменением $S_{\text{эф}}$. Приближенные глубины h залегания опорного высокоомного горизонта получены по формуле $h = S_{\text{эф}}\rho_1$. Они изменяются в основном от 6 до 11 км. Предполагается лишь значительное воздымание опорного горизонта на юго-восточном окончании маршрута А—А.

Из полученных результатов следует, что на изучаемой площади изменение $S_{\text{эф}}$ не характеризует непосредственно изменение глубины до опорного горизонта. Значения $S_{\text{эф}}$ здесь определяются изменением ρ_1 , которое увеличивается с погружением опорного горизонта. Глубины h_1 поверхности проводящего комплекса III были приближенно определены по положению асимптоты нисходящей ветви кривых $\rho_{T \text{эф}}$. Эти глубины колеблются в пределах 2—6 км. Поведение поверхности проводящего и высокоомного комплексов, определяемое с вероятной погрешностью $\pm(15-20)\%$, в основном согласуется. Представление о конфигурации поверхности проводящего комплекса III не противоречит результатам сейсморазведки. Однако заметное различие в оценках глубин залегания наблюдается в точках 10 и 3. Обращает на себя внимание положение нижней сейсмической границы, которую удалось проследить в северо-западной бортовой части впадины. Предполагается, что эта граница связана с кровлей высокоомных карбонатных отложений нижнего палеозоя (комплекса IV). Если это действительно так, то опорным горизонтом, отмечаемым МТЗ, по крайней мере, в бортовой части впадины служит кристаллический фундамент. Таково приближенное истолкование небольшого объема МТЗ на территории Линденской впадины. Эти результаты служат практически интересным дополнением к данным сейсмической разведки. Продолжающиеся систематические исследования с помощью МТЗ в других районах центральной части Якутии открывают не менее интересные черты строения недостаточно изученных областей по глубокозалегającym горизонтам.

Северный Сахалин. Интересно в качестве примера остановиться на МТЗ в районах Северного Сахалина [1], которое проводится с 1964 г. К началу 1970 г. на этой территории Охинским геолого-разведочным трестом в сотрудничестве с ВНИИГеофизикой было выполнено более 120 точек МТЗ по пересекающим остров широтным маршрутам на площади свыше 10 тыс. км². Исследования производились под руководством И. М. Альцеровича и Г. А. Чернявского.

Остров Сахалин входит в систему складчатых кайнозойских сооружений Тихоокеанского пояса и представляет собой сложный и весьма своеобразный регион для электроразведки. По результатам геолого-геофизических исследований в строении острова выделяются две крупные структуры меридионального простирания — Западно-Сахалинский и Восточно-Сахалинский антиклинории. Между ними располагается Центральное-Сахалинский

синклиний, глубокие прогибы которого выполнены проводящими отложениями третичного и четвертичного возраста. В пределах антиклинорий отмечаются антиклинальные и синклинальные зоны, которые в свою очередь осложнены локальными поднятиями и погружениями. Известны многочисленные глубинные разломы различного направления, нередко с большими (до 1,5—2 км) амплитудами.

Сводовая часть Западно-Сахалинского антиклинория сложена верхнемеловыми, крылья сложены третичными породами. Здесь выделяются сложно построенные антиклинальные сооружения, одним из которых является Лангрыйский тектонический район, где отмечаются наибольшие значения силы тяжести. Южнее его располагается крупное Энгизальское поднятие.

В осевой части Восточно-Сахалинского антиклинория выходят метаморфизованные породы палеозойского возраста, крылья сложены верхнемеловыми и третичными осадками. Разрывные нарушения приводят здесь к образованию крупных блоков, глыб.

Центрально-Сахалинский синклиний протягивается почти через весь остров от заливов Сахалинского на севере до Байкальского на юге. Синклиний характеризуется минимальными значениями силы тяжести — с отдельными увеличениями, что позволяет различать в синклинии прогибы, разделенные поднятиями. В северной части отмечается наиболее крупная депрессия, называемая Байкальской, где мощность третичных отложений вместе с верхнемеловыми предположительно 9—10 км. Это погружение отделено от соседнего с запада Лангрыйского тектонического района крупным разломом почти меридионального простирания. Разлом четко прослеживается резкими градиентами силы тяжести. Южнее Байкальской депрессии располагаются крупные впадины Валская (предполагаемая мощность осадков до 8 км), Нышская (до 5—6 км) и др.

Обобщенный геоэлектрический разрез Северного Сахалина приведен в табл. 5.

В комплекс I входят свиты: нутовская (плиоцен) преимущественно песчанистая, сопротивление десятки, сотни ом-метров; окобыкайская (верхний миоцен) песчано-глинистая, сопротивление от 3—5 до 30—50 Ом · м; дагинская (верхний, средний миоцен), песчанистая с прослоями глин, сопротивление 20—130 Ом · м. При большой мощности окобыкайской свиты и малом ее сопротивлении комплекс I наблюдается как трехслойный. Дагинская свита в случае значительного ее поперечного сопротивления может оказаться промежуточным экранирующим горизонтом. На многих кривых МТЗ, полученных на малых периодах, отложения дагинской свиты отмечаются в качестве верхнего опорного горизонта повышенного сопротивления. В восточных районах острова, примыкающих к морю, отложения нутовской свиты насыщены высокоминерализованными водами; сопротивление пород здесь падает до 1—3 Ом · м. Комплекс III служит основным опорным

горизонтом. Верхней его частью могут быть вулканогенные и метаморфизованные породы кайнозойско-мезозойского возраста или метаморфические образования мезо-палеозойского возраста. В случае небольшого поперечного сопротивления высокоомных пород кайнозоя, перекрывающих проводящие отложения верхнего мела большой мощности, первые могут оказаться лишь экранирующим промежуточным горизонтом.

Таблица 5

Обобщенный геоэлектрический разрез Северного Сахалина
(по И. М. Альперовичу, Г. А. Чернявскому и др.)

| Номер комплекса | Характеристика комплекса | Литологическая характеристика и возраст пород | Мощность, км | Сопротивление, Ом·м |
|-----------------|---------------------------|--|--------------|---------------------|
| I | Повышенного сопротивления | Фациально разнообразные песчано-глинистые осадки четвертичного возраста, верхнего и среднего мiocена | До 3,5 | 20—100 |
| II | Проводящий | Глинистые или песчано-глинистые отложения от низов среднего мiocена до верхней части верхнего мела включительно | 1—4 и более | 2—20 |
| III | Высокоомный | Вулканогенные и метаморфизованные породы кайнозоя (позов) и мезозоя; метаморфизованные породы мезозоя и палеозоя | ∞ | Сотни |

Таким образом, сравнительно малая территория Северного Сахалина отличается разнообразием геологических и электрических условий. Одна из особенностей тектонического строения заключается в преимущественно меридиональном простирании крупных структур с большим количеством разрывных нарушений. Район характеризуется изменчивым сопротивлением пород, тесно связанным с их литологическим составом и степенью насыщения пластовыми водами непостоянной минерализации, различным стратиграфическим положением поверхности изолирующего основания, экранирующими промежуточными горизонтами в осадочной толще. В целом рассматриваемая территория относится к сложным для проведения электроразведочных работ районам, обусловленным горизонтальной неоднородностью разреза, которая сильно искажает кривые магнитотеллурического зондирования влиянием эффектов гальванического и, возможно, индукционного типов.

МТЗ на Северном Сахалине с 1968 г. производится полевой магнитотеллурической станцией ПМТС. Применение ПМТС

синклиорий, глубокие прогибы которого выполнены проводящими отложениями третичного и четвертичного возраста. В пределах антиклинорий отмечаются антиклинальные и синклиналильные зоны, которые в свою очередь осложнены локальными поднятиями и погружениями. Известны многочисленные глубинные разломы различного направления, нередко с большими (до 1,5—2 км) амплитудами.

Сводовая часть Западно-Сахалинского антиклинория сложена верхнемеловыми, крылья сложены третичными породами. Здесь выделяются сложно построенные антиклинальные сооружения, одним из которых является Лангрыйский тектонический район, где отмечаются наибольшие значения силы тяжести. Южнее его располагается крупное Энгизпальское поднятие.

В осевой части Восточно-Сахалинского антиклинория выходят метаморфизованные породы палеозойского возраста, крылья сложены верхнемеловыми и третичными осадками. Разрывные нарушения приводят здесь к образованию крупных блоков, глыб.

Центрально-Сахалинский синклиорий протягивается почти через весь остров от заливов Сахалинского на севере до Байкальского на юге. Синклиорий характеризуется минимальными значениями силы тяжести — с отдельными увеличениями, что позволяет различать в синклиории прогибы, разделенные поднятиями. В северной части отмечается наиболее крупная депрессия, называемая Байкальской, где мощность третичных отложений вместе с верхнемеловыми предположительно 9—10 км. Это погружение отделено от соседнего с запада Лангрыйского тектонического района крупным разломом почти меридионального простирания. Разлом четко прослеживается резкими градиентами силы тяжести. Южнее Байкальской депрессии располагаются крупные впадины Валская (предполагаемая мощность осадков до 8 км), Нышская (до 5—6 км) и др.

Обобщенный геоэлектрический разрез Северного Сахалина приведен в табл. 5.

В комплекс I входят свиты: нутовская (плиоцен) преимущественно песчанистая, сопротивление десятки, сотни ом-метров; окобыкайская (верхний миоцен) песчано-глинистая, сопротивление от 3—5 до 30—50 Ом · м; дагинская (верхний, средний миоцен), песчанистая с прослоями глин, сопротивление 20—130 Ом · м. При большой мощности окобыкайской свиты и малом ее сопротивлении комплекс I наблюдается как трехслойный. Дагинская свита в случае значительного ее поперечного сопротивления может оказаться промежуточным экранирующим горизонтом. На многих кривых МТЗ, полученных на малых периодах, отложения дагинской свиты отмечаются в качестве верхнего опорного горизонта повышенного сопротивления. В восточных районах острова, примыкающих к морю, отложения нутовской свиты насыщены высокоминерализованными водами; сопротивление пород здесь падает до 1—3 Ом · м. Комплекс III служит основным опорным

горизонтом. Верхней его частью могут быть вулканогенные и метаморфизованные породы кайнозойско-мезозойского возраста или метаморфические образования мезо-палеозойского возраста. В случае небольшого поперечного сопротивления высокоомных пород кайнозоя, перекрывающих проводящие отложения верхнего мела большой мощности, первые могут оказаться лишь экранирующим промежуточным горизонтом.

Таблица 5

Обобщенный геоэлектрический разрез Северного Сахалина
(по И. М. Альперовичу, Г. А. Чернявскому и др.)

| Номер комплекса | Характеристика комплекса | Литологическая характеристика и возраст пород | Мощность, км | Сопротивление, Ом·м |
|-----------------|---------------------------|--|--------------|---------------------|
| I | Повышенного сопротивления | Фацциально разнообразные песчано-глинистые осадки четвертичного возраста, верхнего и среднего миоцена | До 3,5 | 20—100 |
| II | Проводящий | Глинистые или песчано-глинистые отложения от низов среднего миоцена до верхней части верхнего мела включительно | 1—4 и более | 2—20 |
| III | Высокоомный | Вулканогенные и метаморфизованные породы кайнозоя (низов) и мезозоя; метаморфизованные породы мезозоя и палеозоя | ∞ | Сотни |

Таким образом, сравнительно малая территория Северного Сахалина отличается разнообразием геологических и электрических условий. Одна из особенностей тектонического строения заключается в преимущественно меридиональном простирании крупных структур с большим количеством разрывных нарушений. Район характеризуется изменчивым сопротивлением пород, тесно связанным с их литологическим составом и степенью насыщения пластовыми водами непостоянной минерализации, различным стратиграфическим положением поверхности изолирующего основания, экранирующими промежуточными горизонтами в осадочной толще. В целом рассматриваемая территория относится к сложным для проведения электроразведочных работ районам, обусловленным горизонтальной неоднородностью разреза, которая сильно искажает кривые магнитотеллурического зондирования влиянием эффектов гальванического и, возможно, индукционного типов.

МТЗ на Северном Сахалине с 1968 г. производится полевой магнитотеллурической станцией ПМТС. Применение ПМТС

в сочетании с аппаратурой ВНИИГеофизики позволяет получать полные (или как их еще называют — расширенные) кривые МТЗ, практически характеризующие весь разрез осадочной толщи. Такие кривые получены пока в ограниченном количестве.

Ось x установки при МТЗ была ориентирована в широтном направлении — вкост преобладающего простирания пород, ось

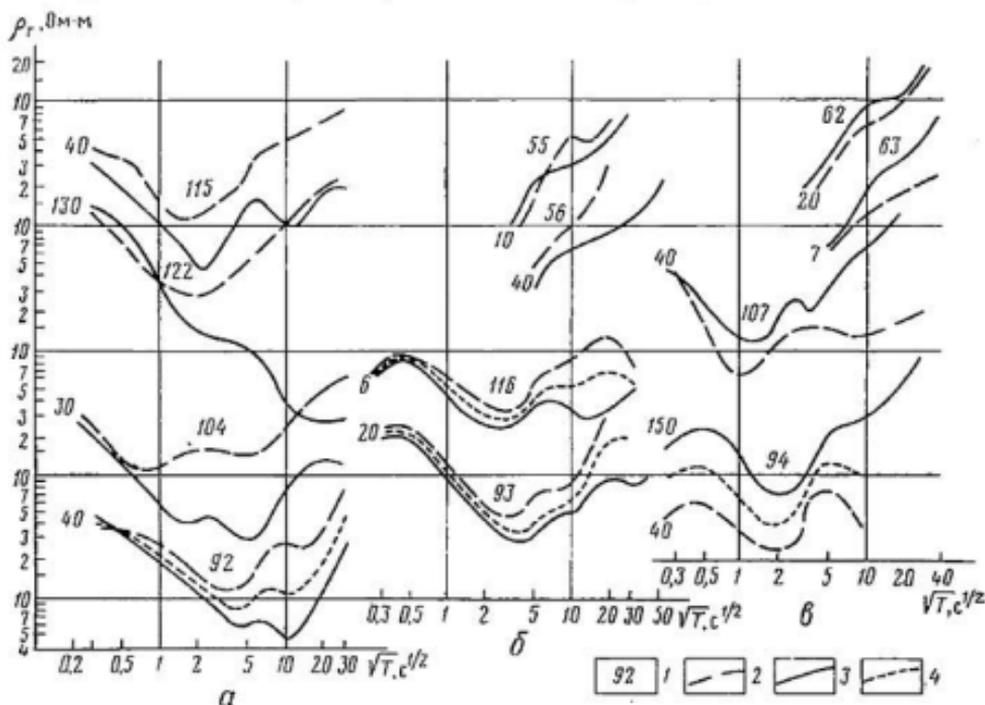


Рис. 21. Кривые МТЗ на Северном Сахалине (по И. М. Альперовичу, Г. А. Чернявскому, 1968 г.).

a — в зоне I (см. рис. 22); $б$ — в зоне II; $в$ — в зоне III. 1 — номера точек МТЗ; кривые: 2 — $\rho_{T\perp}^{\parallel}$; 3 — $\rho_{T\perp}^{\perp}$; 4 — $\rho_{T\perp}$ эф.

y — в меридиональном направлении. В соответствии с этим обозначим кривые ρ_{Txy} через $\rho_{T\perp}^{\parallel}$, кривые ρ_{Tyx} — через $\rho_{T\perp}^{\perp}$.

Форма полученных в одних и тех же точках кривых $\rho_{T\perp}^{\parallel}$ и $\rho_{T\perp}^{\perp}$ и их взаимное расположение различаются при переходе от одного пункта исследования к другому. В пределах изучаемой площади выделены три зоны, характеризующиеся различным соотношением кривых $\rho_{T\perp}^{\parallel}$ и $\rho_{T\perp}^{\perp}$ (рис. 21).

К зоне I, которая занимает западную часть территории (рис. 22), относятся точки МТЗ, где кривые $\rho_{T\perp}^{\parallel}$ располагаются значительно выше кривых $\rho_{T\perp}^{\perp}$, т. е. $\rho_{T\perp}^{\parallel} \gg \rho_{T\perp}^{\perp}$. Следовательно, суммарная продольная проводимость S^{\parallel} разреза значительно

меньше S^\perp . Разность по отношению к средней величине S достигает здесь 100—150 %.

В зоне *II*, охватывающей северную часть площади и уходящей неширокой полосой к югу, преимущественно получены кривые при соотношении $\rho_T^{\parallel} > \rho_T^{\perp}$ и, следовательно, $S^{\parallel} < S^{\perp}$ (рис. 21, б) с максимальной разностью до 60—70 % в северной части зоны.

Наиболее обширна зона *III* в восточной части Северного Сахалина. Здесь в противоположность первым двум зонам $\rho_T^{\parallel} < \rho_T^{\perp}$, т. е. $S^{\parallel} > S^{\perp}$ (рис. 21, в); разность между S^{\parallel} и S^{\perp} составляет 20—40 %, в отдельных пунктах достигает 70 % и более.

Каждая из отмеченных зон характеризуется различным геологическим строением. Зона *I* относится к Западно-Сахалинскому антиклинорию. Зона *II* охватывает Центральнo-Сахалинский синклиорий с его глубокой Байкальской депрессией на севере, которой соответствует интенсивный минимум силы тяжести. Сюда же входит Валская впадина, характеризующаяся также гравитационным минимумом. Граница между зонами *I* и *II* на севере располагается в полосе больших градиентов силы тяжести, разделяющей крупные максимум и минимум, которые соответственно отмечают приподнятый Лангрийский участок и Байкальское погружение. Эта полоса резких градиентов отражает тектоническое нарушение большой амплитуды. Зона *III* располагается преимущественно в области Восточно-Сахалинского антиклинория (Собинский, Паромайский, Дагинский и другие антиклинальные участки).

На изменение электромагнитного поля большое влияние оказывает сложная и своеобразная тектоника территории, что и влечет за собой различные взаимоотношения кривых ρ_T^{\parallel} и ρ_T^{\perp} , изменения их формы, искажения. Это влияние связывают с причинами локального и регионального характера. К первым относится эффект обтекания. Ток, встречая на своем пути отдельные поднятия высокоомных пород, обтекает их, поэтому на одних участках создается аномально пониженная напряженность поля, на других — увеличение ее, что вызывает соответственно уменьшение и возрастание ρ_T . Анализ изменения кривых ρ_T^{\parallel} и ρ_T^{\perp} в зонах *I* и *II* привел к заключению о влиянии краевого эффекта. Напомним, что удаленное от участка разведки и протяженное высокоомное образование (например, горный хребет или крутой борт прогиба, сложенные непроводящими породами) ослабляет составляющую поля, перпендикулярную к этому непроводящему образованию. Таким высокоомным препятствием вблизи Северного Сахалина является протягивающееся в длину приблизительно на 160 км воздымание эффузивных и интрузивных пород (юрского и более молодого возраста) большого сопротивления, слагающих материковое побережье Приамурья в 20—40 км к западу от Сахалина. Можно предполагать, что именно с влиянием этого препятствия связано резкое уменьшение ρ_T^{\perp} . Изменение значений отношения

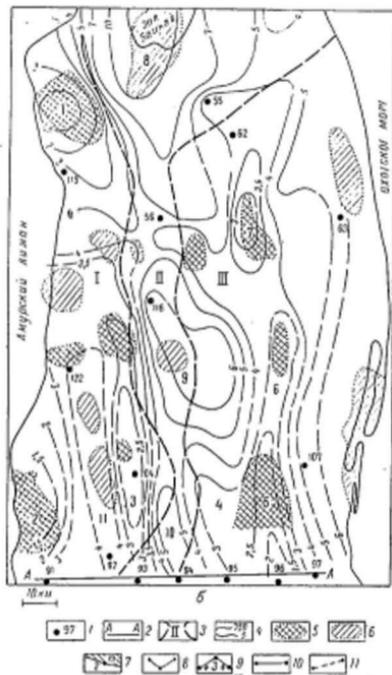
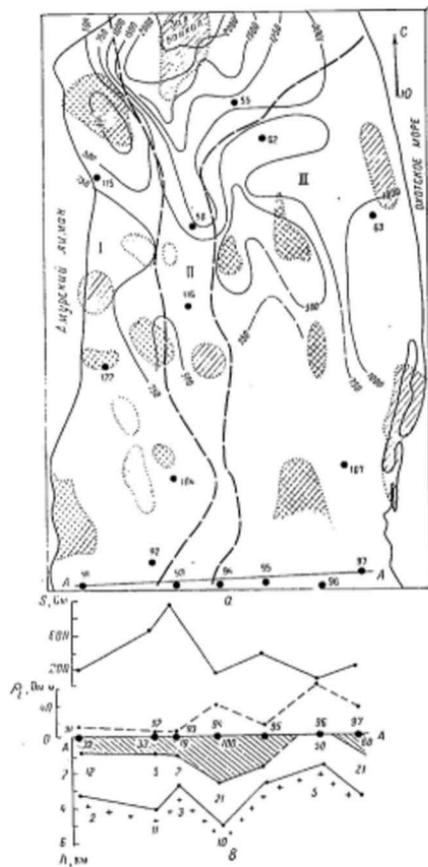


Рис. 22. Результаты МТЗ на Северной Сахалине (по И. М. Альперовичу, Г. А. Чернышскому, 1968—1970 гг.).

а — схема суммарной продольной проводимости; б — схема мощностей осадочного чехла; в — геологический разрез по линии А—А (данные последней интерпретации кривых МТЗ); 1 — точки МТЗ и их номера; 2 — линия разреза; 3 — зоны с различным соотношением кривых ρ_1 и ρ_2 ; 4 — изоляции S (в См) и мощностей (в км); 5 — мансунские слои глинести; 6 — мансунские слои глинести; 7 — слои осадочной толщи и их сопротивление в $\Omega \cdot m$; 8 — поверхность проводящего комплекса; 9 — поверхность высокоомного опорного горизонта и поперек структур; 10 — профиль S; 11 — профиль ρ_1 .

$\rho_T^{\parallel}/\rho_T^{\perp}$ зависит от различного расстояния точек МТЗ от препятствия. С удалением от нее краевой эффект ослабевает. Это отчетливо подтверждается данными МТЗ, в частности, уменьшенном $\rho_T^{\parallel}/\rho_T^{\perp}$ в зоне II. Вероятно, на изменение кривых здесь оказывают влияние также и локальные причины.

В зоне I, где аномально понижена перпендикулярная составляющая напряженности поля, кривые ρ_T^{\parallel} менее искажены и поэтому предполагается, что они с большей достоверностью отражают изменение геоэлектрического разреза. Зона II (глубокая Байкальская депрессия и ее южное продолжение, выполненные низкоомными отложениями) служит для тока проводящим каналом между Западно-Сахалинским и Восточно-Сахалинским антиклинориями. В этот канал, по-видимому, и устремляется большая часть тока. Поэтому здесь можно ожидать аномального повышения меридиональной составляющей напряженности поля, что и находит отражение в соотношении $\rho_T^{\parallel} > \rho_T^{\perp}$. Кривые ρ_T^{\perp} в зоне II менее искажены, чем кривые ρ_T^{\parallel} . В зоне III предполагается значительное ослабление меридиональной составляющей напряженности поля из-за эффекта обтекания наиболее приподнятых структур Восточно-Сахалинского антиклинория, сложенных высокоомными породами. Широтная составляющая поля, по-видимому, не подвергается заметному искажению. Этим и можно объяснить наблюдаемое в зоне III соотношение $\rho_T^{\perp} < \rho_T^{\parallel}$. Здесь, как и в зоне II, более достоверно отражающими геоэлектрический разрез предполагаются кривые ρ_T^{\perp} .

Приведенные объяснения не могут считаться исчерпывающими. Многие причины, от которых зависит распределение магнитотеллурического поля в среде со сложной горизонтальной неоднородностью, еще далеко не ясны. Встречающиеся некоторые противоречивые взаимоотношения между кривыми ρ_T^{\parallel} и ρ_T^{\perp} в одной и той же зоне не могут пока найти отчетливого объяснения. Тем не менее, несмотря на всю сложность и своеобразие геоэлектрических условий на Северном Сахалине и вызываемую ими крайнюю неоднородность кривых МТЗ, истолкование последних приводит в целом к достаточно стройным и практически ценным результатам.

Исходя из представления об особенностях распределения поля, при интерпретации материалов в зоне I использовались кривые ρ_T^{\parallel} и в зонах II и III — ρ_T^{\perp} . В некоторых пунктах, когда те и другие кривые незначительно различались между собой, рассматривались кривые ρ_T зф.

На рис. 22, а приведена карта суммарной продольной проводимости S осадочного чехла для территории, наиболее изученной МТЗ. В южной части площади выполнено недостаточное количество МТЗ для составления карты S . В региональном плане изменения S вполне подтверждают основные особенности предполагаемого строения площади. Наибольшими значениями S (1000—

2000 См) в области залива Байкал четко отмечается депрессия, ее продолжение и замыкание в южном направлении. Максимум S 8 соответствует минимуму силы тяжести, указывающему участку значительного погружения фундамента. Минимальные значения S (500—300 См) на западе территории отмечают наиболее приподнятую область (Рыбновское поднятие 1 Лангрийского тектонического района). Здесь наблюдается интенсивный максимум силы тяжести, вполне согласующийся в плане с минимумом S . На юго-востоке площади пониженными значениями S (менее 500 См) отмечается Гыргыланьинское поднятие 7, принадлежащее Восточно-Сахалинскому антиклинорию и отражаемое максимумом силы тяжести.

Карта суммарной продольной проводимости S_1 отложений, перекрывающих верхний высокоомный опорный горизонт (предположительно породы дагинской свиты верхнего и среднего миоцена), составлена по кривым МТЗ в точках, где прослеживается этот горизонт. Карта S_1 по-существу не отличается от рассмотренной карты S .

Приближенная количественная интерпретация кривых МТЗ выполнена по значениям S и $\rho_{T \min}$ с введением постоянного коэффициента 0,83 ($\rho_i = 0,83 \rho_{T \min}$). Значение коэффициента было определено по параметрическим кривым МТЗ у скважин и условно принято постоянным для всей территории исследования. Мощность осадочного чехла в километрах оценивалась по формуле $h = 0,83 S \cdot \rho_{T \min}$. Вероятная погрешность определения h в среднем около $\pm 15-20\%$. На рис. 22, б показана схема изменения мощности осадочного чехла, составленная по результатам этой приближенной интерпретации с учетом данных сейсморазведки КМПВ. Схема отражает крупные черты строения территории. Наибольшей мощностью осадков (до 10 км и более) отмечается Байкальская впадина. К югу от нее — в Центрально-Сахалинском синклинории мощность заметно уменьшается. На северо-западе четко отмечается Рыбновское поднятие (мощность осадков около 1,5 км), намечается полоса поднятий (мощность осадков 2—3 км) в пределах Восточно-Сахалинского антиклинория.

В ряде точек с использованием полных (расширенных) кривых МТЗ была выполнена приближенная послойная интерпретация с помощью теоретических палеток (рис. 22, в). Предположительно первой восходящей ветвью отмечается здесь складчатый мезо-палеозойский фундамент. На профиле выделены две границы раздела — поверхность высокоомного складчатого фундамента и поверхность проводящего комплекса II [нижний миоцен — верхний мел (?)]. В точках МТЗ определены приближенно значения сопротивления верхнего и нижнего (проводящего) комплексов. Эти значения изменяются в больших пределах, что вызывает заметное непостоянство среднего продольного сопротивления ρ_i пород осадочного чехла по профилю и, следовательно, изменение S_{Σ} . Суммарная продольная проводимость связана здесь не столько

с глубиной залегания фундамента, сколько с изменением ρ_1 . Поэтому график $S_{эф}$ не везде отражает рельеф фундамента. Например, максимальному $S_{эф}$ в точке 93 соответствует поднятие фундамента, минимальному $S_{эф}$ в точке 94 — значительное погружение. Такое несоответствие вызывается, как видим, уменьшением сопротивления пород в точке 93 (Энгизнальское поднятие 3) и резким увеличением его в точке 94 (Нышская впадина 10). Дагинское поднятие 5 в восточной части профиля хорошо прослеживается изменением $S_{эф}$; этому способствует увеличение сопротивления пород проводящей толщи в области поднятия.

Оценка значений сопротивления слоев, которое на большинстве участков Северного Сахалина качественно характеризует степень песчаности или глинистости отложений, практически интересна при нефтепоисковых работах. Значительное понижение, например, сопротивления проводящего комплекса в точках 92 и 93 можно связывать с увеличением глинистых разностей в разрезе. Полученные к настоящему времени результаты применения МТЗ на Северном Сахалине, несмотря на всю сложность геоэлектрических условий, свидетельствуют о практической ценности этой модификации прежде всего для регионального изучения территории. Широкое опробование МТЗ позволило впервые дать представление о тектонике глубокозалегающего высокоомного опорного горизонта и показать возможность расчленения залегающей над ним осадочной толщи на отдельные комплексы с приближенной сравнительной характеристикой их литологического состава.

ГЛАВА II

МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОЕ ПРОФИЛИРОВАНИЕ (МТП)

ОСНОВЫ МЕТОДИКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ МТП

Магнитотеллурическое профилирование представляет собой упрощенную модификацию МТЗ. Задача МТП сводится к определению значений суммарной продольной проводимости S отложений над высокоомным горизонтом для изучения рельефа его поверхности. Методика магнитотеллурического профилирования [4] по существу ничем не отличается от методики МТЗ. Но МТП предусматривает запись вариаций электромагнитного земного поля в меньшем диапазоне периодов — от 10 до 80 с (наиболее регулярная часть спектра КПК), — чем МТЗ, и это значительно повышает производительность (20—40 точек в месяц) модификации МТП.

Для прослеживания рельефа непроводящего опорного горизонта ($\rho_n = \infty$) необходимо, чтобы периоды регистрируемых вариаций (обрабатываются вариации лишь синусоидальной формы) относились к восходящей ветви кривых МТЗ в районе исследования (к интервалу S). В теории магнитотеллурического профилирования этот интервал называется главным интервалом (T_r) МТП. Различают еще расширенный интервал (T_p) МТП, левая граница которого смещается к точке минимума кривой МТЗ. Значения S при МТП в интервалах периодов T_r и T_p могут быть определены с небольшой (до $\pm 10\%$) погрешностью. Проводя аналогию с кривыми ВЭЗ и профилированием при помощи постоянного тока, вспомним, что разносы установки при профилировании в случае $\rho_n = \infty$ для отчетливого прослеживания рельефа этого высокоомного опорного горизонта выбирают с таким расчетом, чтобы они относились к конечной восходящей ветви кривых ВЭЗ.

При МТП, таким образом, необходимо выполнить несколько опорных точек МТЗ на различных участках площади исследования. Это покажет, какие из периодов колебаний поля лежат

в интервале T_r (или T_p , если кривые МТЗ имеют хорошо выраженный минимум). В пределах главного интервала МТП величина импеданса $|Z|$ почти не зависит от периода вариаций, поэтому при обработке осциллограмм можно ограничиться рассмотрением лишь нескольких периодов или даже одного периода T колебаний, относящегося к главному интервалу.

Формулы для вычисления S в МТП. Теория МТП позволяет определять границы главного и расширенного интервалов МТП в зависимости от параметров разреза и положения хорошо выраженного минимума кривых МТЗ. Значения S по результатам обработки осциллограмм вычисляют по формулам

$$S = 796 \left(\frac{1}{|Z|} - \sqrt{T/10\rho_n} \right), \quad (1)$$

$$S = 796 \left(\frac{1 + 0,45 \frac{T_{\min}}{T}}{|Z|} - \sqrt{T/10\rho_n} \right). \quad (2)$$

Величина $\sqrt{1/10} \rho_n$ называется поправкой на конечное значение ρ_n . Если $\rho_n = \infty$, поправка эта равна нулю. Величина $0,45 T_{\min}/T$ в формуле (2) носит название поправки на T . Формула (2), как легко видеть, переходит в (1) при достаточно большом T . Величины $|Z|$ и T определяются по данным обработки записей вариаций. При этом в зависимости от пути определения $|Z|$ различают так же, как и при МТЗ, значения $|Z_{xy}|$, $|Z_{yx}|$ и $|Z_{\phi}|$, а следовательно, и значения проводимости S_{xy} , S_{yx} и S_{ϕ} . Обычно при геологической интерпретации принимают за основу значения S_{ϕ} . Но это не исключает рассмотрения также значений S_{xy} и S_{yx} .

Для определения величин T_{\min} и ρ_n используют опорные МТЗ. По кривым МТЗ величину ρ_n оценивают при помощи двуслойной палетки с грубым приближением (погрешность может достигать $+100$ или -50%). Но T_{\min} должно быть определено с погрешностью, не превышающей $\pm 25\%$. Расчеты показывают, что соблюдение этих условий приводит к определению S по приведенным формулам МТП с погрешностью не более $\pm 10\%$.

Об особенностях применения на практике формул (1) и (2) надо сказать следующее. Формула (2) позволяет определять S при больших глубинах залегания опорного горизонта (согласно теоретическим расчетам для двуслойного разреза — в полтора раза больших, чем по формуле (1)). Но для применения формулы (2) необходимо достаточно точное определение T_{\min} , что приводит к необходимости увеличения объема опорных МТЗ в сравнении с количеством их, требуемым при использовании формулы (1) для грубого определения ρ_n . Поэтому организация работ МТП в главном интервале периодов (или частот) колебаний легче, чем в расширенном. Она имеет преимущество и в смысле надежности определения S (требуется лишь грубое определение ρ_n

при $\rho_n \neq \infty$). МТП в расширенном частотном интервале применяют в районах, где глубина залегания опорного горизонта недостаточна для МТП в главном частотном интервале. Таким образом, выбор методики МТП зависит от глубины залегания исследуемого высокоомного горизонта.

Карты и профили S . Результатом обработки данных магнитотеллурического профилирования служат карты и профили суммарной продольной проводимости S отложений над опорным горизонтом большого сопротивления. Если среднее продольное сопротивление ρ_l этих отложений остается постоянным или незначительно изменяется в пределах площади исследования, то карты или профили S , как известно, отражают рельеф поверхности опорного горизонта. При этом поднятия ее соответствует уменьшение значений S , прогибам — увеличение S .

На рис. 23, а показано изменение значений S_{xy} , вычисленных по главной формуле МТП над простой моделью — наклонным уступом непроводящего основания при H -поляризованном поле [4]. Как видим, профиль S_{xy} вкост простираения уступа достаточно хорошо отражает его в сглаженном виде. Вдали от наклонной грани уступа значения S_{xy} приближаются к истинным значениям продольной проводимости $S = h/\rho$ толщи над непроводящим основанием. Максимальное расхождение между S_{xy} и S наблюдается над наклонной гранью уступа.

В случае E -поляризованного поля уступ отмечается менее отчетливым изменением S_{yx} .

При заметном непостоянстве ρ_l истолкование карт или профилей S затрудняется. Изменение S в зависимости от ρ_l влечет за собой нивелирование поднятий или прогибов опорного горизонта, если ρ_l на поднятиях уменьшается, а в прогибах увеличивается. При противоположном изменении ρ_l (увеличение на поднятиях, уменьшение в прогибах) рельеф опорного горизонта по данным S представляется более резким, чем в действительности. Карты (профили) S , таким образом, в благоприятных условиях дают представление о рельефе исследуемого высокоомного горизонта. Они позволяют выделять структуры второго, а иногда и третьего порядков при достаточно густой сети наблюдений.

В районах с нелинейной поляризацией поля обычно основными являются схемы и профили $S_{\Sigma\phi}$; вспомогательными — схемы и профили S_{xy} , S_{yx} . Последние наиболее интересны в случаях, когда ось x или y уступает совпадает с осью однородности разреза (с направлением простираения опорного горизонта, линиями тектонических нарушений, осями протяженных структур и т. п.). В районах с устойчивой линейной поляризацией поля обычно составляют лишь схемы (или профили) S_{xy} или S_{yx} .

Для количественного истолкования наблюдений при МТП необходимо знать изменение ρ_l в районе исследования (по данным бурения или сейсморазведки совместно с опорным МТЗ и результатами МТП). Карты (профили) S , таким образом, легко могут

быть преобразованы в карты (профили) рельефа опорного горизонта.

Теоретически вычисленные значения S_{xy} и S_{yx} над однородным выклинивающимся слоем, подстилаемым изолятором, также показывают (рис. 23, б), что более близки к истинным значения S_{\perp} , которые получены при H -поляризованном поле.

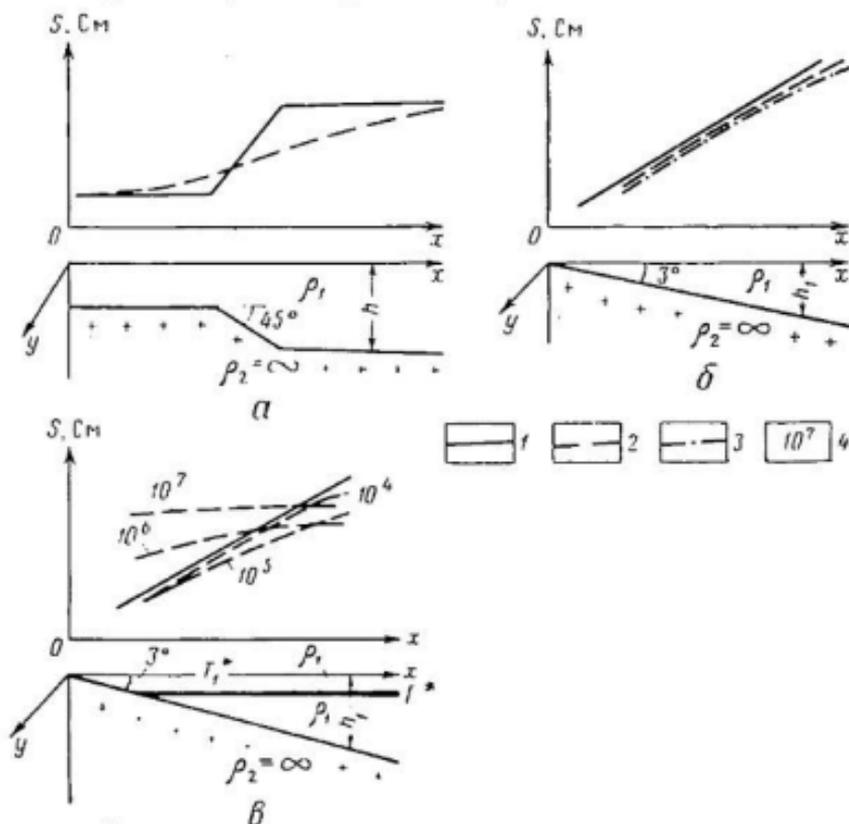


Рис. 23. Вычисленные профили S над наклонным уступом (а), однородным проводящим клином (б) и проводящим клином с промежуточным горизонтальным экраном (в) (по М. Н. Бердичевскому).

Профили: 1 — истинных значений S , 2 — S_{xy} , 3 — S_{yx} ; 4 — значения $m = T^*/T_1^*$.

В районах, проводящий разрез которых осложнен промежуточной высокоомной толщей, интерпретация карт S затруднена. Рельеф этой толщи может быть причиной вторичных изменений S , которые накладываются на изменения, отражающие рельеф изолирующего основания, и искажают результаты МТП (эффекты S , экранирования и др.). Уменьшению глубин до высокоомного горизонта отвечают максимумы S , увеличению — минимумы. Высокоомная толща может также ослабить связь между S и релье-

ефом непроводящего основания. Все это приводит к нарушению правильности истолкования результатов МТП.

На рис. 23, *в* показаны вычисленные графики S_{xy} (при H -поляризованном поле) над проводящим выклинивающимся слоем с включенным в него горизонтальным пропластком большого поперечного сопротивления T^* . Высокоомный пропласток в разрезе, как мы уже знаем по кривым МТЗ, не оказывает влияния на изменение S при E -поляризованном поле, т. е. график S_{yx} остается таким же, как и в случае однородного клина. Но при H -поляризации высокоомный пропласток экранирует нижележащие слои тем сильнее, чем больше T^* по сравнению с T_1^* . График S_{xy} (график S^\perp) выколаживается тем значительнее, чем больше поперечное сопротивление пропластка.

Те же выводы относятся и к случаю наклонного залегания высокоомного пропластка. Исследования свидетельствуют, что экранирующее влияние его усиливается с увеличением угла наклона.

О степени влияния высокоомной промежуточной толщи на результаты МТП в практике работ судят по корреляционным графикам, которые характеризуют зависимость между $S_{зф}$ (или S_{xy} , S_{yx}) и S , h (истинной суммарной продольной проводимостью и мощностью всей толщи, перекрывающей изолирующее основание), а также между теми же данными МТП и S_1 , h_1 (истинной суммарной продольной проводимостью и мощностью слоя, залегающего над экранирующим горизонтом). Корреляционные графики составляются для участков, где по совместным данным МТП, бурения или сейсморазведки известны все величины, необходимые для получения графиков. Их строят в билогарифмическом масштабе с координатными осями, пересекающимися в точке, имеющей одинаковые отметки по обеим осям.

Пусть, например, по графику зависимости $S_{зф}(S)$ наблюдается незначительный разброс точек, график наклонен под углом 45° и пересекает оси координат вблизи их начала, а график $S_{зф}(S_1)$ характеризуется большим разбросом точек. Из этого легко заключить, что промежуточный высокоомный слой в рассматриваемом случае практически не влияет на результаты МТП, и значения $S_{зф}$ определяют суммарную продольную проводимость S всей толщи, залегающей на непроводящем основании. Если же наблюдается четкая зависимость по графику $S_{зф}(S_1)$ и большой разброс точек, определяющих зависимость $S_{зф}(S)$, то это указывает на возможность прослеживания по $S_{зф}$ лишь рельефа экранирующего горизонта. График $S_{зф}(S)$, наклоненный к оси абсцисс под углом значительно меньше 45° , и с некоторым разбросом точек, свидетельствует об экранирующем влиянии промежуточной высокоомной толщи. Разброс точек вызывается влиянием неровностей рельефа этой толщи.

Подобные результаты оценки влияния промежуточного экрана можно получить по графикам зависимости $S_{зф}(h)$ и $S_{зф}(h_1)$. Но при этом изменение ρ_l на площади исследования, от которого

S тоже зависит, может быть причиной разброса точек на графиках и изменения их углов наклона.

При сильном искажении результатов МТП влиянием высокоомной промежуточной толщи наряду с картой S_{ϕ} следует рассматривать карты S_{xy} и S_{yx} на участках линейных структур, где четко выражены линии однородности разреза. Если, например, ось установки x ориентирована по падению пород, то схема S_{yx} может более отчетливо, в сравнении со схемой S_{xy} , отразить неровности рельефа промежуточного высокоомного горизонта, а влияние рельефа опорного горизонта сгладить. На схеме же S_{xy} (ось y направлена по простиранию пород), наоборот, могут сгладиться аномалии, вызванные рельефом промежуточной высокоомной толщи, и более отчетливо может отмечаться региональное строение поверхности изолирующего основания.

Схема S_{xy} в благоприятных условиях может, таким образом, характеризовать изменения S_1 , а схема S_{yx} — изменения S . При известных ρ_1 и ρ_2 эти карты могут быть преобразованы в карты рельефа по двум высокоомным горизонтам — промежуточному и опорному.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ИСТОЛКОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МТП

Исследования с помощью МТП носят региональный характер и выполняются в тех же районах, что и МТЗ, чаще всего в сочетании с последним и как дополнение к работам модификацией ТТ. Задачи по региональному прослеживанию опорного горизонта (фундамента) с использованием преимущественно МТП к настоящему времени решались, пожалуй, лишь в некоторых районах Русской плиты (Мезенская впадина, Печорская синеклиза) и на севере Западно-Сибирской плиты.

Всего по территории СССР к концу 1973 г. насчитывалось около 4 тыс. точек МТП, выполненных главным образом по маршрутам с весьма редкой сетью исследования. Так, маршруты МТП в Мезенской впадине охватывают площадь около 80 тыс. км² со средней плотностью сети 1 точка МТП на 340 км², а в Печорской синеклизе около 150 тыс. км² со средней плотностью сети 1 точка МТП на 220 км². Несколько более плотная сеть наблюдений использовалась в северных районах Западной Сибири. На этих работах в качестве примера регионального исследования с применением МТП мы и остановимся.

Северная часть Западно-Сибирской плиты. Магнитотеллурическое профилирование выполнялось (ВНИИГеофизика, Тюмень-геологоразведка, Ямалнефтегазгеофизика) в сочетании с МТЗ для регионального изучения рельефа высокоомного горизонта — фундамента доюрского или значительно более древнего возраста [9]. Схема территории работ представлена на рис. 24. Площадь исследования (свыше 60 тыс. км²) разделена по особенностям геологического строения на западную и восточную части. На ней

размещены точки МТП со средней плотностью 1 точка приблизительно на 100 км². Количество пунктов, в которых получены кривые МТЗ по материалам МТП, а также специально выполненных МТЗ за пределами площади съемки МТП, составляет около 70. Результаты всех работ были обобщены под руководством Ю. С. Копелева (Тюменьгеологоразведка, 1968 г.).

Геоэлектрический разрез на западе территории почти не отличается от разреза всей западной части Западной Сибири (табл. 6),

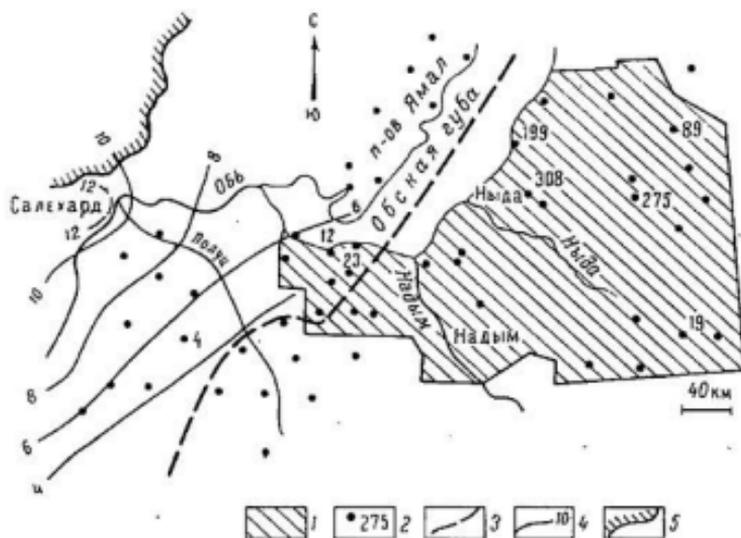


Рис. 24. Схема территории исследования модификациями МТП и МТЗ северной части Западно-Сибирской плиты (по Ю. С. Копелеву и др., 1959—1967 гг.).

1 — площадь, исследованная МТП; 2 — точки МТЗ и номера некоторых из них; 3 — граница между западным и восточным участками территории исследования; 4 — изолинии ρ_1 (в Ом·м) наиболее проводящих отложений (палеогена и мезозоя) в осадочном чехле; 5 — граница палеозойского обрамления (Урала).

но в восточной части территории, вероятно, более сложен. По результатам сейсмических исследований и электроразведки МТЗ предполагается, что здесь непосредственно над высокоомным фундаментом, возраст которого, возможно, относится к докембрию, залегает мощная (до 2—4 км) толща проводящих (3—6 Ом·м) осадков палеозоя (?), перекрытых отложениями триаса и тюменской свиты. Поперечное сопротивление этих отложений может достигать 50—100 тыс. Ом·м². Таким образом, геоэлектрический разрез в восточной части площади может быть пятислойным. Не исключается вероятность экранирующего влияния высокоомного комплекса (триаса и тюменской свиты).

При выполнении МТП записывались вариации поля с периодами от 10 до 60 с. Для получения кривых МТЗ диапазон периодов расширялся до 100 с и более. Ось x установки была ориентирована

Обобщенный геоэлектрический разрез западной части
Западной Сибири (по Ю. С. Копелеву и др.)

| Номер комплекса | Характеристика комплекса | Литологическая характеристика и возраст пород | Мощность, км | Сопротивление, Ом·м |
|-----------------|--------------------------|---|-----------------|----------------------|
| I | Высокоомный | Песчано-глинистые континентальные отложения четвертичного и третичного возраста. В приполярных районах верхняя часть комплекса охвачена многолетней мерзлотой | Десятки, сотни | От десятков до тысяч |
| II | Проводящий | Песчано-глинистые породы палеогена (на везде), мелового и верхнеюрского возраста | 0,3—0,4 и более | 2—4 |
| III | Непроводящий | Складчатые метаморфизированные образования преимущественно палеозоя. В некоторых районах к опорному горизонту также относятся развитые здесь высокоомные юрские отложения от келловейского яруса до нижней юры (так называемая тюменская свита) и триаса включительно | ∞ | Сотни, тысячи |

преимущественно в широтном направлении, ось y — в меридиональном. Остановимся прежде всего на результатах МТЗ.

Использование ЭВМ для обработки материалов позволило, кроме кривых ρ_{Txy} , ρ_{Tyx} и $\rho_{T\phi}$, построить в точках МТЗ импедансные полярные диаграммы и по главным диаметрам их получить кривые $\rho_{T \max}$ и $\rho_{T \min}$, соответствующие E - и H -поляризованному полю. Кривые $\rho_{T\phi}$ на исследуемой площади подразделяются на два, четко различающихся между собой, типа. К первому из них относятся графики, которые в интервале периодов от 10 до 100 с характеризуются одной восходящей ветвью с углом наклона около 63° к оси абсцисс (рис. 25, а). Ко второму типу отнесены кривые $\rho_{T\phi}$ с двумя восходящими асимптотическими ветвями, также наклоненными к оси абсцисс под углом около 63° (рис. 25, б).

Точки МТЗ, в которых получены кривые первого типа, располагаются в западной части территории исследования — на восточном побережье п-ва Ямал и в междуречье Оби и Полуя. Кривые второго типа распространены в восточной части, почти полностью совпадающей с площадью, исследованной МТП, — в верхнем течении р. Полуй, бассейне р. Надым и в междуречье Пура и Надыма (см. рис. 24). Граница между западным и восточным участками намечается достаточно отчетливо.

Геологическое строение западного участка в основном изучено сейсморазведкой и бурением. Высокоомный фундамент доюрского возраста, обнажаясь на Урале, погружается к восточной границе участка до глубины 2—3 км. Среднее продольное сопротивление ρ_l пород наиболее проводящей в разрезе толщи (комплекса II)

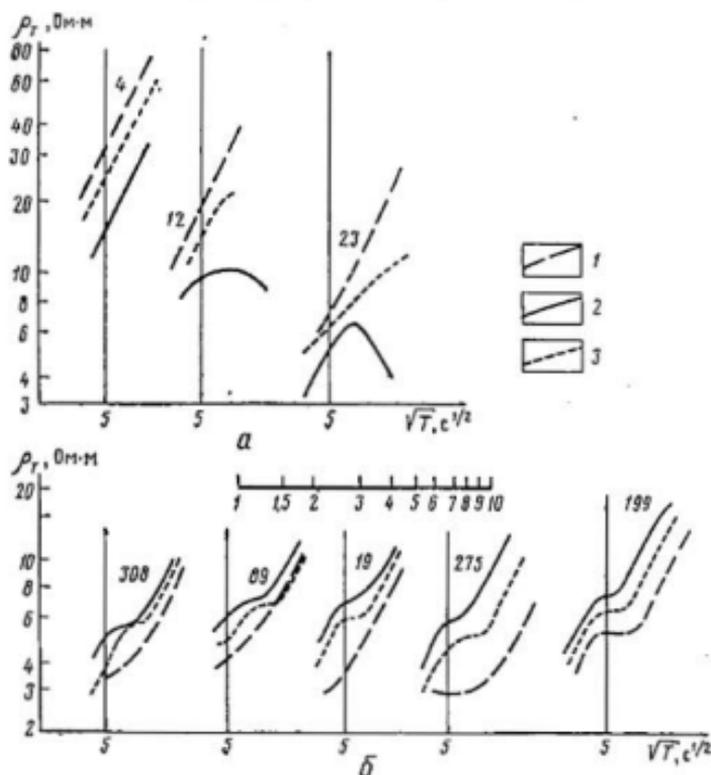


Рис. 25. Кривые МТЗ в северной части Западно-Сибирской плиты (по Ю. С. Кошелеву и др.).

1 — ρ_T^{\parallel} ; 2 — ρ_T^{\perp} ; 3 — ρ_T экв. Цифры у кривых — номера точек МТЗ.

по мере погружения фундамента уменьшается от 12—10 Ом · м (Салехард) до 4 Ом · м. Геоэлектрический разрез участка по существу близок к случаю проводящего выклинивающегося слоя с непроводящим основанием. В этом случае, согласно теоретическим расчетам, более правильно отражают разрез кривые МТЗ при H -поляризованном поле (кривые ρ_T^{\perp}). На западном участке кривыми ρ_T^{\perp} служат кривые ρ_{Txy} (или кривые $\rho_{T \min}$), так как ось x установки, имея широтное направление, ориентирована здесь вкрест простирания пород. Однако при ближайшем рассмотрении кривые ρ_T^{\perp} на западном участке оказываются менее отчетливыми,

чем кривые ρ_T^\perp , т. е. ρ_{Tyx} или кривые ρ_{Tmax} . Это видно, например по кривым в точках 12, 23 (рис. 25, а). В пределах всего участка $\rho_T^\perp < \rho_T^\parallel$ и, следовательно $S^\perp > S^\parallel$, причем отношения S^\perp/S^\parallel закономерно возрастают от 1,2 на востоке участка до 2 на западе. Эти признаки позволяют предполагать искажение кривых ρ_T^\perp

краевым эффектом.

Данные бурения в ряде точек МТЗ на западном участке позволили получить зависимость S^\perp и S^\parallel от глубины h залегания поверхности непроводящего основания (поверхности тюменской свиты или доюрского фундамента). По графикам (рис. 26) нельзя не заметить более тесную связь $S^\parallel(h)$, чем $S^\perp(h)$. Такое противоречие между результатами, ожидаемыми на основании вычислений, и практически объясняется влиянием краевого эффекта. Выходящие на дневную поверхность высокоомные породы Уральского хребта оказывают препятствием на пути широтного течения токов (по оси x). Это вызывает ослабление широтной составляющей поля ТТ и, следовательно, уменьшение ρ_T^\perp , т. е. увеличение S^\perp . Эффект будет тем сильнее, чем ближе окажутся точки МТЗ к препятствию (Уральскому хребту). Подтвер-

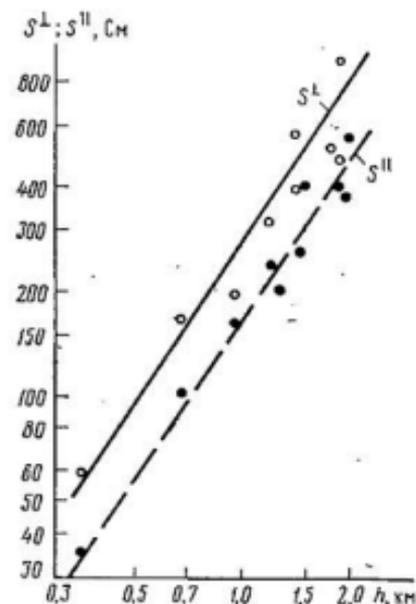


Рис. 26. Графики зависимости $S^\perp(h)$ и $S^\parallel(h)$ по данным МТЗ и бурения на западном участке территории (по Ю. С. Кошелеву и др.).

ждение этому можно усмотреть в закономерном увеличении S^\perp/S^\parallel с приближением к западной границе участка.

Кривые ρ_T^\parallel (или ρ_{Tmax}) в точках МТЗ на западном участке получены по меридиональной компоненте поля, близкой к направлению простирания пород. В этом направлении токи не встречают препятствий. Можно предполагать, что кривые ρ_T^\parallel отражают изучаемый разрез, и значения S^\parallel более достоверно, чем S^\perp , характеризуют изменение суммарной продольной проводимости осадочной толщи над высокоомным опорным горизонтом.

На восточном участке отмечается изменение взаимного расположения кривых ρ_{Txy} и ρ_{Tyx} по сравнению с расположением кривых на западном участке. Кривые ρ_{Txy} на восточном участке в большинстве случаев лежат выше кривых ρ_{Tyx} , т. е. $\rho_{Txy} > \rho_{Tyx}$. Таким образом, здесь в противоположность западному участку, кривым ρ_{Txy} преимущественно соответствуют кривые ρ_{Tmax} , а кривым ρ_{Tyx} — кривые ρ_{Tmin} .

Большая часть кривых $\rho_{T \max}$ характеризуется двумя асимптотическими ветвями, наклоненными под углом около 63° к оси абсцисс (см. рис. 25, б). Вместе с тем кривые $\rho_{T \min}$ за небольшим исключением имеют простую форму кривых с одной восходящей ветвью. У некоторых из кривых наблюдается минимум (точка 275). Часть же кривых $\rho_{T \min}$ отличается двумя асимптотическими ветвями (точка 199), как и кривые $\rho_{T \max}$. Группа точек МТЗ, где отмечаются такие кривые, располагается близ границы с западным участком. В противоположность последнему, на восточном участке кривые $\rho_{T \max}$ соответствуют направлению падения пород (кривым ρ_T^\perp), а кривые $\rho_{T \min}$ — направлению простирания (кривым ρ_T^\parallel).

Кривые ρ_T^\perp и ρ_T^\parallel на восточном участке не изменяют форму при повороте установки. Это позволяет предполагать, что вид их не связан с искажениями, а отражает существование в разрезе промежуточного высокоомного комплекса пород, под которым залегает толща осадков небольшого сопротивления, подстилаемая непроводящим основанием. Немногочисленные результаты бурения и сейсмической разведки КМПВ дают возможность полагать, что промежуточным комплексом большого поперечного сопротивления может быть анизотропная тюменская свита. При мощности ее 1,5—2,5 км и сопротивлении 20—25 Ом · м она вполне может оказаться полупрозрачным экраном. Проводящей же толщей под ним, по-видимому, служит осадочный комплекс, палеозоя, перекрывающий фундамент, возможно, докембрийского возраста. Глубина его залегания по результатам КМПВ оценивается приблизительно в 8 км.

Вполне допустимо, что высокоомный промежуточный комплекс оказывает экранирующее влияние на составляющую поля ТТ, ориентированную вкрест простирания пород (кривые $\rho_{T \max}$ или ρ_T^\perp), но остается прозрачным для составляющей поля по простиранию пород (кривые $\rho_{T \min}$ или ρ_T^\parallel). Это согласуется с теоретическим представлением о виде и взаимном расположении кривых МТЗ при *H*- и *E*-поляризованных полях в случае проводящего клина с промежуточным экраном.

Таким образом, можно полагать, что на восточном участке первой восходящей ветвью кривых ρ_T^\perp , по которой определяется суммарная продольная проводимость S_1 отложений над экранирующим комплексом, отмечается этот экран, а второй восходящей ветвью, позволяющей определять суммарную продольную проводимость S всего осадочного чехла, — опорный горизонт (фундамент). Значения S_1 изменяются на восточном участке от 600 до 1200 См, а S — от 900 до 1600 См. Разность между S и S_1 колеблется от 250 до 500 См.

Анализ кривых ρ_T^\perp и ρ_T^\parallel на восточном участке территории приводит, таким образом, к представлению о более сложном

геоэлектрическом разрезе, отличающемся в нижней своей части от разреза западного участка. Существование в осадочном чехле двух маркирующих поверхностей затрудняет исследование модификацией МТП. Мы знаем, что магнитотеллурическое профилирование предусматривает вычисление значений S при условии, чтобы регистрируемый диапазон периодов вариаций поля относился к восходящей ветви кривых МТЗ (главному или расширенному интервалу S). На исследованном участке это условие выполняется. Но из формы кривых ρ_T^+ и ρ_T^{\parallel} следует, что результаты МТП здесь могут отражать как изменение S_1 , так и изменение S . Во избежание неопределенности авторы разработали специальную методику, позволяющую при широком использовании кривых МТЗ отбирать те пределы периодов вариаций, которые в каждой точке МТП приводят к оценке по формулам МТП значений S_1 или S , или обоих этих параметров с допустимой погрешностью. Не задерживаясь на рассмотрении этой методики, обратимся непосредственно к схемам S_1 и S (рис. 27), составленным по результатам обработки данных МТП и МТЗ.

Предполагается, что схема изменения S_1 характеризует в основном рельеф поверхности тюменской свиты, входящей на западном участке в состав опорного горизонта вместе с доюрским фундаментом, а схема изменения S — рельеф древнего, возможно, докембрийского фундамента на восточном участке территории. В пределах западного участка постепенное увеличение S_1 от десятков сименс в районе Салехарда до 400—500 См на границе с восточным участком вызывается как погружением (от 0,4 до 2—2,5 км) доюрского фундамента, известным по данным бурения, так и заметным уменьшением ρ_i осадков мезо-кайнозоя (от 12 до 4 Ом · м) с увеличением их мощности. На восточном участке наблюдается чередование относительных максимумов и минимумов S_1 . К югу от поселка Шуга изолиниями 500 и 650 См очерчивается узкий минимум 1, юго-западнее которого намечается еще одна область 2 минимальных S_1 . Этим минимумам, по данным последующих сейсморазведочных работ, отвечают поднятия Шугинское и Ярудейское с амплитудой по отражающему горизонту (подошва верхнеюрских отложений?) около 1 км. Последний от Шугинского поднятия резко погружается на восток в сторону глубокого (около 1000 См) максимума S_1 10. Выделяемый к югу минимум S_1 3 небольшой амплитуды соответствует намечающемуся здесь Надымскому поднятию отражающего горизонта.

К северо-востоку от максимума 10 в полосе относительно спокойного изменения S_1 , которая названа Обской зоной минимумов, отмечаются два отдельных небольших минимума S_1 5 и 6. Минимуму 6, по данным сейсморазведки, отчетливо соответствует так называемый Ныдинский купол с отметками поверхности около 3,5 км и амплитудой до 0,6—0,7 км. Минимум 5 также связан с поднятием отражающего горизонта (Харвутинским). К югу от минимума 6 намечается заметное понижение S_1 4, которое,

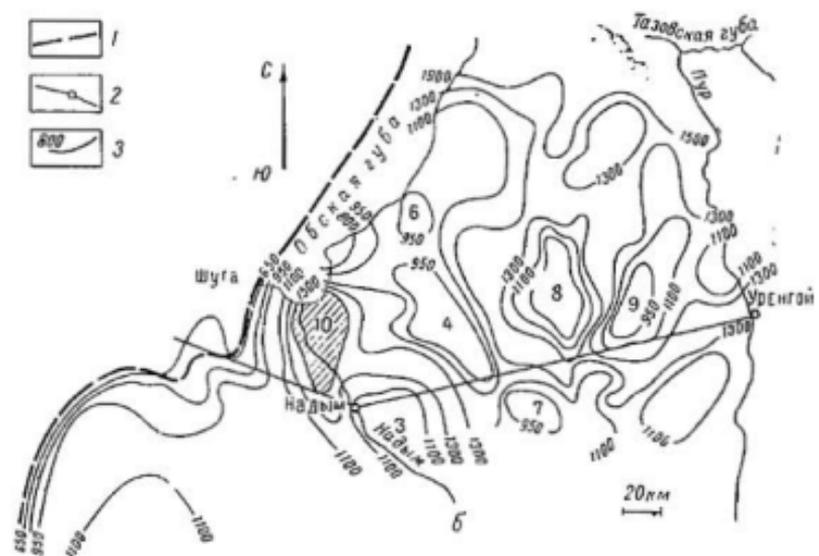
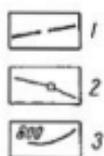
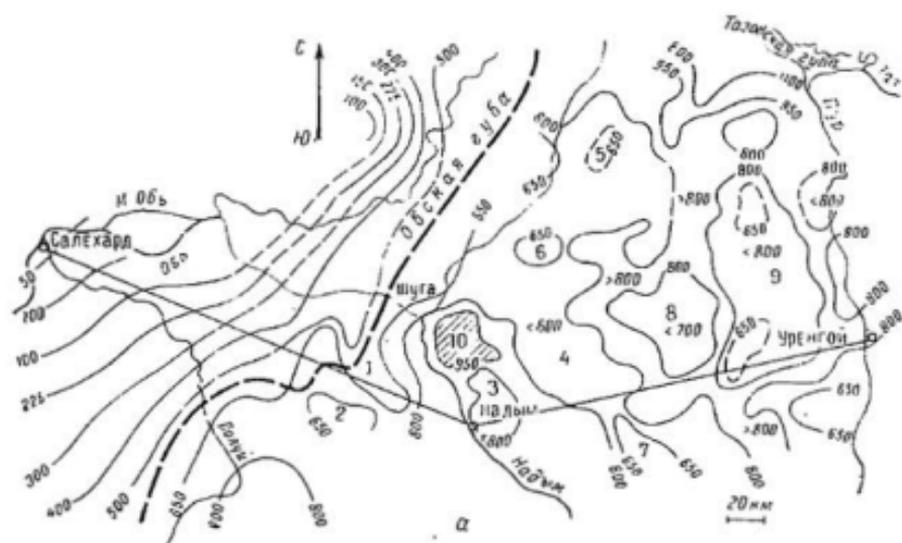


Рис. 27. Схемы суммарной продольной проводимости S_1 (а) и S (б) по данным МТП и МТЗ в северной части Западно-Сибирской плиты (по Ю. С. Копелеву, В. С. Норкину, 1967 г.).

1 — граница между западным и восточным участками территории исследования; 2 — линия разреза; 3 — изолинии S и S (в см). Цифрами на карте обозначены минимумы (1—9) и максимум (10) S и S ; 1 — Шугинский, 2 — Ярудецкий, 3 — Надымский, 4 — Пангодинский (Медвежий), 5 — Харвутинский, 6 — Ныдлинский, 7 — Пограничный, 8 — Арка-Таб-Яхтинский (Юбилейный), 9 — Уренгойский, 10 — Усть-Надымский.

однако, не выражено замкнутой изолинией. Этому понижению отчетливо соответствует так называемое Медвежье поднятие по данным сейсморазведки. Окоптуренный лишь с севера минимум S_1 7 не нашел подтверждения сейсморазведкой. К востоку от Обской зоны минимумов, отделяясь от нее областью увеличения S_1 (до 1100—1300 См) отмечается минимум S_1 8 почти изометричной формы (падение S_1 до 700 См и менее). В плане он совпадает с так называемым Юбилейным поднятием отражающего горизонта (отметки поверхности около 3,2 км, амплитуда 0,6—0,8 км). Наблюдаемый близ восточной границы территории обширный минимум 9 соответствует Уренгойскому поднятию отражающего горизонта (около 3,6—3,8 км) с амплитудой до 0,4 км.

Такие поднятия, как Шугинское, Ныдинское, Уренгойское, контролируют крупнейшие месторождения газа. Интересно подчеркнуть, что Уренгойское поднятие было отмечено электроразведкой еще в 1960—1961 гг. (М. Н. Бердичевский). Электро-разведка МТП была первым геофизическим методом, который количественно подтвердил результаты неотектонических исследований Н. Г. Чочиа, высказавшего предположение о существовании Уренгойской структуры. Недоокоптуренные области пониженных значений S_1 на восточной границе участка (по р. Пур) пока не получили подтверждения результатами сейсморазведки.

На схеме изменения S (рис. 27, б) отмечаются в основном те же аномалии, что и на схеме изменения S_1 . Некоторые из них, однако, выражены более четко (например, аномалии 4, 8). Аномалии 2 и 5 не получили отражения на карте S . На западном участке значения $S = S_1$. Поэтому схема изменения S здесь не приводится. Разность $S - S_1$ на восточном участке, которая может характеризовать мощность проводящих осадков под экраном (тюменской свитой), в области минимумов S составляет 250—300 См, в области максимумов — 400—500 См. Это может указывать на более резкие формы рельефа фундамента, чем промежуточной экранной толщи.

Чтобы в самых общих чертах количественно представить изменение глубин залегания до фундамента на восточном участке территории, был составлен схематический разрез по линии Салехард—Надым—Уренгой, пересекающей территорию с северо-запада на юго-восток. Наряду с результатами МТП—МТЗ, были использованы также данные бурения и сейсмической разведки. Среднее продольное сопротивление нижней проводящей толщи (палеозоя?) условно из общих соображений было принято равным 6 Ом · м, и мощность ее вычислялась по разности $S - S_1$ в точках исследования: $h_{пр} = (S - S_1) / 6$ м. Мощность $h_{пр}$ согласно этим вычислениям составляет 2—4 км. Мощность экранной толщи (тюменской свиты) по всему профилю была условно принята постоянной и равной 1500 м. Поверхностью экранной толщи считалась отражающая граница Б (подошва верхней юры). На рис. 28 приведен схематический геолого-геофизический

разрез. Вероятные глубины до фундамента оцениваются в 8—9 км. Рельеф его соответствует рельефу поверхности подошвы юры по данным сейсморазведки. В свою очередь изменения S_1 и S по профилю отчетливо согласуются с изменением глубин залегания этой поверхности.

Результаты региональной разведки с помощью МТП и МТЗ в перспективных северных районах Западной Сибири способство-

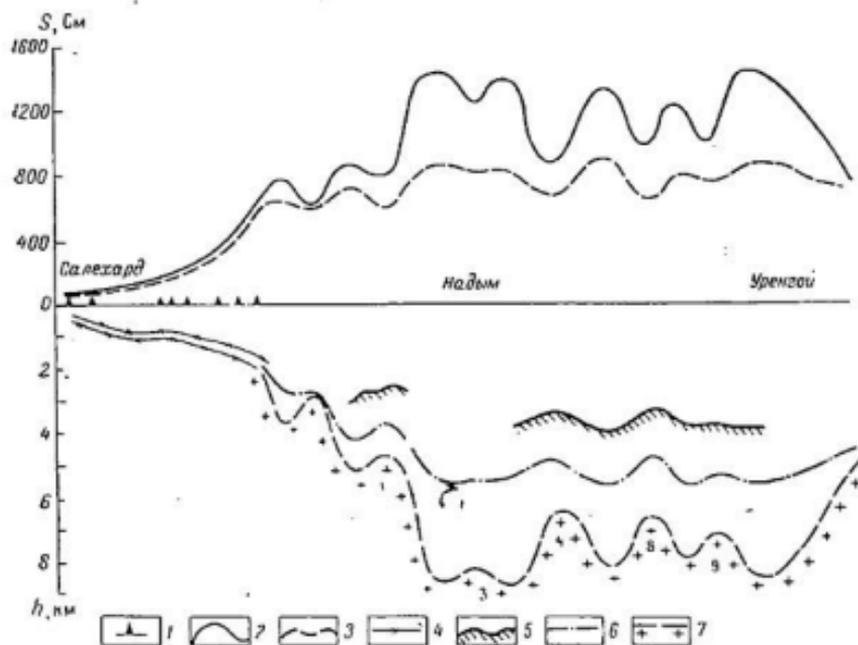


Рис. 28. Профили S и результаты МТП, МТЗ, бурения и сейсморазведки.

1 — линия разреза, скважины; 2 — профиль S ; 3 — профиль S ; 4 — стратиграфические границы по данным бурения; 5 — подошва верхней юры (?) по данным сейсморазведки; 6 — предполагаемая поверхность проводящего горизонта (палеозой?) по результатам приближенной интерпретации МТП и МТЗ; 7 — предполагаемая поверхность фундамента (докембрия) и структуры (см. рис. 27).

вали не только открытию крупных газоносных структур, но и позволили получить интересные данные о глубинном строении севера Западно-Сибирской плиты, которые заслуживают дальнейшего исследования.

Речицкий участок Припятского прогиба (Русская плита). Рассмотрим результаты небольшого объема работ МТП в одном из районов Припятского пригиба, где в разрезе развиты мощные отложения каменной соли. К настоящему времени почти вся территория прогиба занята при помощи модификации ГТ с использованием МТП на отдельных участках. Работы по магнитотеллурическому профилированию были выполнены в 1964 г. (В. М. Проценко, А. П. Пинчук) на Речицкой площади [31]. Сложный

Обобщенный геоэлектрический разрез Припятского прогиба
(по В. М. Проценко, Ю. Н. Стадинку и др.)

| Номер комплекса | Характеристика комплекса | Литологическая характеристика и возраст пород | Мощность, км | Сопротивление, Ом·м |
|-----------------|----------------------------------|---|---------------|------------------------------|
| I | Проводящий (над-солевой) | Песчано-глинистые и карбонатные отложения мезо-кайнозоя, перми, карбона и верхней части верхнего девона | Сотни, тысячи | Десятки, сотни |
| II | Высокоомный (верхний соленосный) | Каменная соль верхнедевонского возраста с прослоями терригенно-карбонатных отложений | До 2 | От 5—30 до тысяч |
| III | Проводящий (меж-солевой) | Терригенно-карбонатные отложения верхнего девона | 0,2—0,6 | 4—5 |
| IV | Высокоомный (нижний соленосный) | Каменная соль верхнедевонского возраста с прослоями терригенно-карбонатных отложений | 1 и более | От единиц до первых десятков |
| V | Проводящий (подсолевой) | Терригенно-карбонатные отложения верхнего и среднего девона | Около 0,5 | 1—5 |
| VI | Непроводящий | Кристаллические породы протерозоя и архея | ∞ | ∞ |

геоэлектрический разрез Припятского прогиба может быть сведен к шестислойному (табл. 7).

Кривые МТЗ (рис. 29, а) в пределах Речицкого участка левой восходящей ветвью отмечают, по-видимому, высокоомный соленосный комплекс, а правой, после некоторого перегиба, — фундамент. Наиболее отчетливо выражены кривые ρ_T^{\parallel} при E -поляризованном поле. Необходимо заметить следующее. Предполагается, что поле ТТ поляризовано по простиранию пород, совпадающему с простиранием прогиба. Однако в осевой его части линия простирания прогиба может не соответствовать простиранию фундамента. Не исключено, что в направлении оси прогиба фундамент может погружаться. Поэтому обозначение кривых МТЗ через ρ_T^{\parallel} и ρ_T^{\perp} здесь надо считать условным.

Результаты МТЗ показывают, что интервал периодов вариаций поля, регистрируемых при исследованиях ТТ (от 10 до 50 с), падает главным образом на левую восходящую ветвь и перегиб кривых ρ_T . Отсюда следует, что данные наблюдений ТТ (карта средней напряженности поля ТТ) в пределах Припятского прогиба приводят преимущественно к прослеживанию рельефа поверхности соленосной толщи.

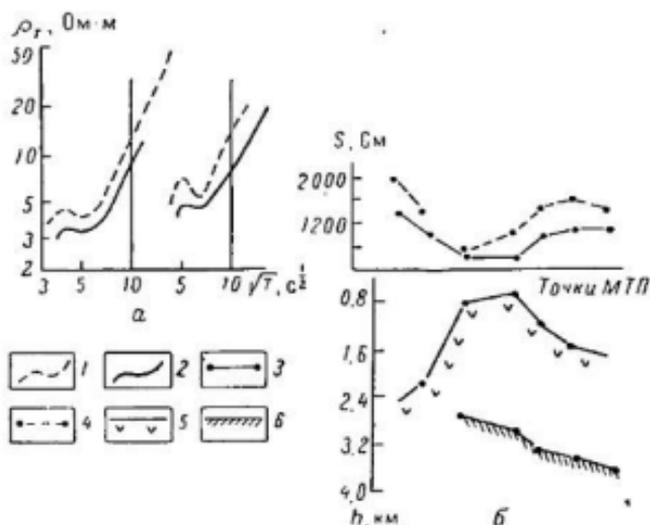


Рис. 29. Кривые МТЗ (а) и профили S по данным МТП (б) на Речицкой площади Припятского прогиба (по В. М. Проценко, А. П. Плячуку, Ю. Н. Стаднику, 1964 г.).

1 — кривые ρ_T ; 2 — кривые ρ_T ; 3 — профиль S при $T < 25$ с; 4 — профиль S при $T > 80$ с; 5 — поверхность соленосных отложений (комплекса II) по данным КМПВ и бурения; 6 — поверхность подсолевых отложений (комплекса V) по тем же данным.

Из опыта применения магнитотеллурического профилирования на Речицкой площади можно заключить о несколько более высокой разведочной возможности этой модификации. Рис. 29, б иллюстрирует результаты МТП по одному из маршрутов, пересекающему известную по данным КМПВ и бурения Речицкую структуру. Обработка профильных наблюдений при E -поляризованном поле позволила отдельно определить суммарную продольную проводимость отложений при вариациях с периодами T менее 25 с, относящимися к левой восходящей ветви кривых ρ_T , и при вариациях с периодами более 80 с, соответствующими конечной восходящей ветви. Мы видим, что график S при вариациях с $T < 25$ с отражает поведение поверхности соленосных отложений, а при вариациях с $T > 80$ с — изменение глубин залегания

поверхности подсолевой толщи и, вероятно, характеризует поведение поверхности фундамента.

Таким образом, в геоэлектрических условиях рассматриваемого района обработка материалов МТП отдельно для малых и относительно больших периодов вариаций поля дает принципиальную возможность прослеживания рельефа промежуточного высокоомного горизонта (соленосной толщи) и непроводящего основания (фундамента).

Г Л А В А III
ИССЛЕДОВАНИЯ
С ПОМОЩЬЮ ТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ТОКОВ (ТТ)

ОСНОВЫ МЕТОДИКИ НАБЛЮДЕНИЙ ТТ
И ИХ ИНТЕРПРЕТАЦИИ

Модификация ТТ [3] основана на изучении лишь электрической составляющей переменного электромагнитного поля Земли. Регистрация составляющих E_x и E_y короткопериодных колебаний от 10 до 60 с производится так же, как и при МТЗ, МТП, с использованием двух заземленных взаимно перпендикулярных измерительных линий Ox и Oy (длиной от 0,3 до 1 км в зависимости от интенсивности вариаций), но одновременно в двух отдаленных друг от друга не более чем на 30—50 км пунктах — неподвижном (базисном) и подвижном (полевом). Базисные пункты обозначаются обычно через p , полевые — через q . По значениям составляющих E_x и E_y напряженности поля легко определить в точках наблюдения величину и направление вектора полной напряженности электрического поля E_p , E_q . Базисная точка служит в качестве исходной для увязки всех наблюдений в одну систему. Перед началом работ, чтобы иметь представление о возможности исследования модификацией ТТ, необходимо выяснить, какому участку кривых МТЗ в изучаемом районе соответствуют указанные короткопериодные вариации. Здесь возможна аналогия с профилированием при помощи постоянного тока: результаты профилирования зависят от того, какому участку кривых ВЭЗ соответствуют разносы питающей линии, принятые для исследования. Чтобы проследивать, например, рельеф поверхности горизонта очень большого сопротивления, необходимо принять длину установки в пределах разносов, при которых наблюдается восходящая ветвь кривой ВЭЗ, отмечающая этот горизонт. В принципе модификацию ТТ в отличие от МТЗ можно считать тоже профилированием в узком диапазоне периодов (частот) поля ТТ.

В большинстве районов периоды записываемых вариаций поля ТТ от 10 до 60 с относятся к участку восходящей ветви кривых

МТЗ, отмечающей опорный горизонт большого сопротивления. Этот участок, как мы знаем, называется интервалом S . Результаты наблюдений ТТ только в том случае будут отражать изменение суммарной продольной проводимости отложений над непроводящим основанием, если регистрируемый диапазон периодов вариаций поля входит в интервал S . При несоблюдении этого условия результаты исследования поля ТТ теряют связь с S . Итак, будем полагать, что вариации поля ТТ в исследуемом диапазоне периодов (или частот) относятся к интервалу S .

Параметр μ . В модификации ТТ большую роль играет так называемый параметр μ , равный отношению напряженности электрического поля в полевой и базисной точках: $\mu = E_q/E_p$. Из теории модификации ТТ, теснейшим образом связанной с теорией МТЗ, следует, что параметр μ зависит от отношения величин кажущегося сопротивления ρ_T , которые в точках q и p соответствуют одному и тому же периоду вариаций, принадлежащему восходящей ветви кривых МТЗ: $\mu = \sqrt{\rho_{Tq}/\rho_{Tp}}$. Отсюда, имея в виду обратную зависимость между ρ_T и S , получают весьма важное в теории модификации ТТ соотношение: $\mu = E_q/E_p = S_p/S_q$, где S_p и S_q значения суммарной продольной проводимости толщи отложений над непроводящим основанием разреза в точках p и q . Соотношение показывает, что напряженность поля ТТ в двух пунктах наблюдения связана обратно пропорциональной зависимостью с суммарной продольной проводимостью разреза в этих пунктах.

Таким образом, параметр μ , отражая относительные изменения напряженности поля ТТ, характеризует тем самым и относительные изменения суммарной продольной проводимости отложений в точках наблюдений. Однако, согласно теории, параметр μ зависит не только от геоэлектрических условий, но и от направления поля E , изменяющегося во времени. Поэтому отношение $\mu = E_q/E_p$ в разные моменты времени может оказаться неодинаковым, и потребовалось бы много определений μ при различных направлениях поля для получения надежных средних результатов.

Параметр K . Средняя напряженность E поля ТТ. При современном развитии методики наблюдений ТТ в каждой точке определяют величину, которая называется средней (или эффективной) напряженностью поля ТТ. Она выражается через некоторый параметр K , характеризующий отношение площадей замкнутых годографов, которые описывают концы векторов напряженности поля в точках q и p синхронно за один и тот же промежуток времени. Этот параметр равен отношению величин средних (эффективных) напряженностей поля ТТ в точках q и p : $K = E_{q\text{эф}}/E_{p\text{эф}}$. Параметр K уже не зависит от направления поля в этих точках и, таким образом, вполне отражает изменение напряженности поля при переходе от базисной точки к полевой. По вычисленным значе-

ниями K в каждой точке наблюдения q определяют эффективную напряженность E в относительных единицах, принимая эффективную напряженность $E_{q\text{эф}}$ в базисной точке за 100 условных единиц: $E_{q\text{эф}} = 100 K$.

Карта E и ее интерпретация. По значениям $E_{q\text{эф}}$ составляется схема эффективной или, как принято называть, средней напряженности E поля ТТ, которая и служит основным источником геологического истолкования.

При съемке больших площадей используют несколько базисных пунктов, увязывая все наблюдения между собой так, что в окончательном результате они приводятся к уровню наблюдения в каком-либо одном опорном пункте. Карта E дает однозначное представление об относительных изменениях средней напряженности поля ТТ на участке исследования. В случае проводящего разреза, не содержащего в себе промежуточных высокоомных экранов, карта E отражает относительное изменение суммарной продольной проводимости S всей толщи отложений над опорным горизонтом большого сопротивления. При этом, вследствие обратной зависимости между E и S , значения E уменьшаются с возрастанием S и увеличиваются с уменьшением S .

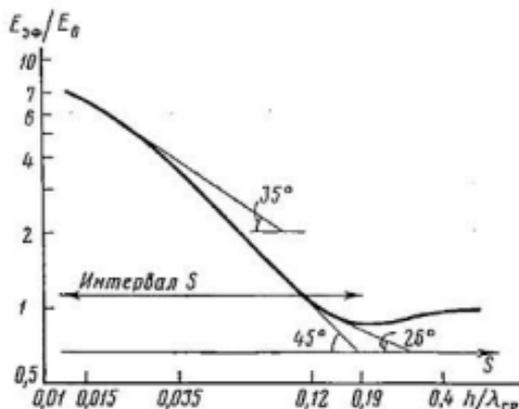


Рис. 30. Нормальный график зависимости $E_{эф}/E_0$ (S) над слоистым проводящим клином (по М. Н. Бердичевскому и К. И. Никитенко).

На рис. 30 показан нормальный график [10, 11], который характеризует связь между относительными значениями средней напряженности $E_{эф}/E_0$ и S для слоистого выклинивающегося пласта с непроводящим основанием ($\rho_n = \infty$), падающим под углом от 1 до 5° (E_0 — напряженность поля ТТ вдали от ребра клина). По оси абсцисс нанесена шкала значений $h/\lambda_{ср}$, где h — глубина до непроводящего основания, а $\lambda_{ср}$ — среднее значение длины волны в клине. График в интервале S представлен нисходящей ветвью и минимумом с абсциссой $h/\lambda_{ср} = 0,19$. Нисходящая ветвь графика наклонена к оси абсцисс в левой своей части под углом 35°, в средней — под углом 45° и вблизи минимума — под углом 26°. Этим различным наклонам соответствуют вполне определенные отрезки на оси абсцисс $h/\lambda_{ср}$: 0,015—0,035; 0,035—0,12 и 0,12—0,19. Как видим, в интервале S отмечается достаточно четкая обратная связь между E и S . Нормальный график почти не зависит от типа геоэлектрического разреза и изменения ρ_l .

Практически графики зависимости $E(S)$ в районах с проводящим разрезом, где нет промежуточных высокоомных слоев, как правило, хорошо согласуются с нормальным графиком.

В качестве примера на рис. 31 приведена отчетливо выраженная зависимость $E(S)$, которая была получена по результатам наблюдения поля ТТ на восточном склоне Воронежского выступа (Русская плита). Разрез, представленный преимущественно проводящими песчано-глинистыми отложениями палеозоя и мезокайнозоя, не содержит высокоомных толщ. Опорным горизонтом с углом падения до 3° служит кристаллический докембрийский фундамент очень большого сопротивления. Мощность осадочного чехла изменяется от 0,5 до 1,6 км, среднее продольное сопротивление ρ_l колеблется в пределах 1,5—8 Ом·м, а суммарная продольная проводимость S — от 50 до 1000 См (данные ДЭЗ).

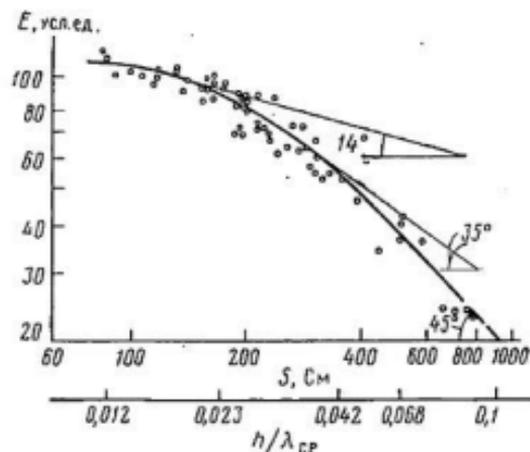


Рис. 31. График зависимости $E(S)$ по результатам наблюдений ТТ и ДЭЗ на восточном склоне Воронежского выступа (по И. Ф. Сопко и К. И. Никитенко).

График $E(S)$, построенный по точкам с небольшим разбросом, в целом соответствует нормальному графику. По оси абсцисс практического графика параллельно шкалой S нанесена шкала

значений h/λ_{cp} , где для вычисления $\lambda_{cp} = \sqrt{10\rho_l T_{cp}}$ принято среднее значение $\rho_l = 3$ Ом·м, а $T_{cp} = 25$ с; значения h вычислены по значениям суммарной продольной проводимости, которые были взяты для построения графика $E(S)$. На участке значений h/λ_{cp} от 0,04 до 0,1 угол наклона графика к оси абсцисс составляет 45° , что хорошо согласуется с нормальным графиком. Обращает на себя внимание малый угол (14°) наклона левой ветви графика при небольших S (100—150 См). Это может быть объяснено тем, что при незначительных глубинах h залегания среднее значение периода регистрируемых вариаций, принятое при обработке наблюдений ($T = 25$ с), относится уже не к восходящей части правой ветви кривой МТЗ, а к ее выполаживающемуся конечному участку. В этом случае ослабевает связь между E и S .

Можно было бы привести много примеров, показывающих соответствие практических графиков $E(S)$ нормальному графику. Оно наблюдается в некоторых областях Русской плиты, в районах Западной Сибири, Средней Азии, Причерноморья, Предкавказья, Казахстана, Дальнего Востока.

Если в слоистом выклинивающемся проводящем пласте содержится промежуточный высокоомный пропласток, то, как показывают вычисления, график $E(S)$ отличается уменьшением угла наклона к оси абсцисс по сравнению с нормальным наклоном. Выплаживание тем более значительно, чем больше поперечное сопротивление пропластка по сравнению с поперечным сопротивлением верхнего слоя.

Зависимость между средней напряженностью E поля ТТ и глубиной h залегания непроводящего основания бывает достаточно хорошо выражена, если среднее продольное сопротивление ρ_l разреза мало изменяется в пределах площади исследования. Заметное повышение ρ_l при прочих одинаковых условиях вызывает увеличение E , понижение ρ_l влечет за собой падение E . Поэтому угол наклона графиков $E(h)$ зависит от ρ_l . Если $\rho_l = \text{const}$, график $E(h)$ наклонен к оси абсцисс под углом около 45° . Расчеты показывают, что при уменьшении ρ_l по мере увеличения h (погружение непроводящего основания клина) график $E(h)$ наклонен под углом $>45^\circ$, так как интенсивность уменьшения E с увеличением h усиливается, вследствие падения ρ_l . Резкий градиент уменьшения ρ_l с увеличением h может приблизить график $E(h)$ почти к вертикальному положению.

Если ρ_l увеличивается по мере возрастания h , то в зависимости от градиента этого увеличения график $E(h)$ может характеризоваться тремя положениями (рис. 32, а): углом наклона к оси абсцисс меньшим 45° (градиент увеличения ρ_l меньше градиента увеличения h); прямой, параллельной оси абсцисс (градиенты увеличения ρ_l и h одинаковы); обратным углом наклона к оси абсцисс, т. е. отмечать увеличение E с увеличением h (градиент увеличения ρ_l больше градиента увеличения h). Практический пример на рис. 32, б отчетливо иллюстрирует изменение E

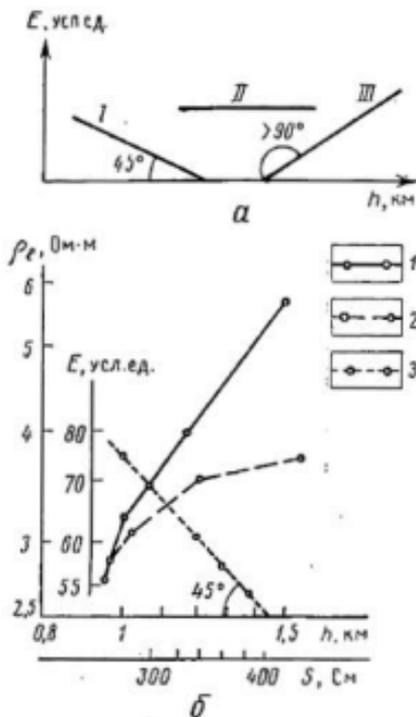


Рис. 32. Графики зависимости $E(h)$ при различной интенсивности увеличения ρ_l с возрастанием h (а) и практические графики зависимости $\rho_l(h)$, $E(h)$ и $E(S)$ по наблюдениям ТТ у скважин в районе Токмовского свода Русской плиты (б) (по В. С. Пелешицкину и др.).

I — ρ_l увеличивается менее интенсивно, чем h ; II — интенсивность увеличения ρ_l и h одинакова; III — ρ_l увеличивается более интенсивно, чем h . Графики: 1 — $\rho_l(h)$, 2 — $E(h)$, 3 — $E(S)$.

в зависимости от увеличения ρ_l . Графики $\rho_l(h)$ и $E(h)$ составлены по наблюдениям близ скважин на Токмовском выступе и его восточном склоне (Русская плита). Мощность проводящего осадочного чехла, подстилаемого кристаллическим фундаментом докембрия, изменяется здесь от 0,9 до 1,5 км, сопротивление ρ_l , согласно исследованиям в скважинах, увеличивается с погружением фундамента почти вдвое. Наряду с увеличением ρ_l увеличивается

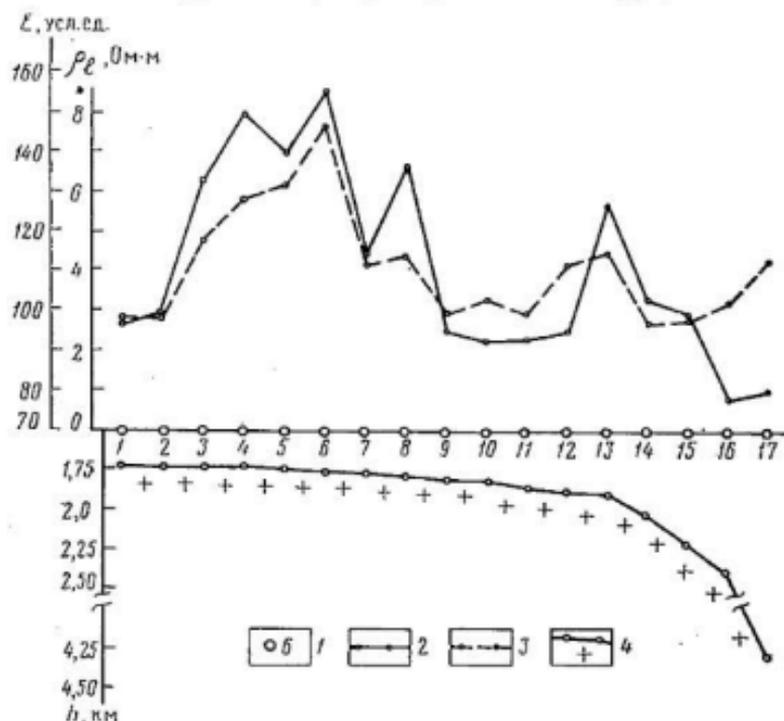


Рис. 33. Профили E и ρ_l по результатам наблюдений ТТ и исследований в скважинах.

1 — скважины, расположенные в порядке увеличения глубины до фундамента; 2 — профиль E ; 3 — профиль ρ_l ; 4 — поверхность фундамента.

и средняя напряженность поля ТТ. По существу это неблагоприятный случай для применения модификации ТТ: аномалии поля ТТ вызываются не изменением глубины до опорного горизонта, а значительным повышением среднего продольного сопротивления пород с глубиной. График $E(S)$ для рассматриваемого участка свидетельствует о нормальной связи между E и S .

Отчетливое предствление о влиянии среднего продольного сопротивления ρ_l разреза на изменение напряженности E поля ТТ дает рис. 33. Глубины h до фундамента определены по 17 скважинам в районах Удмуртской АССР и на примыкающих площадях; против каждой скважины отмечены значения средней напряженности E поля ТТ и значения ρ_l . Последние определены по резуль-

татам зондирования становлением магнитного поля у скважин ($\rho_l = h/S$, где S — значения суммарной продольной проводимости осадочного чехла по кривым зондирования).

Профили E и ρ_l свидетельствуют о тесной связи между изменениями этих величин. Профиль E отражает колебания значений ρ_l и не прослеживает слабо погружающуюся поверхность фундамента. Лишь в конце профиля падению фундамента на 0,5 км соответствует заметное уменьшение E , что связано также и с уменьшением ρ_l . Однако при переходе от скв. 16 к скв. 17 резкое погружение фундамента (почти на 2 км) отмечается некоторым увеличением E . Это вызывается возрастанием ρ_l с погружением фундамента.

Пример указывает на необходимость изучения ρ_l в районе наблюдений ТТ, чтобы не допускать грубых ошибок при истолковании результатов.

На территориях с проводящим разрезом без включения в него промежуточных высокоомных толщ и в случае достаточного постоянства разреза, как правило, наблюдается нормальная (или близкая к ней) связь между E и h . К таким районам относятся, например, Западная Сибирь, некоторые области Русской плиты и др.

Рисунок 34 иллюстрирует связь между изменением E и рельефом фундамента в Восточной части Валдайского прогиба. Этот район по своим геоэлектрическим условиям относится к одному из наиболее благоприятных для исследования модификацией ТТ.

Нормальные связи $E(S)$ и $E(h)$ нарушаются при включении в разрез высокоомного экрана. Практически в разрезах с промежуточной высокоомной толщиной различают значения суммарной продольной проводимости S и S_1 , где S относится ко всему разрезу осадочного чехла, а S_1 — к части его, лежащей над экраном. В зависимости от геоэлектрических свойств последнего, условий его залегания, степени расчлененности рельефа связь между E и S может оказаться нарушенной из-за эффектов, искажающих кривые МТЗ (см. гл. I). Условно можно принять, что по своим

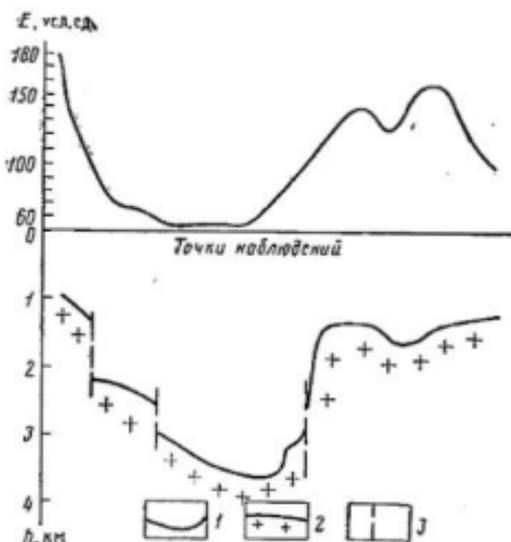


Рис. 34. Профиль E в восточной части Валдайского прогиба Московской синеклизы (по А. Л. Шейнману, 1970 г.).

1 — профиль E ; 2 — поверхность фундамента; 3 — разломы.

экранирующим свойствам промежуточная высокоомная толща может быть прозрачной, полупрозрачной и непрозрачной.

Признак прозрачности толщи — тесная связь $E(S)$ и отсутствие связи $E(S_1)$. Если толща полупрозрачна (частично экранирует влияние нижележащих осадков), то наблюдается разброс точек графика зависимости $E(S)$ и отклонение его угла наклона к оси абсцисс от 45° в сторону уменьшения. Отмечается некоторая связь $E(S_1)$ при искажении графика влиянием рельефа непроводящего основания. Полупрозрачность промежуточной высокоомной толщи, когда бывает трудно различать источники различных влияний на графики зависимости $E(S)$ и $E(S_1)$, — наиболее сложный случай для геологического истолкования.

Непрозрачность промежуточной толщи вызывает практически полное экранирование нижележащих горизонтов и отсутствие связи между E и S . Отмечается тесная связь между E и S_1 .

Пример прозрачности промежуточной высокоомной толщи можно привести из практики исследований на Русской плите в районе северо-восточного борта Пачелмского прогиба (рис. 35, а). Здесь в комплекс пород осадочного чехла мощностью 2,0—2,5 км включается промежуточная толща плотных карбонатных отложений каменноугольного и верхнедевонского возраста, поперечное сопротивление которой в сотни раз превышает поперечное сопротивление толщи вышележащих пород. Среднее продольное сопротивление ρ_l осадочного чехла около 2,5 Ом·м. Значение S изменяется в пределах $600 \div 1000$ См (по данным зондирования становлением поля). В интервале $h/\lambda_{ср}$ от 0,07 до 0,1 график соответствует нормальному. Это позволяет считать высокоомную толщу прозрачной.

О прозрачности экрана можно судить по графикам, изображенным на рис. 35, б, в. Графики по-разному отмечают отсутствие связи между E и суммарной продольной проводимостью S_1 толщи, перекрывающей экраны. Мощность экранов, которые здесь оказываются прозрачными, в обоих случаях не более 100 м. Сложены они галогенно-карбонатными осадками нижнепермского возраста и залегают на глубинах не более 100 м (Татарский выступ) и нескольких сотен метров (Ижма-Печорская впадина) при погружении фундамента до 2—3 км. Графики $E(S)$ здесь близки к нормальным. Опорным горизонтом в обоих случаях служит фундамент.

Пример выражения полупрозрачности промежуточной высокоомной толщи можно привести в виде графиков $E(S)$, полученных в области перехода склона Татарского свода в Верхнекамскую впадину (Удмуртская АССР). Глубины залегания кристаллического фундамента здесь 1,8—3,7 км. Мощность экранирующей толщи (галогенно-карбонатных пород нижнепермского и каменноугольного возраста с сопротивлением несколько тысяч ом-метров) изменяется от 160 до 500 м, глубина ее залегания 0,5—0,7 км. Нижняя часть разреза сложена карбонатными и песчано-глини-

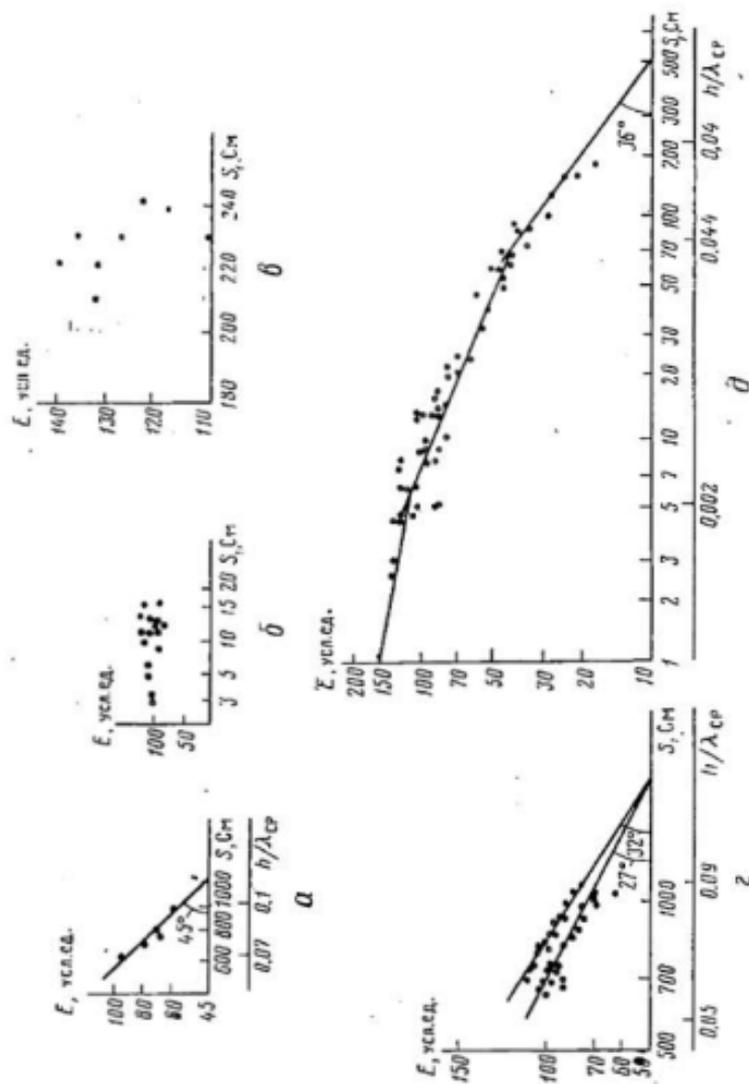


Рис. 35. Графики зависимости $E(S_1)$ и $E(S_1)$ и $E(S_1)$, указывающие на прозрачность (а, б, в), полупрозрачность (г) и непрозрачность (б) экрана.

а — северо-восточный борт Пачелмского прогиба Русской плиты (по Д. С. Кубареву и др.); б — восточный склон Татарского свода (по В. С. Меламеду и др.); в — Ижма-Печорская впадина (по К. С. Морозову); г — Верхнекамская впадина (по В. А. Липкину и др.); б — южная часть Преауральского прогиба (по М. Н. Тюрину и др.).

стыми осадками карбона, девона и более древнего возраста мощностью от 1 до 2,5 км с сопротивлением, уменьшающимся с глубиной от десятков до единиц ом-метров. Среднее продольное сопротивление ρ_l изменяется от 2,8 до 3,7 Ом·м; S — от 650 до 1000 См (данные становления магнитного поля); S_1 составляет 70 См.

Графики $E(S)$ для двух участков исследуемой площади (рис. 35, з) имеют углы наклона к оси абсцисс 27 и 32° при h/λ_{cp} от 0,05 до 0,09. В пределах этих значений угол наклона нормального графика $E(S)$ составляет 45°. Значительное выполаживание рассматриваемых графиков в сравнении с нормальным можно объяснить полупрозрачностью промежуточной высокоомной толщи $E(S_1)$ на участке исследования указывают на слабую связь между E и S_1 . Поэтому за опорный горизонт при наблюдениях ТТ здесь принимается фундамент.

На практике встречается много районов, где в геоэлектрических разрезах промежуточная высокоомная толща оказывается полупрозрачной. К ним относятся, например, обширные территории в Европейской части СССР (площади Тимано-Печорской и Волго-Уральской нефтегазоносных провинций, Днепровско-Донецкой впадины, Центральных и других районов), северная часть Западной Сибири, Восточной Сибири (Иркутский амфитеатр, Вилюйская впадина), на Сахалине.

Приведем пример полной непрозрачности промежуточного экрана (рис. 35, д), относящийся к южной части Предуральяского прогиба. Промежуточная толща с весьма расчлененным рельефом поверхности залегает здесь на глубине от десятков метров до 2 км и представлена галогенными породами нижнепермского возраста мощностью предположительно 1—2 км; сопротивление ее достигает нескольких тысяч ом-метров при небольшом среднем сопротивлении перекрывающих песчано-глинистых и карбонатных отложений. Суммарная продольная проводимость S_1 по результатам ВЭЗ колеблется от единиц до 100—150 См. Фундамент предположительно залегает на глубине несколько километров. График $E(S_1)$ позволяет утверждать, что опорным горизонтом здесь служит непрозрачная толща нижней перми: правая часть графика на участке h_1/λ_{cp} от 0,014 до 0,04 наклонена к оси абсцисс под углом около 36°, что хорошо согласуется с нормальным графиком $E(S)$ в том же интервале h/λ_{cp} . Левая часть практического графика (углы наклона 8—22°) лежит за пределами вычисленного нормального графика. Возможно, что диапазон периодов регистрируемых вариаций поля ТТ на этом участке малых S_1 (и малых глубин залегания экрана) относится к выполаживающейся части правой восходящей ветви кривых МТЗ, где значительно ослабевает связь между напряженностью поля и суммарной продольной проводимостью осадков. Территории, где геоэлектрический разрез содержит промежуточную непрозрачную высокоомную толщу, кроме Предуральяского прогиба, встречаются в Прикаспии, Дне-

провско-Донецкой впадине, Иркутском амфитеатре и других районах.

Итак, карта E в благоприятных условиях отражает изменение суммарной продольной проводимости осадков, залегающих над непроводящим основанием (фундаментом), а в случае постоянного ρ_l в пределах изучаемого участка характеризует рельеф этого основания. Максимальным значениям E , как правило, соответствуют поднятия, минимальным — погружения. Однако следует заметить, что максимумы E могут быть вызваны и поднятиями проводящих пород при значительной их анизотропии.

Если на изучаемой площади выполнялись вертикальное электрическое зондирование или зондирование становлением поля, определяющие значения S всей толщи до высокоомного основания, то по графикам зависимости $E(S)$ при достаточно тесной связи между этими величинами карта E может быть преобразована в карту S [22], которую в свою очередь при известных ρ_l можно пересчитать в карту рельефа непроводящего основания (фундамента). Если же на площади съемки есть скважины, вскрывшие это основание или надежные данные сейсморазведки о глубинах h его залегания, то по графикам зависимости $E(h)$ при четком их выражении карта E может быть трансформирована в карту рельефа.

Параметр M . Полевой и абсолютный эллипсы поляризации. Иногда карту E дополняют вспомогательной картой так называемого параметра M и картой полевых эллипсов.

В теории модификации ТТ доказывается, что если годограф поля ТТ в базисной точке p представляет собой окружность радиуса R , то в полевой точке q годографом будет эллипс с большой и малой полуосями a и b . Этот эллипс называется полевым. Его полуоси вполне определенными соотношениями связаны с максимальным и минимальным значениями переменного параметра μ : $\mu_{\max} = a/R$, $\mu_{\min} = b/R$.

Величина $\mu_{\max}/\mu_{\min} = a/b$ характеризует зависимость μ от поляризации поля и называется параметром M . В случае исследования горизонтально-однородной среды полуоси a и b полевого эллипса равны между собой, и параметр $M = 1$. При горизонтальной неоднородности чем резче изменяется разрез в направлении от базисной точки к полевой, тем больше параметр M отклоняется от единицы. Отсюда следует, что параметр M можно рассматривать в качестве показателя горизонтальной неоднородности изучаемого разреза.

Форма и ориентация полевого эллипса зависят не только от геоэлектрических условий и поляризации поля ТТ в подвижном пункте наблюдения, но и от поляризации поля в базисной точке, что придает полемому эллипсу относительный характер. Поэтому строят так называемый абсолютный или истинный эллипс [13, 32], который связан с поляризацией поля ТТ в данной точке исследования независимо от базисной. Обработывая записи

вариаций с периодом 10—60 с, составляют диаграмму из набора 100—150 векторов поляризации, распределенных более или менее равномерно во всех квадрантах этой векторной диаграммы. Затем она подразделяется обычно на 24 сектора (по 15°). Для каждого из них вычисляют средний вектор как среднеарифметическое из длин всех векторов, попавших в этот сектор. Средний вектор поляризации относят к середине сектора. Соединяя концы этих векторов, получают эллипс, который называется абсолютным (или истинным) эллипсом поляризации (рис. 36).

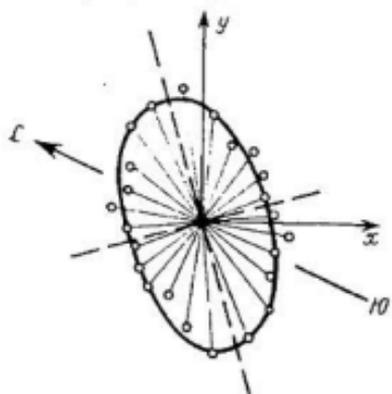


Рис. 36. Абсолютный эллипс поляризации, построенный по данным, полученным на Зейско-Бурейской впадине (по Г. Н. Ткачеву, 1963 г.).

Оси абсолютного эллипса поляризации имеют определенную ориентировку по странам света и относительно осей измерительной установки. Большая полуось эллипса характеризует максимальную напряженность (E_{\max}) поля ТТ в изучаемой точке, малая полуось — минимальную (E_{\min}) напряженность. Параметр $M = a/b$, определяемый по абсолютному эллипсу, не зависит от положения базисной точки так же, как и значения E_{\max} и E_{\min} .

Изменение параметра M тесно связано с градиентом S суммарной продольной проводимости разреза. Участки резкого изменения S отмечаются

сгущением изолиний M . По карте M намечаются зоны крутого погружения опорного горизонта, тектонические нарушения.

В качестве вспомогательной иногда пользуются картой абсолютных эллипсов, на которой в уменьшенном масштабе наносят положение их осей. Такая карта может быть полезна при геологическом истолковании результатов наблюдений ТТ. Например, в районах моноклинального погружения опорного горизонта и на склонах вытянутых поднятий оси эллипсов располагаются преимущественно по падению (большая ось) и простираению (малая ось) опорного горизонта.

Карты параметра M и абсолютных эллипсов составляются не во всех случаях исследования. Интерпретации подвергается в основном карта E эффективной (средней) напряженности поля ТТ.

Карты E_{\max} и E_{\min} . За последнее время в районах с горизонтально-неоднородным разрезом, содержащим в себе высокоомную промежуточную толщу, наряду с картой средней напряженности E поля ТТ составляют карты максимальной и минимальной напряженности. Карты E_{\max} и E_{\min} строят, исходя из вычисления абсолютных эллипсов в точках наблюдения. Большие полуоси эллипсов определяют значения E_{\max} , малые — значения E_{\min} . Предполагается, что над линейными структурами изменяется зна-

чений E_{\max} связаны главным образом с рельефом поверхности промежуточной экранирующей толщи, а E_{\min} с поведением непроводящего основания (фундамента). Справедливость этого предположения будет понятна, если мы вспомним взаимоотношение вычисленных кривых МТЗ над одной из моделей линейных структур — протяженным выклинивающимся слоем с промежуточным высокоомным пропластком. Кривые $\rho_{\frac{1}{T}}$, полученные при H -поляризованном поле, располагаются выше кривых при E -поляризованном поле (кривых $\rho_{\frac{1}{T}}^{\parallel}$), т. е. $\rho_{\frac{1}{T}} > \rho_{\frac{1}{T}}^{\parallel}$ или $E^{\perp} > E^{\parallel}$. Вместе с тем кривые $\rho_{\frac{1}{T}}$, как указывалось, в большей степени отражают рельеф поверхности высокоомного пропластка, а кривые $\rho_{\frac{1}{T}}^{\parallel}$ — поведение поверхности непроводящего основания. Отсюда и возникает предположение, что в районах, где развиты линейные структуры, значения E_{\max} , подобно значениям S^{\perp} , определяемым по кривым $\rho_{\frac{1}{T}}$, будут связаны главным образом с суммарной продольной проводимостью осадков, залегающих над экранирующей промежуточной высокоомной толщей, а значения E_{\min} , как и S^{\parallel} , — с суммарной продольной проводимостью всех отложений над изолирующим основанием (фундаментом). Карты E_{\max} и E_{\min} , таким образом, предположительно позволяют проследивать раздельно поверхности промежуточного высокоомного горизонта и непроводящего основания, что имеет большое значение при поисково-разведочных исследованиях. Работа по указанному разделению полей весьма трудоемка и требует использования электронно-вычислительных машин.

Проследивание рельефа проводящей толщи. До сих пор нами подчеркивалось, что наблюдаемые короткопериодные вариации поля ТТ соответствуют восходящей ветви кривых МТЗ (интервалу S). Однако в районах (например, Вилюйская синеклиза) с мощной (до 3—4 км) проводящей толщей осадков, которая залегает под горизонтом повышенного сопротивления почти той же мощности, вариации поля ТТ в диапазоне наблюдаемых периодов (10—60 с) относятся к нисходящей ветви кривых МТЗ — интервалу h . В этом интервале импеданс $|Z|$ тесно связан с мощностью h_1 горизонта, перекрывающего низкоомную толщу. Параметр K , равный отношению эффективных напряженностей поля ТТ в полевой q и базисной p точках, в интервале h зависит главным образом от отношения мощностей h_{1q} и h_{1p} в этих точках: $K = E_{q\text{эф}}/E_{p\text{эф}} = h_{1q}/h_{1p}$, т. е. с увеличением h_{1q} (погружением проводящей толщи в точку исследования) параметр K увеличивается и, наоборот, с уменьшением (поднятием проводящей толщи) параметр K уменьшается. Таким образом, эффективная напряженность поля ТТ в интервале h оказывается максимальной при наибольшем погружении проводящей толщи и минимальной при наименьшей глубине ее залегания, в противоположность тому, что наблюдается, когда регистрируемый диапазон периодов вариаций поля входит в интервал S кривой МТЗ, и опорным служит горизонт

большого сопротивления. Методика геологического истолкования результатов наблюдений ТТ в подобных геоэлектрических условиях (Якутия) разработана И. А. Яковлевым [41, 42].

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ИСТОЛКОВАНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ТТ

Модификацией ТТ исследованы обширные нефтегазоносные и другие площади Советского Союза. Наблюдения ТТ выполнены в Тимано-Печорской и Волго-Уральской нефтегазоносных провинциях, Северном Прикаспии; Белоруссии, Украине, Прибалтике, Центральных районах, Средней Азии, Казахстане, Западной и Восточной Сибири, на Дальнем Востоке. Общая территория составляет около 2,2 млн. км². Количество точек наблюдений превышает 160 тыс. Приблизительно 60% этого объема работ падает на площади Европейской части СССР. Остановимся на практических примерах исследований.

Северо-западные районы Русской плиты. Интересны результаты региональной съемки модификацией ТТ, выполненной Спецгеофизикой в северо-западных районах Русской плиты. Эти результаты обобщены под руководством А. Д. Мишиной. Рассмотрим часть этих исследований, которая относится к территории южного и юго-восточного склона Балтийского щита, Балтийской впадины, Латвийской седловины, северного склона Белорусского поднятия общей площадью около 135 тыс. км². Средняя густота сети съемки составляет 1 точку на 45 км². В задачу исследования входило изучение рельефа докембрийского кристаллического фундамента. Около 20% указанной территории ранее детально исследовалось с помощью ВЭЗ и ДЭЗ (1 точка на 4 км²). На территории выполнен также значительный объем сейсморазведочных работ и бурения.

Регион в целом по геоэлектрическим условиям является благоприятным для применения электроразведки. Результаты исследования постоянным током с использованием многочисленных скважин позволили районировать территорию, выделив на ней четыре зоны А — Г (рис. 37), различающиеся по геоэлектрическим свойствам разреза.

В зоне А (южный и юго-восточный склоны Балтийского щита, северная часть Балтийской впадины, Латвийская седловина, северный склон Белорусского поднятия) разрез осадочного чехла сложен следующими комплексами: I — песчано-глинистым четвертичного и верхнедевонского возраста, мощность 50—300 м, сопротивление десятки ом-метров; II — карбонатным верхнего и среднего девона, силура, ордовика, мощность 500—400 м, сопротивление сотни ом-метров, III — проводящим (3—15 Ом·м) песчано-глинистым мощностью 150—600 м. В северной части Балтийской впадины и в Латвийской седловине к комплексу III относятся также проводящие карбонатные осадки силура и ордовика. На склоне Белорусского поднятия из осадочного чехла выпадают

палеозой и более древние отложения. Комплекс III представлен проводящими осадками мела, юры и триаса мощностью до 50—60 м.

В осадочный чехол зоны *Б* (западная часть Валдайского прогиба) входят комплексы: I — песчано-глинистый четвертичного возраста, карбона и верхнего девона, мощность до 600—800 м, сопротивление десятки ом-метров; II — гипсово-ангидритовый

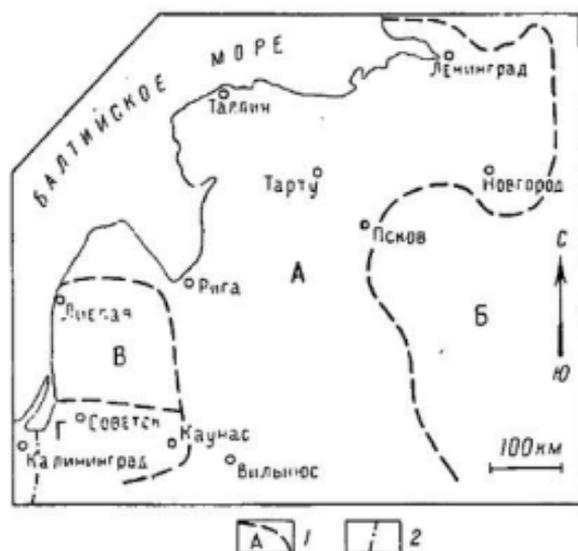


Рис. 37. Схема геоэлектрического районирования северо-западных районов Русской плиты (по А. Д. Мишиной, 1965 год).

1 — зоны с различными опорными горизонтами при исследовании постоянным током: А — фундамент докембрия, Б — сульфатные осадки ордовика и среднего девона, В — карбонатные осадки верхнего девона; Г — галогенные осадки перми; 2 — граница западноевропейской перми, западнее которой галогенные осадки перми непрозрачны для ТТ.

среднего девона, ордовика, мощность 10—300 м, сопротивление тысячи ом-метров; III — карбонатный и песчано-глинистый ордовика (нижней части), кембрия и рифея, мощность 1000—3000 м, сопротивление 2—5 Ом·м.

Разрез осадочного чехла зоны *В* (средняя часть Балтийской впадины) представлен комплексами: I — песчано-глинистым четвертичного возраста мела, юры и верхней перми, мощность до 200—300 м, сопротивление от единиц до десятков ом-метров; II — загипсованным карбонатным верхнего девона, мощность десятки метров, сопротивление до первых тысяч ом-метров; III — песчано-глинистым и карбонатным верхнего девона, силура, ордовика, кембрия, мощность до 1500 м, сопротивление — 3—4 Ом·м.

В зоне *Г* (южная часть Балтийской впадины) разрез осадочного чехла сложен комплексами: I — песчано-глинистым

четвертичного возраста мела, юры и триаса, мощность 300—1000 м, сопротивление десятки ом-метров; II — галогенным пермского возраста, мощность 50—500 м, сопротивление десятки тысяч ом-метров; III — карбонатным и песчано-глинистым силура, ордовика и кембрия, мощность 500—1100 м, сопротивление 3—4 Ом·м.

Исследования показали, что только в зоне А с помощью постоянного тока можно проследивать фундамент. Во всех других зонах промежуточные высокоомные комплексы в отложениях пермского возраста (зона Г) или верхнего, среднего девона и ордовика (зоны В, В) препятствуют картированию фундамента зондированием постоянным током.

По результатам ВЭЗ (ДЭЗ), бурения и сейсморазведки глубины залегания фундамента h , суммарная продольная проводимость S всего осадочного чехла или части его над промежуточными опорными горизонтами S_1 (в зонах В, В, Г), а также среднее продольное сопротивление ρ_l разреза характеризуются значениями, приведенными в табл. 8.

Таблица 8
 Параметры геоэлектрического разреза зон А—Г

| Зоны | h , км | S , См | S_1 , См | ρ_l , Ом·м |
|------|----------|----------|------------|-----------------|
| А | 0,2—1,2 | 5—600 | — | 6—35 |
| В | 1,7—3,6 | — | 160—300 | 3 и менее |
| В | 1,4—2,0 | — | 2—50 | 6—12 |
| Г | 1,0—2,6 | — | 17—200 | 5—8 |

Карта средней напряженности E поля ТТ исследованной части территории приведена на рис. 38. Отражает ли эта карта рельеф фундамента или так же, как и карты, полученные по результатам ВЭЗ и ДЭЗ, везде, кроме зоны А, характеризует лишь поведение поверхности промежуточной высокоомной толщи? Решение надо искать прежде всего в рассмотрении зависимостей $E(S)$ и $E(S_1)$. На рис. 39 приведены эти зависимости, составленные по 300 точкам наблюдений ТТ близ пунктов зондирования постоянным током и около скважин, где можно было определить значения S и S_1 . Как видно, отмечается связь между изменением E и S , полное ее отсутствие между E и S_1 . График зависимости $E(S)$ вполне соответствует нормальному графику (см. рис. 30).

Зависимость $E(S)$ позволяет заключить, что промежуточные высокоомные горизонты в изучаемом разрезе прозрачны для поля ТТ, и поэтому карта E должна отражать изменение суммарной продольной проводимости осадочного чехла на всей территории, за исключением, по-видимому, западного участка зоны Г (см. рис. 37), где мощная толща (сотни метров) галогенных осадков пермского возраста может быть совершенным экраном.

При незначительном колебании значений среднего продольного сопротивления ρ_l пород осадочного чехла карты E должна была бы отражать и изменение суммарной мощности осадков, т. е. рельеф фундамента. Представление об изменении ρ_l на исследуемой территории дает схема ρ_l , составленная по вычисленным

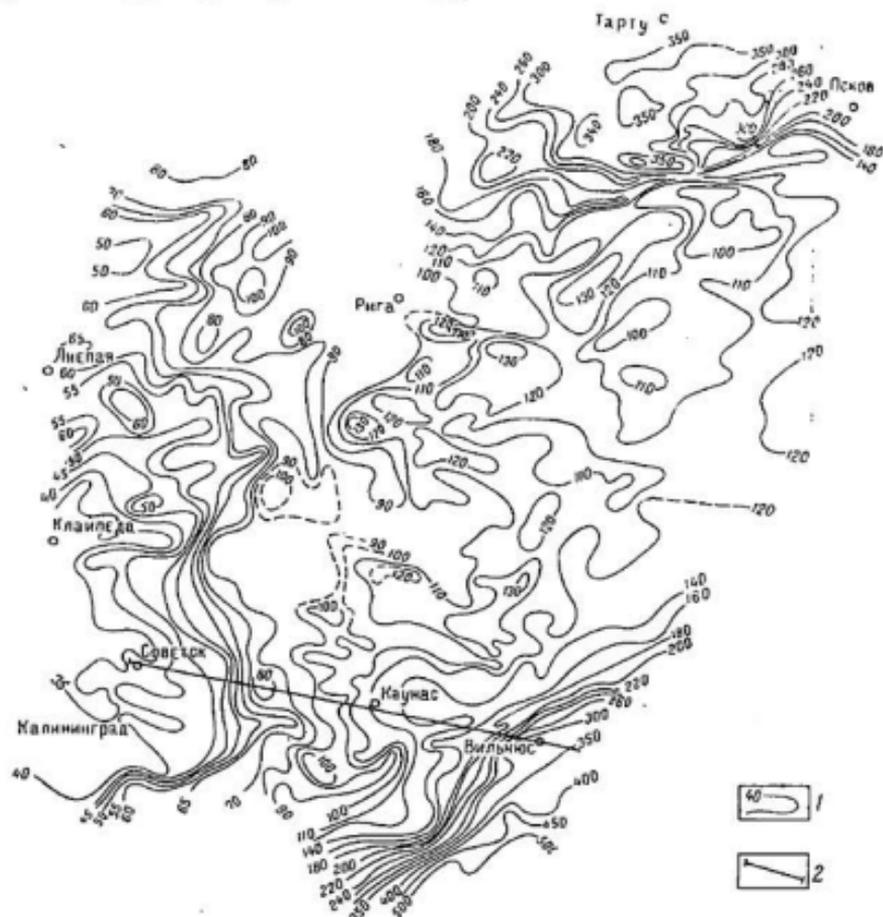


Рис. 38. Карта средней напряженности E поля ТТ (по А. Д. Мишиной, 1965 г.).

1 — изолинии E (в усл. ед.); 2 — линия геоэлектрического разреза.

значениям среднего продольного сопротивления с учетом данных исследований в скважинах, сейсмической разведки бурения и ВЭЗ (ДЭЗ). На большей части территории ρ_l изменяется от 3 до 10 Ом·м; и лишь на севере (юго-восточный склон Балтийского щита) и юге (северо-западной склон Белорусского поднятия) значения ρ_l с резким градиентом увеличиваются до 25—35 Ом·м.

Такое непостоянство ρ_l вызывает предположение об отсутствии связи между E и h на исследуемой территории. Действительно,

точки зависимости $E(h)$ оказываются настолько разбросанными, что исключают построение единого осредненного графика. Однако анализ разброса точек позволил установить отчетливую закономерность в их распределении на территории исследования. По характеру разброса были выделены семь групп точек с прямолинейными графиками, указывающими на связь между E и h . Каждая группа принадлежит к определенному участку территории. Таким

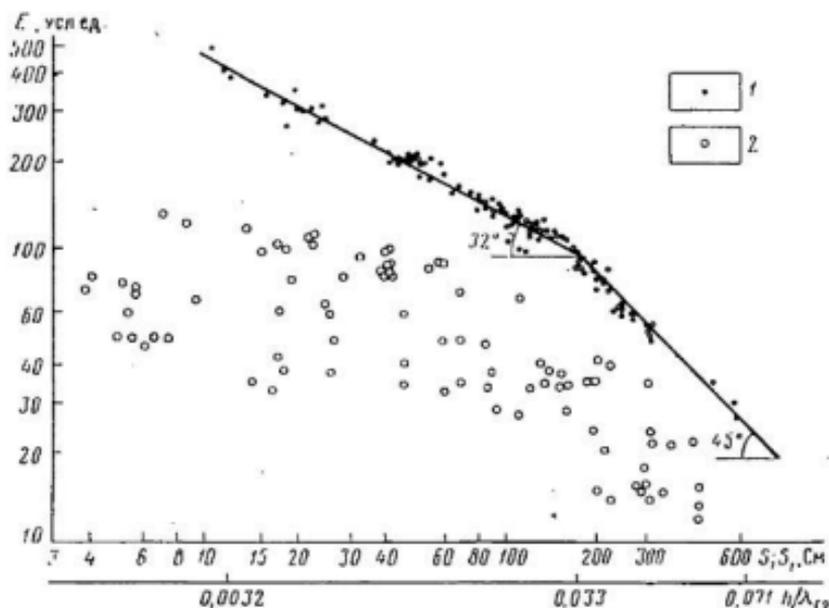


Рис. 39. Зависимости $E(S)$ и $E(S_1)$ в северо-западных районах Русской плиты (по А. Д. Мишиной).

1 — точки зависимости $E(S)$; 2 — точки зависимости $E(S_1)$.

образом, последняя как бы подразделяется на семь площадей, в пределах каждой из которых по значениям E можно найти h . Погрешность определения составляет около $\pm 10\%$. Но она может заметно возрастать на границах выделенных участков — при переходе от одного графика зависимости к другому.

Схема рельефа фундамента [18], составленная по результатам электроразведки с использованием данных бурения, сейсморазведки и других геофизических методов, дает общее представление о строении поверхности фундамента в региональном плане. Карта эта здесь не рассматривается. Остановимся в качестве иллюстрации лишь на разрезе по линии Советск — Каунас — Вильнюс, характеризующем количественные результаты истолкования данных наблюдения ТТ (рис. 40), бурения и сейсморазведки.

Как видно, воздымание поверхности фундамента в восточном направлении отчетливо отражается увеличением E . Оно более

интенсивно, чем уменьшение мощности осадочной толщи. Это связано с возрастанием ее среднего продольного сопротивления ρ_l по мере уменьшения глубин залегания фундамента.

Юго-западная часть Западно-Сибирской плиты. Рассмотрим пример регионального исследования с помощью модификации ТТ в юго-западной части Западной Сибири. Эта территория по геоэлектрическим условиям также принадлежит к числу благоприят-

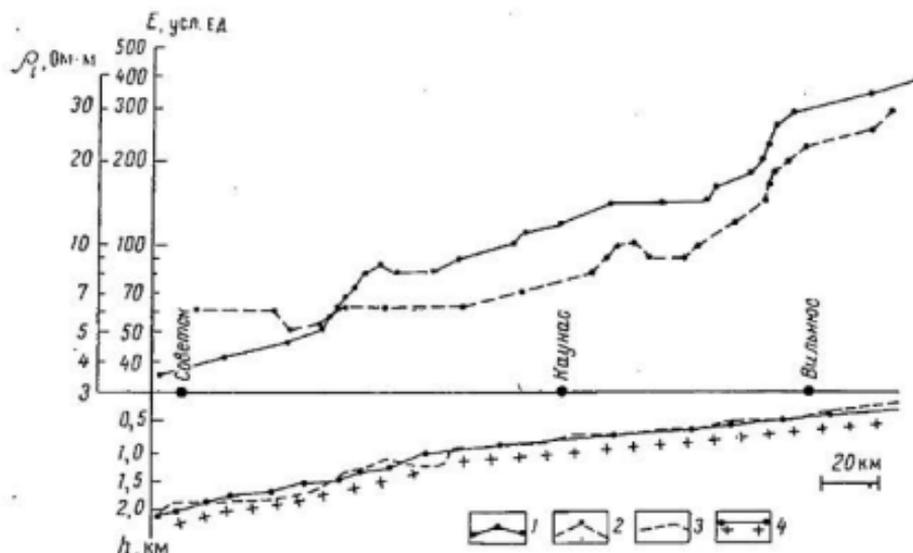


Рис. 40. Профили E и ρ_l по линии Советск — Каунас — Вильнюс.

1 — профиль E ; 2 — профиль ρ_l ; 3 — поверхность опорного горизонта (фундамента) по результатам электроразведки; 4 — поверхность фундамента по данным бурения и сейсморазведки.

ных для применения электроразведки. Здесь засята площадь более 200 тыс. км² со средней густотой сети 1 точка наблюдения ТТ на площадь от 20 до 120 км². Результаты съемки пересмотрены и обобщены под руководством Ю. С. Копелева. Геоэлектрический разрез исследованной части Западной Сибири в основном достаточно прост (см. табл. 6).

На рис. 41 представлена схема среднего продольного сопротивления ρ_l проводящего комплекса II, который играет наибольшую роль в разрезе. Схема получена по результатам наблюдений в большом количестве скважин. Она отмечает обширный район, где ρ_l изменяется всего лишь в пределах 2 ÷ 4 Ом·м; при этом наблюдается значительная область наименьших величин ρ_l (2—3 Ом·м).

Большая часть территории съемки характеризуется мало изменяющимся и низким средним продольным сопротивлением осадочных пород. Подобные условия благоприятны для магнитотеллурических исследований. Изменения суммарной продольной

проводимости разреза, а вместе с нею и средней напряженности поля ТТ в этих условиях должны быть связаны преимущественно с изменениями мощности осадочной толщи.

Несколько вычисленных кривых МТЗ для трехслойного горизонтально-однородного разреза с параметрами слоев, близкими к наблюдаемым в Западной Сибири, свидетельствуют, что диапазон записываемых вариаций поля ТТ ($45 \div 60$ с) относится к восходящей ветви кривых (интервалу S). Поэтому на территории разведки изменение средней напряженности E поля ТТ должно отражать изменение суммарной продольной проводимости S осадочного чехла и благодаря относительному постоянству ρ_l изменение его мощности.

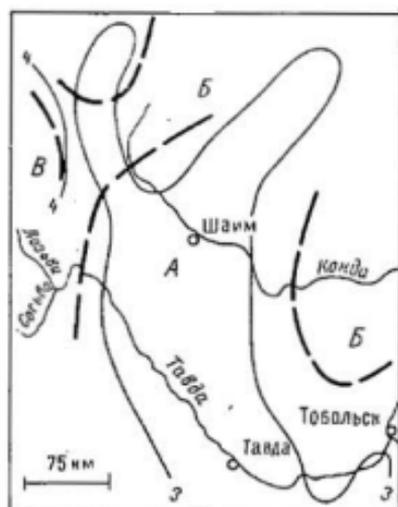


Рис. 41. Схема среднего продольного сопротивления ρ_l (в Ом · м) наиболее проводящих отложений разреза юго-западной части Западно-Сибирской плиты (по Ю. С. Копелеву, 1968 г.).

Пунктиром показаны границы зон с различной зависимостью E (h): А — $\rho_l = 2 \div 3$ Ом·м, В — $\rho_l = 3,1 \div 3,5$ Ом·м, В — $\rho_l = 4 \div 4,5$ Ом·м.

туды. Здесь следует ожидать относительно большие глубины залегания фундамента с пологими формами рельефа.

Минимуму 5 напряженности (до 120 усл. ед.) в северо-западной части площади соответствует прогиб фундамента, известный по общей структурно-тектонической схеме Западной Сибири как Нижневольинский. Область повышенных значений E (200—

ходящей ветви кривых (интервалу S). Поэтому на территории разведки изменение средней напряженности E поля ТТ должно отражать изменение суммарной продольной проводимости S осадочного чехла и благодаря относительному постоянству ρ_l изменение его мощности.

На рис. 42 приведена карта средней напряженности E поля ТТ части исследованной территории. Карта построена по данным обработки теллураграмм с помощью ЭВМ. Относительное сечение изолиний составляет 10% (утроенная среднеквадратическая погрешность определения E). Значения средней напряженности уменьшаются к востоку от 600 до 110 усл. ед. В западной части площади изолинии отмечают наиболее интенсивное уменьшение E, соответствующее крутому погружению фундамента на восток от Урала. В восточной части территории наблюдается спокойный характер поля E с аномалиями небольшой амплитуды.

Рис. 42. Карта средней напряженности E (в усл. ед.) поля ТТ наиболее проводящих отложений разреза юго-западной части Западно-Сибирской плиты (по Ю. С. Копелеву, 1968 г.).

1, 2 — максимумы и минимумы поля E. Цифрами на карте указаны максимумы и минимумы: 1 — Северо-Сосьвинский, 2 — Верхнеюнондинский, 3 — Тугровский, 4 — Шамский, 5 — Нижневольинский, 6 — Муговский.



370 усл. ед.) к юго-востоку отражает поднятие фундамента — Северо-Сосьвинскую гряду I. В области погружения фундамента на востоке площади локальным увеличением E (до 135 усл. ед. и более) отвечают небольшие воздымания фундамента — Тугровское 3, Верхнекондинское 2. Наименьшими значениями E к востоку (111 усл. ед. и менее) отмечается часть Мутовской котловины 6. К югу от поселка Шаим в отчетливой аномалии повышенных значений E (180—220 усл. ед.) находит отражение известное поднятие 4 фундамента — Шаимское.

Сопоставление карты E с результатами гравитационной и магнитной съемок указывает на различные взаимоотношения этих полей

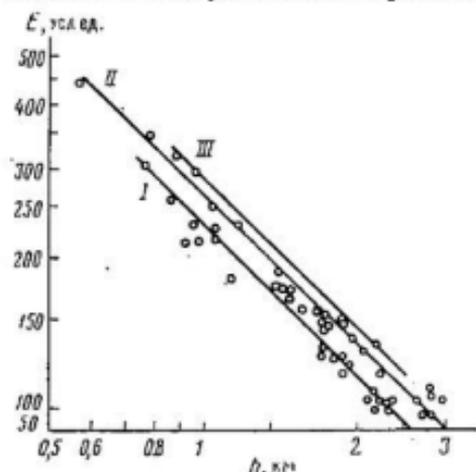


Рис. 43. Зависимость E (h) в юго-западной части Западно-Сибирской плиты.

с теллурическим полем, нередко затрудняющие геологическую интерпретацию. Несоответствия в изменении полей можно объяснить тем, что гравитационное и магнитное поля зависят не только от глубины залегания фундамента, но и от вещественного его состава и внутреннего строения. Изменения же E , отражая суммарную продольную проводимость осадочного чехла при относительном постоянстве среднего продольного сопротивления, по существу должны быть тесно связаны с изменением мощности проводящих осадочных пород.

О достаточно тесной связи между напряженностью поля и глубинами h залегания высокоомного опорного горизонта в юго-западной части Западной Сибири свидетельствуют графики зависимости E (h), приведенные на рис. 43. Для их составления использованы многочисленные данные бурения. Точки, выражающие эту зависимость, группируются с небольшим разбросом около трех прямых (I—III), наклоненных под углом почти 45° к оси абсцисс. Пункты наблюдения ТТ, относящиеся к каждой из этих прямых, располагаются на площади исследования вполне закономерно в зонах А — В (см. рис. 41). Небольшое смещение графиков зависимости E (h) относительно друг друга вызвано закономерным изменением ρ_1 на исследуемой площади. Это хорошо видно на карте изменения ρ_1 (см. рис. 41). В зоне А среднее значение ρ_1 составляет 2,9 Ом·м, в зоне В — 3,4 Ом·м, в зоне В — 4,5 Ом·м. Взаимное расположение графиков зависимости E (h) вполне согласуется с этим изменением средних значений ρ_1 . Графики E (h) позволяют выполнить приближенную количественную интерпретацию наблюдений ТТ.

Зейско-Буреинская впадина (Дальний Восток). Один из интересных примеров, характеризующих случай, когда изменение средней напряженности E поля ТТ на большой территории отчетливо отражает изменение мощности осадочного чехла, относится к исследованиям в Зейско-Буреинской впадине на Дальнем Востоке. Здесь в 1960—1963 гг. была заснята площадь около 23 тыс. км². Средняя густота сети — 1 точка наблюдений ТТ на площадь 2—20 км². Работы выполнены Г. Н. Ткачевым, В. И. Михалевским, В. П. Горюстаевым и др. (Восточно-Сибирский геофизический трест) [28]. Значительная часть территории исследовалась также (Е. Г. Честный и др.) с помощью ВЭЗ и частично ДЭЗ. В задачу работ входило региональное, а на некоторых участках и детальное изучение рельефа кристаллического фундамента протерозойско-палеозойского возраста практически бесконечно большого сопротивления. Глубина его залегания от сотен до первых тысяч метров. Осадочный чехол (табл. 9) представлен преимущественно песчано-глинистыми и галечниковыми отложениями кайнозоя, мела и местами верхней юры. Наблюдается закономерное чередование слоев повышенного (сотни, первые тысячи ом-метров и пониженного (до десятков, единиц ом-метров) сопротивления. Наиболее мощные и проводящие слои располагаются в нижней части осадочного чехла. Среднее продольное сопротивление ρ_l осадочного чехла везде уменьшается с увеличением глубин до фундамента и составляет единицы ом-метров.

На некоторых участках разрез осложняется появлением высокоомных эффузивных образований мощностью до 100 м и более в верхней (на глубинах до 500—600 м) и нижней (на глубинах до 1500 м и более) частях нижнемеловых отложений. Пролосы этих образований не выдержаны по простиранию. Нижний из них, обладающий заметно большим сопротивлением, чем верхний, встречается лишь в зонах прогибов фундамента и обычно не наблюдается на поднятиях.

Пролосы эффузивных образований осложняют кривые зондирования и затрудняют их истолкование. Маркирующей поверхностью при ВЭЗ и частично ДЭЗ служит поверхность фундамента или поверхность нижнего из высокоомных комплексов на участках его развития. Анализ зависимости между значениями средней напряженности E поля ТТ и суммарной продольной проводимости S осадочных отложений по результатам зондирования позволяет заключить, что те же поверхности оказываются маркирующими и при исследовании с помощью наблюдений ТТ.

На рис. 44 приведена карта напряженности E поля ТТ по изученной части Зейско-Буреинской впадины. Можно предполагать, что изменения значений E отражают рельеф поверхности непроводящих отложений. Этой поверхностью может оказаться не только граница фундамента, но и поверхность нижней высокоомной толщи эффузивных пород (комплекс V) в зонах погружения фундамента. Переход с одной маркирующей поверхности на

Обобщенный геоэлектрический разрез исследованной части
Зейско-Бурейской впадины

| Номер комплекса | Характеристика комплекса | Литологическая характеристика и возраст пород | Мощность, км | Сопротивление, Ом·м |
|-----------------|---------------------------|--|------------------------|---------------------|
| I | Различного сопротивления | Песчано-глинистые и галечниковые отложения четвертичного, третичного возраста и верхней части верхнего мела, которая вместе с палеоценом составляет так называемую цагайскую свиту | 0,2—1 | от 10—20 до 3000 |
| II | Проводящий | Песчано-глинистые отложения верхнего — нижнего мела (сеноман, сеноман, альб) — завитинская свита | До 0,35 | 5—8 |
| III | Повышенного сопротивления | Эффузивно-осадочные отложения (алевролиты, песчаники, аргиллиты, базальты, андезиты, порфириты, туфы их) нижнего мела (апт) — верхняя часть поярковской свиты | До 0,12 | 100—500 |
| IV | Проводящий | Песчано-глинистые отложения нижнего мела (нижняя часть поярковской, — верхняя часть итикутской свиты) | До 1 и более | 5—8 |
| V | Повышенного сопротивления | Эффузивные и осадочно-эффузивные образования нижнего мела (валанжнн, часть итикутской свиты) | До первых сотен метров | 300—2000 |
| VI | Проводящий | Песчано-глинистые отложения нижнего мела (нижняя часть итикутской свиты) и верхней юры (екатеринославской свиты) в местах ее развития | До 1 и более | 4—6 |
| VII | Непроводящий | Кристаллические породы палеозойского и протерозойского возраста | ∞ | ∞ |

другую уловить трудно. Предполагается, однако, что этот переход существенно не искажает результаты исследования, вызывая лишь представление о менее глубоком залегании фундамента в прогибах. Области повышенных значений E интерпретируются

как участки приподнятого залегания фундамента, области минимальных значений — как прогибы. Полосы резких градиентов E отражают, вероятно, тектонические нарушения.



Рис. 44. Карта средней напряженности E поля ТТ на территории Зейско-Бурейнской впадины (по Г. Н. Ткачеву, В. И. Михалевскому, 1963 г.).

1 — изолинии E (в усл. ед.); 2 — максимумы E ; 3 — минимумы E (нумерация максимумов и минимумов соответствует порядковым номерам структур на рис. 45); 4 — маршруты сейсморазведки КМПВ и МОВ.

Сравнение карты E с картой рельефа фундамента Зейско-Бурейнской впадины (рис. 45), составленной позже по результатам бурения, сейсмической и гравитационной разведок, подтверждает правильность истолкования наблюдений ТТ. Карта E с большой степенью приближения отражает основные черты строения поверхности фундамента.

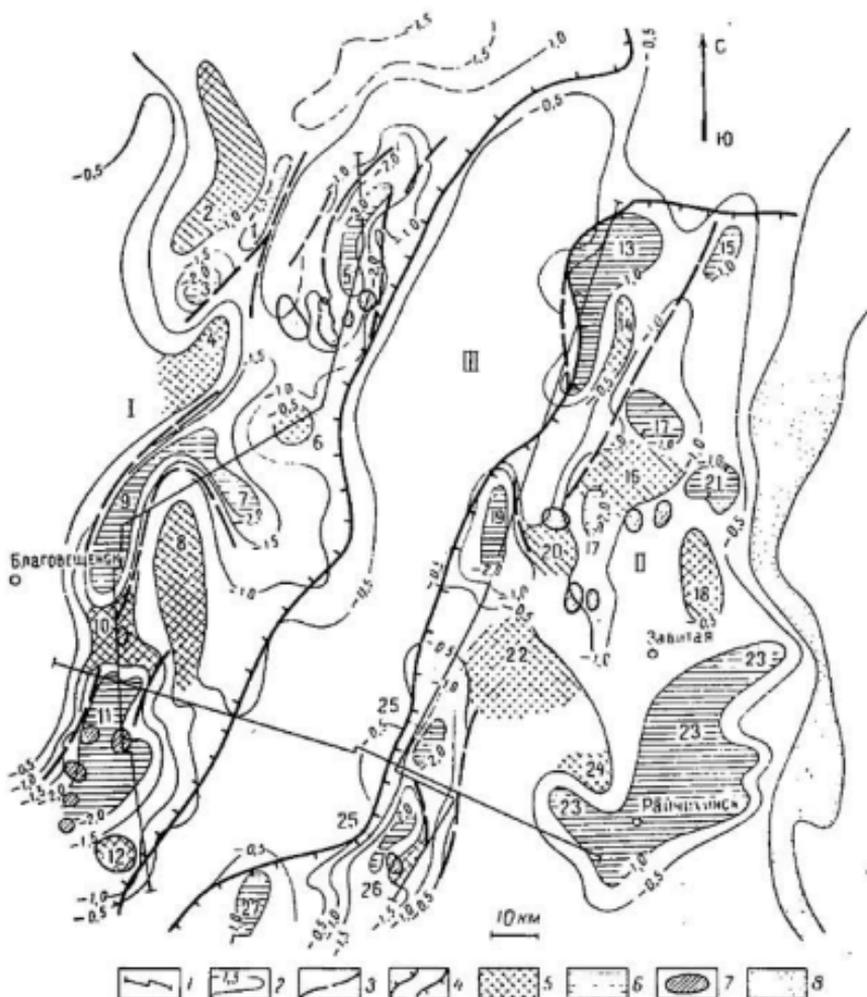


Рис. 45. Схема рельефа фундамента на территории Зейско-Бурейнской впадины (по Г. Д. Вернштейну, В. С. Волхонину, В. Е. Щербаковой и др., 1965 г.).

1 — маршруты сейсморазведки КМПВ и МОВ; 2 — изогипсы поверхности мезозойского фундамента (в км) по данным сейсморазведки, бурения и гравиразведки; 3 — разломы, 4 — границы валлообразного поднятия; 5 — поднятия фундамента; 6 — прогибы фундамента; 7 — ломальные поднятия в осадочном чехле; 8 — область развития маломощных найновейших отложений непосредственно над фундаментом. I — Призейская зона прогибов и поднятий. Прогибы: 1 — Лебяжьевский, 2 — Комиссаровский, 3 — Белогорский, 7 — Лазаревский, 9 — Дмитриевский, 11 — Лермонтовский; поднятия: 2 — Светловское, 4 — Березовское, 6 — Николаевское, 8 — Ивановское, 10 — Толстовское, 12 — Константиновское, 11 — Притуранская зона прогибов и поднятий. Прогибы: 13 — Ромненский, 15 — Тлшинский, 17 — Романовский, 19 — Екатеринбургский, 21 — Верхнезавитинский, 23 — Райчихинский, 25 — Михайловский, 27 — Новостроительский. Поднятия: 14 — Кулгульское, 16 — Раевское, 18 — Завитинское, 20 — Борисовское, 22 — Воскресенское, 24 — Тюканское, 26 — Дубовское. III — Ильковско-Кругловское валлообразное поднятие.

Центральная широкая зона больших значений E (до 150—250 усл. ед. и более) протягивается через всю площадь в северо-восточном направлении и соответствует валообразному поднятию III фундамента с отметками менее — 0,5 км. Полосы больших градиентов E на востоке и западе зоны характеризуют положение границ поднятия, связанных, вероятно, с разломами в фундаменте. Большие градиенты E на восточной границе площади отражают резкое уменьшение глубин залегания фундамента при выклинивании всех отложений осадочного чехла, кроме кайнозойских.

Ряд минимумов E в западной и восточной зонах (I и II) наблюдается над прогибами фундамента (отметки минус 2 и 3 км). Участки максимумов E соответствуют поднятиям, разделяющим эти прогибы. Отдельные замкнутые аномалии повышенных значений E в прогибах (например, к югу от прогиба 5, на участках прогибов II, 25) согласуются с известными локальными структурами в осадочном чехле, связанными, возможно, и с локальными поднятиями маркирующей поверхности. Конфигурация изолиний E позволяет уточнить контуры отдельных структур, положение границ между ними, тектонических нарушений.

При детальном сравнении карт E со структурной картой наблюдаются и некоторые плановые смещения аномальных участков E относительно положения прогибов или поднятий. Такие смещения могут быть вызваны многими причинами — горизонтальной неоднородностью разреза (тектонические нарушения, резкие изменения наклона слоев, влияние соседних структур и т. п.), недостаточной точностью топографической привязки наблюдений, возможными погрешностями полевых исследований, качеством их обработки и другими причинами. Электроразведка, как и другие геофизические методы, пока не может вполне точно отражать в плане рельеф изучаемого опорного горизонта.

Прикопетдагский прогиб (Центральная Туркмения). При значительных глубинах (более 3—4 км) до опорного высокоомного горизонта и проводящем разрезе ($\rho_l \approx 1$ Ом·м и менее) может оказаться, что наблюдениями поля ТТ в диапазоне обычно регистрируемых периодов вариаций (15—60 с) невозможно проследить рельеф опорного горизонта. Это бывает в случаях, когда указанный диапазон периодов лежит вне интервала S кривых МТЗ в районе исследования. По формуле, предложенной М. Н. Бердичевским, легко определить те минимальные значения периода T_{\min} , при которых получаемые величины средней напряженности поля для заданных глубин h залегания опорного горизонта и среднего продольного сопротивления ρ_l разреза еще будут отражать эти глубины: $T_{\min} = 4h^2/\rho_l$. Если, например, предполагаемая глубина $h \approx 4$ км, $\rho_l \approx 1$ Ом·м, то минимальное значение T должно быть не менее 64 с.

Рассмотрим исследования модификацией ТТ, проведенные в Центральной Туркмении [2]. Наблюдения ТТ были выполнены по маршруту почти меридионального направления длиной около

180 км на Центральном Каракумском своде в области южного его крыла, погружающегося в Прикокетдагский прогиб. За опорный горизонт принимался высокоомный фундамент палеозойского возраста. Осадочный чехол представлен проводящими песчано-глинистыми отложениями мезо-кайнозоя с сопротивлением ρ_1 , условно принятым за постоянное, и равным около $0,75 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Обработывались вариации поля ТТ с периодами от 20 до 50 с.

Сравнивая полученный профиль средней напряженности E с результатами сейсморазведки по маршруту (рис. 46), можно

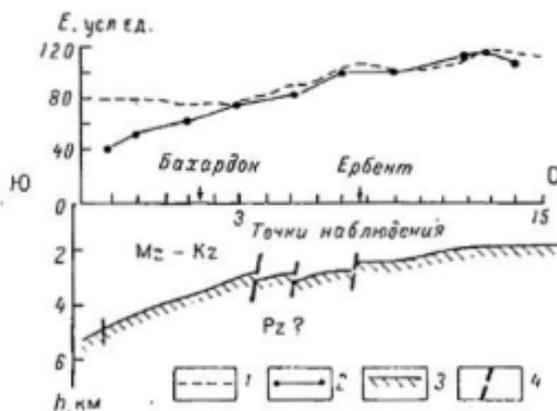


Рис. 46. Профили E на южном крыле Центрального Каракумского свода (по Г. Н. Аищенко, В. В. Голубкову, 1962 г.).

1 — профиль E при $T = 20-50$ с; 2 — то же, при $T = 100-500$ с; 3 — поверхность опорного высокоомного горизонта по данным сейсморазведки; 4 — разломы.

отметить отчетливое соответствие профиля изменению глубины h до высокоомного опорного горизонта от наиболее северного пункта маршрута до точки наблюдений 3. Далее к югу с погружением предполагаемого фундамента до глубины $h \approx 3,5-5$ км связь между h и E нарушается. Из приведенной формулы выясняется причина: диапазон обрабатываемых периодов вариаций при $\rho_1 = 0,75 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ недостаточен для картирования опорного горизонта на глубинах более 3 км. Прослеживание его в южной части маршрута возможно при интервале периодов от 65 до 130 с.

Теллуорограммы были вторично обработаны с использованием вариаций с большими периодами. Новые данные (см. рис. 46) оказались в полном соответствии с изменением h в южной части маршрута. К северу от точки 3 они, как и следовало ожидать, почти не отличаются от прежних.

Юго-западный борт Пачелмского прогиба Русской плиты. Согласно вычислениям экранирующее влияние полого падающего промежуточного пропластка в проводящем клине отмечается

при поперечном сопротивлении T^* пропластка, превышающем не менее чем в тысячи раз поперечное сопротивление вмещающей среды. Однако практика показывает, что в природных условиях экранирующее влияние промежуточной высокоомной толщи может наблюдаться и при значительно меньших относительных величинах T^* . Приведем один из известных примеров [30].

Исследования модификацией ТТ (густота сети — 1 точка на 15 км²) вместе с дипольным зондированием были выполнены И. Ф. Сопко на участке юго-западной бортовой части Пачелмского прогиба Русской плиты. Геоэлектрический разрез здесь несложен и состоит из следующих комплексов.

Сверху залегает относительно проводящий (20—100 Ом·м) комплекс I терригенных отложений кайнозоя и мезозоя мощностью от 50 до 100 м. Комплекс II представлен преимущественно высокоомными (до 1000 Ом·м) карбонатными породами карбона и фаменского яруса верхнего девона мощностью 100—300 м. На некоторых участках наблюдается загипсованность нижней части комплекса — десятки метров с сопротивлением до нескольких тысяч ом-метров. Комплекс III — проводящий (2—8 Ом·м), сложен песчано-глинистыми и карбонатными породами девона, кембрия и более древнего возраста общей мощностью от 200 до 1500 м. В этом комплексе встречаются прослой высокоомных сульфатно-карбонатных отложений мощностью до десятков метров. Непроводящим основанием служат кристаллические породы докембрия практически бесконечно большого сопротивления.

Углы падения фундамента к осевой части прогиба по данным бурения изменяются от 0,5 до 5°. Иногда пологое падение осложнено локальными поднятиями, тектоническими нарушениями. Поперечное сопротивление T^* комплекса II, которое определялось по кривым ДЭЗ с помощью альбома трехслойных палеток, составляет от 20 000 до 90 000 Ом·м². Это превышает поперечное сопротивление лежащего выше комплекса проводящих пород всего лишь в десятки и сотни раз. Но и при таком относительно небольшом T^* промежуточная высокоомная толща в случаях негоризонтального ее залегания оказывает заметное экранирующее влияние. Это видно по тесной связи между изменениями E и T^* и слабой зависимости между E и S в северо-западной части исследованной территории. Экранирующего влияния промежуточной толщи на юго-востоке территории не наблюдается. А в северо-западной ее части высокоомный комплекс II в отдельных зонах, несомненно, влияет на напряженность E и локальные аномалии средней напряженности поля ТТ вызываются не изменением глубин до фундамента, а колебаниями значений T^* , которые, в свою очередь, связаны с включениями в этот комплекс негоризонтально залегающих сульфатных образований большого сопротивления.

Солигаличский грабен (Московская синеклиза). Во многих областях Русской плиты, в частности Московской синеклизы,

связь между E и глубинами h залегания фундамента далеко не так отчетлива, как это мы наблюдали на северо-западе плиты. Большую роль при этом играет не только непостоянство среднего продольного сопротивления ρ_1 осадочного чехла, но и влияние промежуточной высокоомной толщи (галогенных и карбонатных отложений верхнего палеозоя) различной прозрачности в зависимости от поперечного ее сопротивления и условий залегания.

На некоторых площадях, например в районе Солигаличского грабена Московской синеклизы, наблюдается полное отсутствие связи между E и h . В гл. I говорилось о несоответствии изменения значений S , полученных по кривым МТЗ над грабеном, изменению глубин до фундамента: с резким погружением его резко уменьшается S . Несоответствие в районе грабена отмечается также между изменениями E и h . На карте E [18] хорошо прослеживается область северо-восточного простирания максимальных значений E с резкими градиентами уменьшения, ограничивающими ее с северо-запада и юго-востока. Казалось бы, эту зону максимумов E следовало толковать как протяженное поднятие фундамента со значительной амплитудой и крутыми склонами. По результатам сейсморазведки и бурения указывают, что она отчетливо соответствует глубокому (более 4 км) грабену. Противоречие объясняется сильным экранирующим влиянием промежуточной высокоомной толщи в разрезе, которая представлена карбонатными осадками пермского и более древнего возраста, собранными в складки над самым грабеном фундамента.

Эта неглубоко (до первых сотен метров) и беспокойно залегающая толща оказывается непрозрачным экраном; изменение E над грабеном определяется в основном неровностями ее поверхности (эффекты S и экранирования). Об этом убедительно свидетельствует сравнение карты E с картой рельефа поверхности карбонатных отложений верхнепермского возраста по данным бурения. Изменения E почти в деталях отражают рельеф экранирующей толщи. По полосе аномалий наиболее высоких значений E прослеживается осевая часть грабена. О характере изменения средней напряженности поля ТТ над грабеном дают четкое представление профили E (рис. 47).

Таким образом, в противоположность Валдайскому прогибу (см. рис. 34) Солигаличский грабен отмечается максимальными значениями E (и минимальными S) что связано с экранирующим влиянием неглубоко и беспокойно залегающей над ним высокоомной промежуточной толщи. Такое же несоответствие между изменениями E и глубинами залегания фундамента наблюдается, например, в районах прогибов Кировского, Печорского, где над ними также залегает смятый в складки высокоомный комплекс карбонатных или галогенно-карбонатных отложений верхнего палеозоя. Прогибы эти хорошо прослеживаются по максимальным значениям E . Коэффициенты корреляции между величинами E и глубинами до фундамента в этих районах близки к нулю.

Юго-западная часть Прикаспийской впадины. Рассмотрим исследование модификацией ТТ в юго-западной части Прикаспийской впадины в области развития соляных куполов. Галогенные отложения нижнепермского возраста в Прикаспийской впадине совершенно непрозрачны. Большая территория (свыше 200 тыс км²) северо-западной, северной и северо-восточной бортовых частей впадины достаточно детально исследована с помощью модифика-

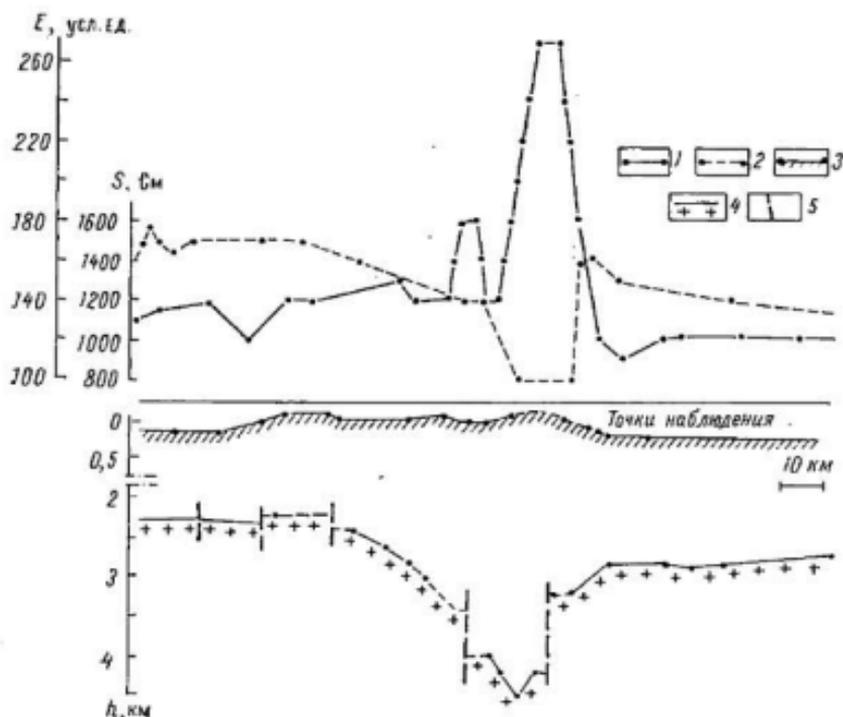


Рис. 47. Профили E и S над Солигаличским грабеном (по А. Л. Шейкману и В. Н. Троицкому, 1968 г.).

1 — профиль E ; 2 — профиль S (по данным МТЗ и зондирования становлением магнитного поля); 3 — поверхность высокоомных отложений перми (данные бурения); 4 — поверхность фундамента (данные КМПВ); 5 — разломы.

ции ТТ (Нижневолгопетрогеофизика, Спецгеофизика). Карты E , составленные по обобщенным материалам съемки (Б. А. Шабанов, В. А. Сидоров, Г. Н. Анищенко, А. Д. Мишина и др.), дают весьма отчетливое представление о конфигурации соляных массивов, гряд, куполов и имеют немаловажное значение при планировании дальнейших поисков и разведки.

В районах к северо-западу от Астрахани с 1966 г. ведутся электроразведочные работы Центральным геофизическим трестом. К 1970 г. на правом и левом побережьях Волги с помощью наблюдений ТТ исследована территория более 11 тыс. км² с густотой сети — 1 точка на 3—6 км². Мы остановимся лишь на позднейших

работах, выполненных, как и все предыдущие исследования, под непосредственным руководством В. А. Липиллина.

Изученная в 1970 г. площадь (более 2 тыс. км²) лежит на правом берегу Волги приблизительно в 100 км к северо-западу от Астрахани. В задачу работ, как и на соседних площадях, входило прослеживание поверхности высокоомных галогенных отложений кунгурского яруса. Именно эта мощная экранирующая толща в Прикаспийской впадине служит опорным электрическим горизонтом. Фундамент, так же как и в Предуральском прогибе, здесь не прослеживается. Цель работ — поиски соляных поднятий. Площадь исследовалась также гравитационной и магнитной съемками, сейсморазведкой и бурением. Изучаемый геоэлектрический разрез территории обобщенно сводится к трехслойному.

К верхнему слою (комплекс I) относятся проводящие песчано-глинистые отложения четвертичного, третичного и верхнемелового возраста с сопротивлением от 0,7 до 1,4 Ом·м и мощностью от десятков до тысячи метров и более. Этот комплекс подстилается более мощным (500—4000 м) комплексом II терригенных пород мезозойского возраста с прослоями карбонатных отложений; сопротивление пород комплекса II — единицы ом-метров. Высокоомным основанием разреза служит комплекс III, представленный галогенными осадками кунгурского яруса и карбонатными (подсолевыми) отложениями нижней перми мощностью тысячи метров и практически бесконечно большого сопротивления.

Опорным горизонтом при исследовании ТГ служит высокоомный комплекс III. Поверхность его в районах развития соляных кушолов и других поднятий соленосных отложений относится к поверхности галогенной толщи кунгурского яруса. В межкушольных зонах, где мощность галогенной толщи может уменьшаться до нуля, поверхность высокоомного основания опускается до кровли карбонатных осадков артинского яруса. На площади исследования было выполнено несколько МТЗ в диапазоне периодов вариаций поля от 12 до 400 с, иногда до 700—800 с. Оси установки ориентировались преимущественно по простиранию (ось x) и вкрест простирания (ось y) структур, исходя из общего представления о строении района по геолого-геофизическим данным. Примеры кривых $\rho_T^{\frac{1}{2}}$ (или ρ_{Tx}) и $\rho_T^{\frac{1}{2}}$ (или ρ_{Ty}) представлены на рис. 48.

Кривые $\rho_T^{\frac{1}{2}}$ и $\rho_T^{\frac{1}{2}}$ мало различаются между собой, неизменно правой ветвью отмечая опорный горизонт очень большого сопротивления. Расхождение в положении кривых $\rho_T^{\frac{1}{2}}$ и $\rho_T^{\frac{1}{2}}$, полученных в одной и той же точке МТЗ, невелико. Исключение составляют кривые в точках 2 и 3. Это, возможно, связано с тем, что точка 2 находится на краю большого поднятия соли, а точка 3 — на склоне поднятия; заметное влияние на магнитотеллурическое поле, вероятно, оказывает горизонтальная неоднородность разреза.

Полученные по кривым МТЗ значения суммарной продольной проводимости S рыхлых мезо-кайнозойских отложений вне соля-

ных поднятий составляют от 1400—1600 до 2500—3000 См. Применение теоретических палеток позволило по некоторым кривым МТЗ приближенно оценить глубины h до высокоомного горизонта (от 2,8 до 4 км). Следует заметить, что кривыми МТЗ при увеличении периодов T до 700—800 с не прослеживаются слои разреза, залегающие ниже комплекса III. Глубины залегания

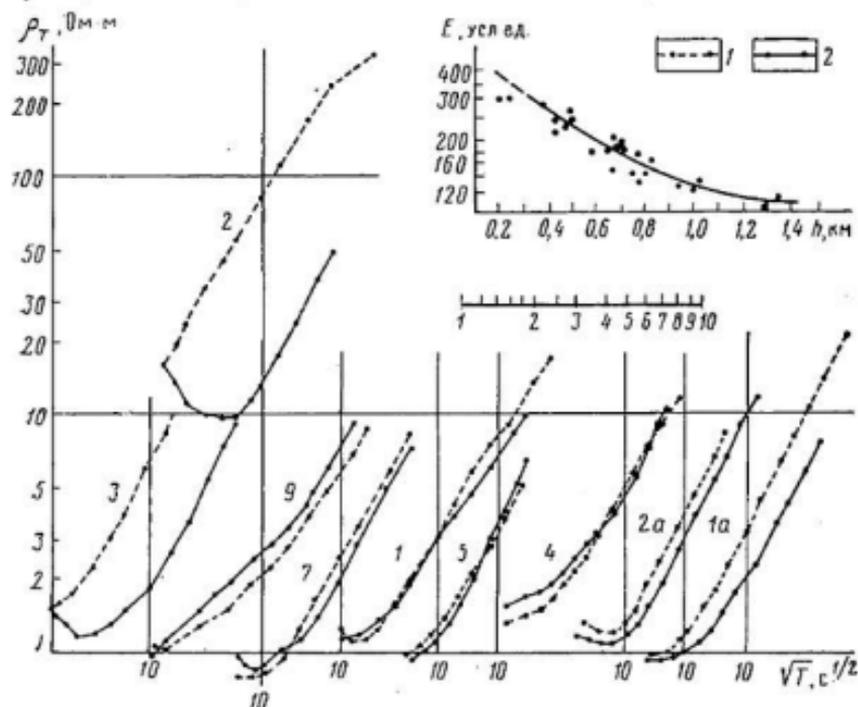


Рис. 48. Кривые МТЗ и график зависимости $E(h)$ в юго-западной части Прикаспийской впадины (по В. А. Липилину и др. 1967—1970 гг.).

1 — кривые ρ_T^{\parallel} ; 2 — кривые ρ_T^{\perp} . Цифры у кривых — номера точек МТЗ.

докембрийского фундамента по другим геофизическим исследованиям на рассматриваемой территории предполагаются до 8—9 км.

При обработке наблюдений поля ТТ принимались во внимание вариации в диапазоне периодов от 20 до 40 с, как наиболее устойчивые и отмечаемые чаще, чем вариации с другими большими периодами (работами не преследовалась цель записи вариаций с $T > 40$ с). Это обеспечивало повышенную производительность съемки. Из приведенных кривых МТЗ видно, что указанный диапазон периодов в большинстве случаев относится к интервалу S . Но даже если записываемый диапазон иногда и выходит за нижний предел интервала S , то это не должно отражаться на качестве истолкования результатов, так как принятый при обработке

наблюдений узкий и неизменный диапазон периодов позволяет получать схему средней напряженности E поля ТТ в одинаковых частотных условиях для всей площади съемки.

Сравнение значений E с результатами бурения, сейсморазведки и гравитационной разведки позволяет установить тесную зависимость между глубинами h по поверхности соленосных отложений кунгура и значениями средней напряженности E поля ТТ. На рис. 49 приведен график, определяющий эту зависимость по данным скважин и наблюдений ТТ. На рис. 49, а представлена карта E в исследованном районе. Четко выраженные на карте аномалии 1—8 повышенных значений E отмечают поднятия соленосных пород (куполов и других форм), области пониженных значений E — зоны прогибов опорного горизонта.

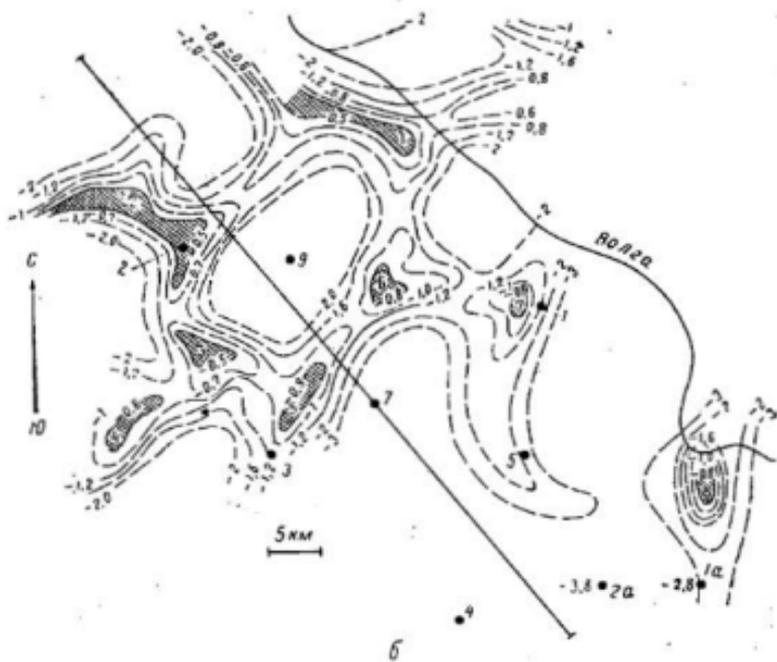
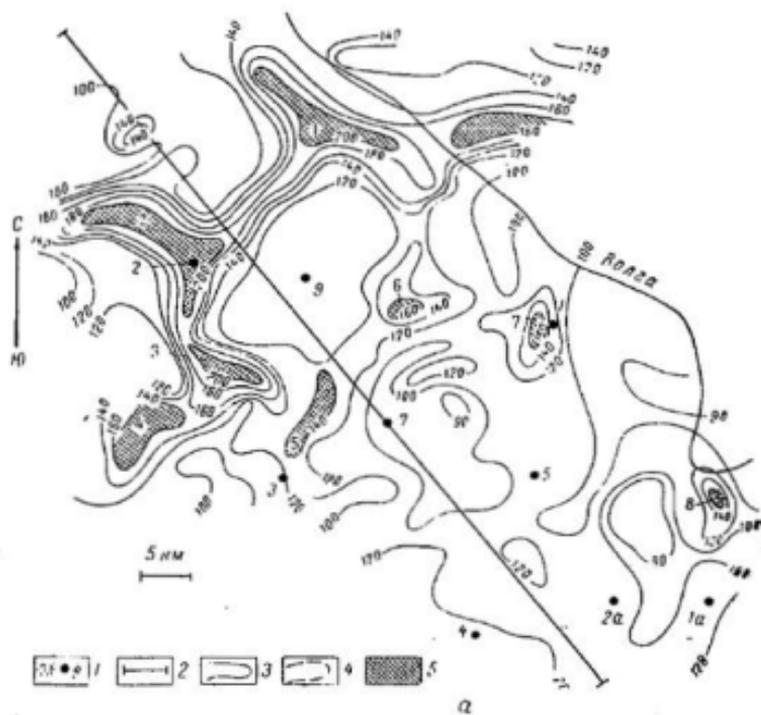
График зависимости между E и h был положен в основу приближенного количественного истолкования наблюдений ТТ. Он показывает, что относительная погрешность определения глубин h может составить не более $\pm 17\%$. По результатам МТЗ, гравиразведки и сейсморазведки была составлена карта рельефа поверхности соленосных отложений (рис. 49, б). Эта карта по очертаниям изолиний мало отличается от карты E .

Из результатов наблюдений ТТ можно заключить, что преобладающей формой залегания соли на исследуемой площади оказываются вытянутые валообразные взаимосвязанные структуры с различным простиранием. Резкие воздымания соли (купола) отмечаются в местах пересечения вытянутых структур. Эти результаты в основном согласуются с геологическим представлением о строении района. Они свидетельствуют, что с помощью модификации ТТ вполне возможны поиски соляных структур, залегающих на глубине 1—1,5 км. Сводная часть поднятий четко прослеживается максимальными значениями E . Крутые же склоны не всегда находят отчетливое отражение в изменении величины E , вероятно, из-за искажения поля в зонах резкого погружения опорного горизонта.

Верхнепечорская впадина Предуральяского краевого прогиба. Остановимся на исследованиях модификацией ТТ в геоэлектрических условиях, которые следует отнести к сложным. Работа производилась в бассейнах рек Вуктыл, Когель и Илыч на территории Верхнепечорской впадины Предуральяского краевого прогиба. Впервые наблюдения ТТ на Вуктыле выполнялись в 1961 г. К. С. Морозовым (Ухтинский геофизический трест). Была заснята

Рис. 49. Карты средней напряженности E поля ТТ (а) и рельефа соленосных отложений по данным электроразведки, бурения, сейсморазведки и гравиразведки (б) на Владимировско-Замьяновской площади юго-западной части Прикаспийской впадины (по В. А. Лишину и др., 1969—1970 гг.).

1 — точки МТЗ и отметки поверхности опорного горизонта (в км); 2 — профиль КМПВ; 3 — изолинии E (в усл. ед.); 4 — изогипсы поверхности соленосных отложений нижней перми (в км); 5 — максимумы E и соляные купола: 1 — Енотасевский, 2 — Владимировский, 3 — Бугристый, 4 — Полюнный, 5 — Велобугорский, 6 — Песчаный, 7 — Булуновский, 8 — Замьяновский.



площадь около 1,8 тыс. км² со средней густотой сети 1 точка на 7—8 км².

Исследования на этой площади были продолжены лишь в 1965 г. после открытия богатейшего Вуктылского газоконденсатного месторождения. На участке съемки ТТ были выполнены (Р. А. Селянинов и др.) магнитотеллурическое профилирование и в небольшом количестве МТЗ по редкой сети (1 точка на 20—60 км²). Работы на соседних к югу площадях Верхнепечорской впадины и западного склона Урала продолжались под руководством К. С. Морозова¹. Наблюдениями ТТ с сетью опорных МТЗ была охвачена территория около 3,7 тыс. км² со средней густотой сети 1 точка на 3—4 км². Значительная часть всей этой площади изучалась ранее (1957—1958 гг.) С. И. Ильиным, Г. Н. Дубовой методом ВЭЗ с разносами $AB/2$ от 8 до 16 км; средняя густота сети — 1 точка на 10 км².

Территория исследования располагается в северной и центральной частях Верхнепечорской впадины, в области перехода к восточному ее борту и западному склону Урала. На изучаемой площади складчатый фундамент, представленный в верхней его части метаморфизованными породами кембрийского возраста или верхнего протерозоя, по данным гравиметрии и магнитометрии залегает на глубинах 6—7 км. Геолого-геофизические исследования указывают на асимметричное строение впадины. В региональном плане западное (приплатформенное) крыло ее падает под углом 1,5—2°, в приосевой части угол увеличивается до 4—5°, а наклон восточного борта возрастает до 30° и более. Многочисленные складки в восточной части впадины отличаются закономерным линейным расположением, близким к меридиональному.

Обобщенный геоэлектрический разрез осадочного чехла приведен в табл. 10.

Разрез впадины включает промежуточный мощный высокоомный комплекс II. В наиболее погруженных частях впадины он залегает на глубине до 4—4,5 км. Падение слоев комплекса на некоторых структурах, например Вуктылской, по данным бурения и сейсморазведки составляет десятки градусов; нередко падение сопровождается тектоническими нарушениями; амплитуда Вуктылского поднятия по кровле карбонатных пород нижней перми достигает сотен, а в северной части (Нижневуктыльская структура) превышает 1300 м. Комплекс II служит опорным горизонтом большого сопротивления при ВЭЗ. Он может оказаться промежуточным экранирующим горизонтом при магнитотеллурических исследованиях. Изолирующим основанием разреза при этих исследованиях предполагался фундамент.

¹ К. С. Морозов — один из основоположников применения магнитотеллурической разведки в Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции. Им было выполнено много работ, которые способствовали широкому и плодотворному развитию электрических исследований.

Обобщенный геоэлектрический разрез северной и центральной частей Верхнепечорской впадины Предуральяского краевого прогиба (по К. С. Морозову и др.)

| Номер комплекса | Характеристика комплекса | Краткая литологическая характеристика и возраст пород | Мощность, км | Сопротивление, Ом·м |
|-----------------|--------------------------|---|------------------|---------------------|
| I | Проводящий | Песчано-глинистые отложения четвертичного возраста, триаса, верхней и нижней перми | 2—4,5 | 6—15 |
| II | Высокоомный | Карбонатные отложения нижней перми, карбона, верхнего девона (фаменского яруса) | 2—2,7 и более | 80—500 |
| III | Проводящий | Преимущественно терригенные (на западе карбонатно-терригенные) отложения верхнего (франский ярус) и среднего девона | 1,2—1,7 | Десятки |
| IV | Высокоомный | Карбонатные отложения силура и верхнего ордовика (?) | 1,5—2 и более | Сотни |
| V | Проводящий | Предположительно терригенные отложения ордовика | До 2,5 | Единицы |
| VI | Непроводящий | В верхней части — метаморфизованные породы кембрия для верхнего протерозоя, прорванные интрузиями | ∞ | ∞ |

В нижней части разреза можно ожидать включения второй промежуточной высокоомной толщи (комплекс IV). При отсутствии ее разрез заметно упрощается. Если же из разреза выпадает проводящий комплекс V или мощность его резко уменьшается, то высокоомная толща IV вместе с фундаментом может отмечаться как единый опорный горизонт. Однако не исключено, что маркирующей может служить поверхность этой толщи и при развитии в разрезе проводящего комплекса V. На участке перехода восточного борта впадины в западный склон Урала полностью выклинивается проводящий комплекс I. Разрез осадочного чехла становится четырехслойным (или даже трехслойным при выпадении и комплекса IV).

На рис. 50, а приведена карта средней напряженности E поля ТТ на площади, исследованной в 1961, 1967 и частично

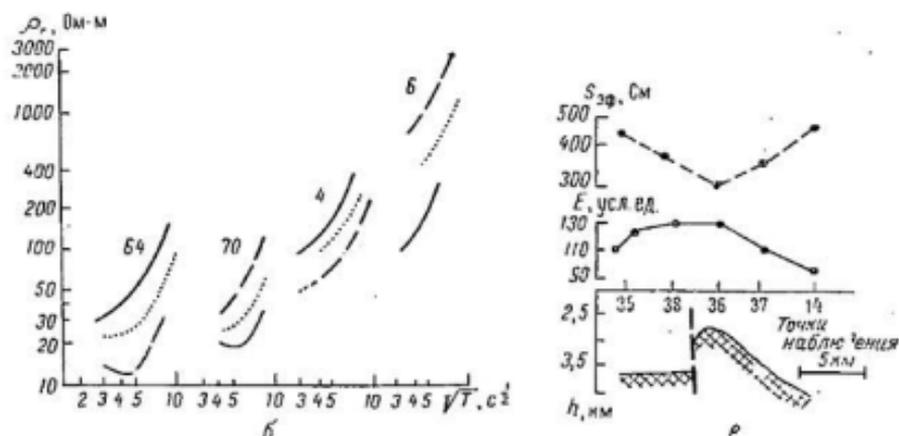


Рис. 50. Карта средней напряженности E поля ТТ Вуктылско-Ильчского участка Верхнепечорской впадины (а), кривые МТЗ (б) и профили E и S по линии А—А (в) (по К. С. Морозову и др., 1968 г.).

1 — точки МТЗ и значения $S_{зф}$ (в См); 2 — изолинии E (в усл. ед.); 3 — аномальные зоны; 1 — Вуктылская, II — Гердзельская, III — Сочинская, IV — Испорядьюская, V — Маткаельская, VI — Сарью-Мартюрская; 4 — максимумы E ; 5, 6 — границы выходов отложений соответственно нижней перми и карбона; 7 — линия разреза по точкам МТП; 8 — линия разреза по данным ТТ; 9 — кривые $\rho_{Т\parallel}$; 10 — кривые $\rho_{Т\perp}$; 11 — кривые $\rho_{Тзф}$; 12 — профиль E ; 13 — профиль S ; 14 — поверхность карбонатных отложений нижней перми по данным бурения; 15 — разломы. Цифрами на карте обозначены максимумы E : 1 — Нижневуктыльский, 2 — Средневуктыльский, 3 — Верхневуктыльский, 4 — Восточновуктыльский, 5 — Мишпарминский, 6 — Цаннесочинский, 7 — Гудыр-Вожский, 8 — Сарью-Сочинский, 9 — Верхнематкаельский, 10 — Среднематкаельский, 11 — Нижнемспердьюский, 12 — Среднемспердьюский, 13 — Верхнемспердьюский, 14 — Маткаельский, 15 — Сарьюдинский, 16 — Мартюрский.

1968 г. Карта получена путем обработки записей вариаций электрического поля с периодами от 20 до 40—50 с при поляризации поля, близкой к линейной, преимущественно по простиранию впадины почти в меридиональном направлении. На карту нанесены точки МТЗ, выполненные в 1965—1968 гг. Кривые МТЗ получены с использованием периодов вариаций от 9 до 100 с. В качестве примера ряд кривых МТЗ в различных зонах территории показан на рис. 50, б. Кривые $\rho_{Т\parallel}$, построенные при продольной поляризации электрического поля, обозначены через $\rho_{Т\parallel}$, кривые $\rho_{Т\perp}$, соответствующие поперечной поляризации, — через $\rho_{Т\perp}$. Преобладающая часть кривых МТЗ, особенно в восточной части территории, не имеет минимума и представлена лишь восходящей асимптотической ветвью (точка б). Во всех случаях восходящая ветвь наклонена под углом около 63° к оси абсцисс, отмечая тем самым опорный горизонт практически бесконечно большого сопротивления. Полученные по кривым $\rho_{Тзф}$ значения суммарной продольной проводимости пород колеблются от 500 См на западе территории до 70 См на востоке.

Закономерности во взаимоотношении кривых $\rho_{Т\parallel}$ и $\rho_{Т\perp}$ не наблюдается. В некоторых точках кривые $\rho_{Т\parallel}$ лежат выше кривых $\rho_{Т\perp}$,

в иных, наоборот, $\rho_T^{\perp} > \rho_T^{\parallel}$. Разность между значениями S , определяемыми по кривым ρ_T^{\parallel} и ρ_T^{\perp} , колеблется в широких пределах и достигает 200—260 См. Значительный разрыв по S между кривыми ρ_T^{\parallel} и ρ_T^{\perp} отмечается в восточной части территории. В точке 6, например, разность составляет 60—70 См, а в крайней восточной точке МТЗ возрастает до 260 См. При этом в каждой из указанных точек $\rho_T^{\parallel} > \rho_T^{\perp}$ ($S^{\perp} > S^{\parallel}$).

На взаимоотношение кривых ρ_T^{\parallel} и ρ_T^{\perp} , вероятно, основное влияние оказывает тектоника отложений — чередование вытянутых почти в меридиональном направлении поднятий и прогибов. Искажение кривых, возможно, связано с локальным индукционным эффектом.

Изменение значений $S_{\text{эф}}$, указанных на карте, в региональном плане качественно правильно отражает поведение опорного горизонта. Максимальные $S_{\text{эф}}$ на западе территории относятся, по-видимому, к наиболее погруженной приосевой части Верхнепечорской впадины. Здесь, южнее Вуктыльских аномалий, наблюдается наименьшее значение E ($E < 90$ усл. ед.). Значения $S_{\text{эф}}$ заметно уменьшаются к востоку, достигая минимума близ границы выхода на дневную поверхность отложений наиболее проводящего комплекса I по восточному борту впадины.

Из кривых МТЗ следует, что в пределах всей территории исследования диапазон периодов вариаций (20—50 с), принятый при обработке наблюдений ТТ, относится к восходящей ветви (интервалу S) кривых. Таким образом, карта E должна отражать рельеф высокоомного опорного горизонта. Какой именно из высокоомных комплексов разреза служит опорным горизонтом, определить трудно. Можно, однако, заключить, что в южной части изучаемой площади, где выполнялись ВЭЗ, этим горизонтом не будет комплекс II, рельеф которого прослеживается с помощью постоянного тока. Зависимость между E и S , по данным ВЭЗ, представляет собой прямую с небольшим (около 18°) наклоном к оси абсцисс, что указывает на полупрозрачность комплекса II. Поэтому он не может здесь быть основным опорным горизонтом, хотя рельеф поверхности комплекса, несомненно, оказывает влияние на изменение E .

Было условно принято, что при магнитотеллурических исследованиях основной маркирующей поверхностью служит поверхность фундамента или верхняя граница высокоомного комплекса IV. Однако нельзя исключить возможность, что в областях неспокойного залегания комплекса II он будет прослеживаться как высокоомный опорный горизонт.

Рассмотрим карту средней напряженности E поля ТТ. В северо-западной части площади отмечается относительно спокойная, почти меридионального простирания, зона изменений E , названная Вуктыльской I. В пределах ее четко оконтурены три аномалии

повышенных значений средней напряженности поля ТТ. В 1965—1966 гг. результатами МТП и МТЗ по очень редкой сети эта зона была подтверждена единой аномалией пониженных значений $S_{\text{эф}}$. По данным бурения и сейсморазведки, здесь по кровле карбонатных пород нижнепермского возраста была околонтурена крупная Вуктыльская антиклиналь почти меридионального простирания с Нижневуктыльским и Средневуктыльским поднятиями повышенных значений напряженности поля ТТ. Верхневуктыльская аномалия оказалась в периклинальной части Средневуктыльского поднятия.

На рис. 50, в представлены профили значений E и $S_{\text{эф}}$ по линии $A-A$, секущей вкрест Средневуктыльское поднятие. Эти профили дают общее представление о структуре по поверхности высокоомной карбонатной толщи нижней перми (верхняя часть комплекса II), но существенной особенности ее (тектонического нарушения большой амплитуды на западном крыле поднятия) не отражают. Согласно предположению о прослеживании с помощью магнитотеллурических исследований более древних высокоомных горизонтов, чем комплекс II, можно допустить, что наблюдаемое нарушение не распространяется на глубокозалегающие горизонты разреза (?).

К востоку от Вуктыльской зоны на схеме намечаются две четко выраженные аномалии повышенных значений E , которые относятся к Гердьяльской зоне II. Эти аномалии нашли подтверждение в поднятиях Восточновуктыльском и Мишпарминском, по данным сейсморазведки.

Непосредственно к югу от Вуктыльской зоны на всем протяжении остальной части территории исследования наблюдается весьма спокойное поле ТТ, характеризующееся наименьшими значениями E . Эту часть карты, имея также в виду и наиболее повышенные значения $S_{\text{эф}}$ по кривым МТЗ, следует толковать, как отражение значительного погружения опорного горизонта (осевая область Верхнечечорской впадины) и отсутствие структур типа вуктыльских в осадочном чехле.

В восточной и юго-восточной частях территории отмечается сложный характер поля ТТ. Он, несомненно, вызван сложностью строения восточного борта впадины и западного склона Урала. Вероятно, поле ТТ расчленяется здесь протяженными почти в меридиональном направлении полосами резких градиентов увеличения и спада средней напряженности на несколько крупных аномальных зон, в пределах которых возникают локальные аномалии при более спокойном изменении E . Здесь выделены четыре аномальные зоны с отдельными аномалиями.

Значения E скачкообразно возрастают с запада на восток от одной зоны к другой вплоть до Сочинской. На схему E нанесены границы выхода отложений пермского и каменноугольного возраста на дневную поверхность. Можно видеть, что к первой из них тяготеет полоса резких градиентов E . Она является

областью перехода от восточного борта Верхнепечорской впадины к западному склону Урала. Резкое увеличение E связано здесь с крутым воздыманием борта и уменьшением мощности верхнего проводящего комплекса I до полного его выклинивания.

Сочинская зона III с ее локальными аномалиями наибольших значений E расположена к востоку от указанной полосы резких градиентов и относится уже к области западного склона Урала. Приблизительно на одной оси с локальными аномалиями 6—8 этой зоны, к северу от них, известен ряд крупных поднятий в отложениях карбона и девона. Вполне вероятно, что и локальные аномалии Сочинской зоны вызваны поднятиями высокоомных пород.

Исперedyская зона IV с локальными аномалиями 12 и 13 наблюдается к юго-востоку от Сочинской. Она характеризуется меньшими значениями E , чем последняя. Аномалии 12 и 13, вероятно, также отражают поднятия высокоомных отложений. Относительное уменьшение значений E может быть объяснено падением среднего продольного сопротивления осадочной толщи вследствие наблюдаемого в этом районе перехода карбонатных отложений девона в терригенные и вероятного увеличения проводящих терригенных пород ордовика. Относительно пониженный уровень значений E отмечается и далее в восточном направлении.

Маткаельская V и Сарыюдинская VI зоны, представленные отчетливыми локальными аномалиями 14 и 15, располагаются, возможно, в восточной бортовой части Верхнепечорской впадины. Исходя из характера изменения поля ТТ, на этих участках предполагаются относительно пологие ступени борта, спускающиеся к западу в сторону наибольшего погружения основания впадины. Локальные аномалии на этих ступенях отражают, по-видимому, поднятия высокоомных пород. Одно из них, связанное с аномалией 15, известно в настоящее время по результатам геологической съемки и сейсморазведки МОВ, как Сарыюдинское поднятие карбонатных отложений артинского возраста. Структура представляет собой узкую гребневидную складку с амплитудой около 1500 м и углами падения до 60—75° и более. Местоположение ее в плане отчетливо указывается аномалией 15.

Так, в основных чертах, с привлечением данных геологической съемки, бурения и сейсмической разведки можно истолковать результаты наблюдений ТТ. Для выяснения возможности отдельного прослеживания рельефа поверхности промежуточного экранирующего горизонта в разрезе (комплекса II) и непроводящего основания (фундамента, комплекса IV) были составлены карты максимальных и минимальных значений напряженности поля ТТ (E_{\max} и E_{\min}) на основании построения абсолютных эллипсов в точках наблюдений.

В горизонтально-неоднородном разрезе с промежуточным высокоомным экраном при линейных структурах на изменения

E_{\max} (H -поляризованное поле) преимущественное влияние могут оказывать неровности поверхности этого экрана, а на изменения E_{\min} (E -поляризованное поле) — рельеф изолирующего основания. Поэтому можно ожидать, что карта E_{\max} будет отражать главным образом рельеф экранирующей толщи (комплекса II), а карта E_{\min} — поведение поверхности изолирующего основания.

Рассмотрение карты E_{\max} и E_{\min} (рис. 51, а, б) для исследуемой территории приводит к интересным заключениям. Из сравнения этих карт с картой E (см. рис. 50, а) следует, что Вуктыльская зона I с локальными аномалиями 1—3 не находит отражения на карте E_{\max} . Вероятно, это связано с искажающим влиянием на поле ТТ резкой горизонтальной неоднородности верхней части разреза Вуктыльского поднятия. Очень слабо отразились на карту E_{\max} также аномалии 4, 5. Во всей остальной части территории карта E_{\max} качественно почти не отличается от карты E и, по-видимому, отчетливо характеризует рельеф промежуточного комплекса II.

Сравнивая карты E_{\min} и E , замечаем, что Вуктыльская зона отражается и на карте E_{\min} . Это можно интерпретировать как соответствие Вуктыльского поднятия по верхним горизонтам поднятию нижней части разреза (комплекса IV).

На карте E_{\min} четко отмечается протяженная минимальная область ($E_{\min} < 40$ усл. ед.) в западной части. Эта замкнутая область, по-видимому, уточняет положение наиболее погруженной осевой части Верхнепечорской впадины по нижним горизонтам (и фундаменту?).

Аномалия 15 почти не отмечается картой E_{\min} . Поэтому есть основание полагать, что Сарьюдинское поднятие не затрагивает нижние горизонты разреза осадочной толщи. На карте E_{\min} не получила выражения и аномалия 10. Вероятно, она связана с влиянием лишь промежуточного высокоомного экрана (комплекса II). Все остальные локальные аномалии, отмечаемые картами E и E_{\max} в южной части территории, более или менее четко выражены и на карте E_{\min} . Это позволяет предполагать, что возможные поднятия комплекса II, так же как и Вуктыльская структура, имеют корни в нижних горизонтах.

На рис. 51, в приведены профили E_{\max} , E_{\min} и E по линии Б — Б. Здесь особенно заметно исчезновение аномалии 15 по E_{\min} , что свидетельствует об отсутствии Сарьюдинского поднятия в нижних слоях разреза. Возникает предположение также об относительно спокойном залегании нижних горизонтов (и фундамента?) в областях аномалий 9 и 10 по E_{\max} и E .

Таким образом, составление и анализ карт максимальных и минимальных значений напряженности поля ТТ, наряду с картой средней напряженности, расширяет возможности геологической интерпретации. Методика разделения полей широко применяется при магнитотеллурических исследованиях Тимано-Печорской провинции, где эта методика и была впервые разработана.

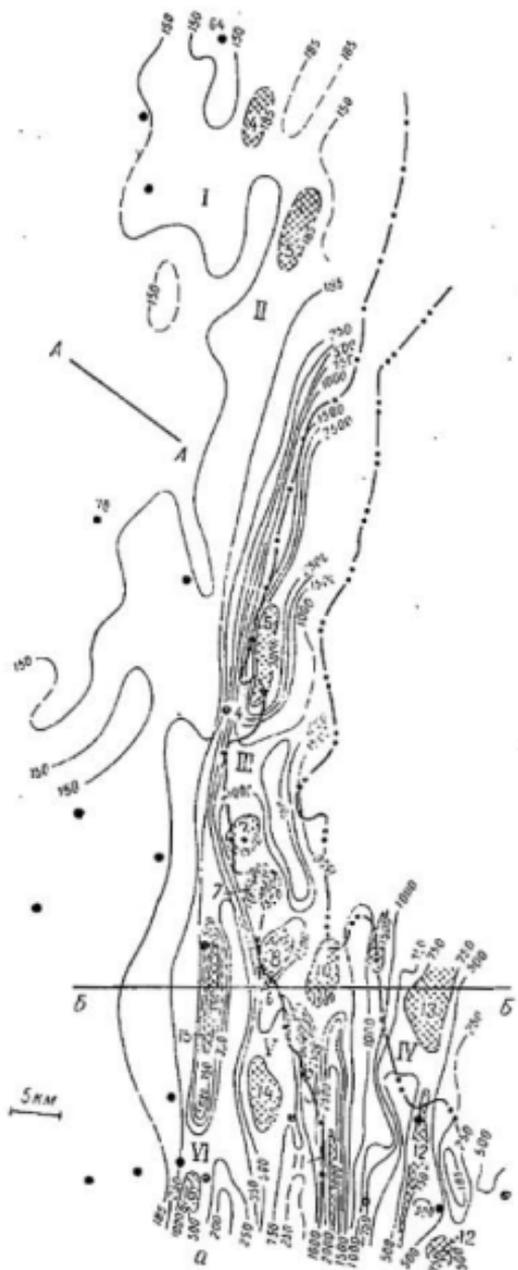


Рис. 51, а

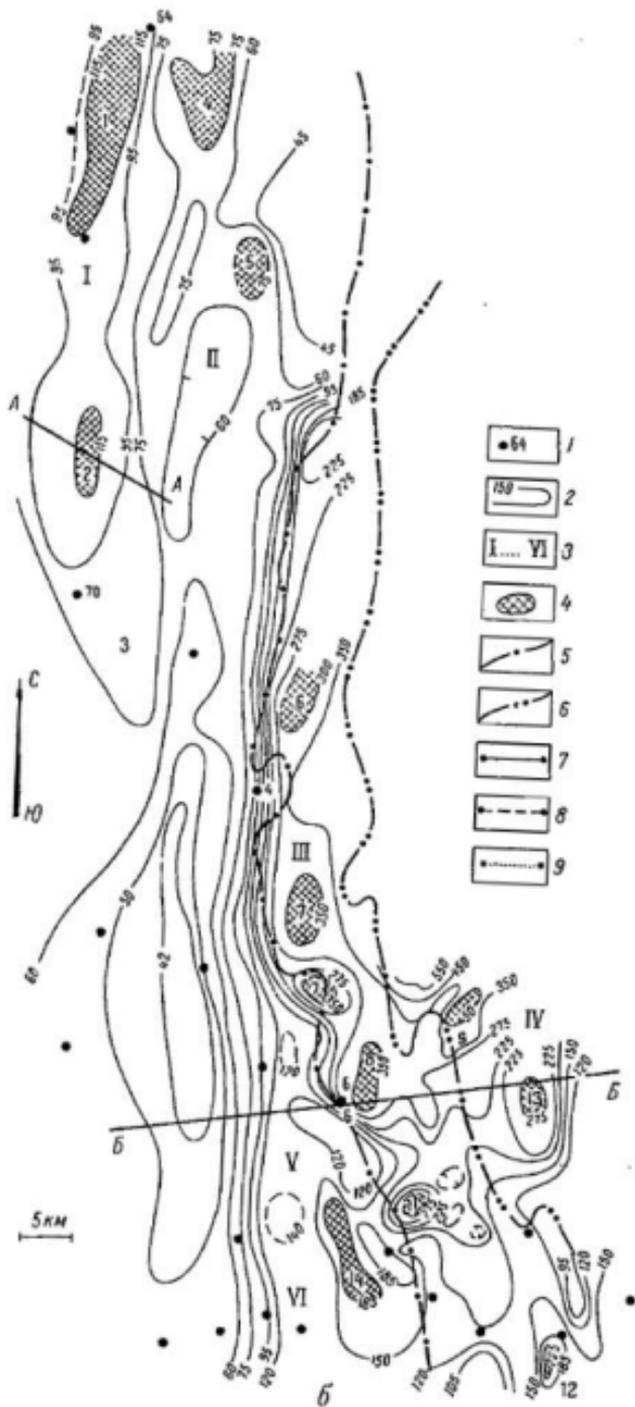


Рис. 51, б

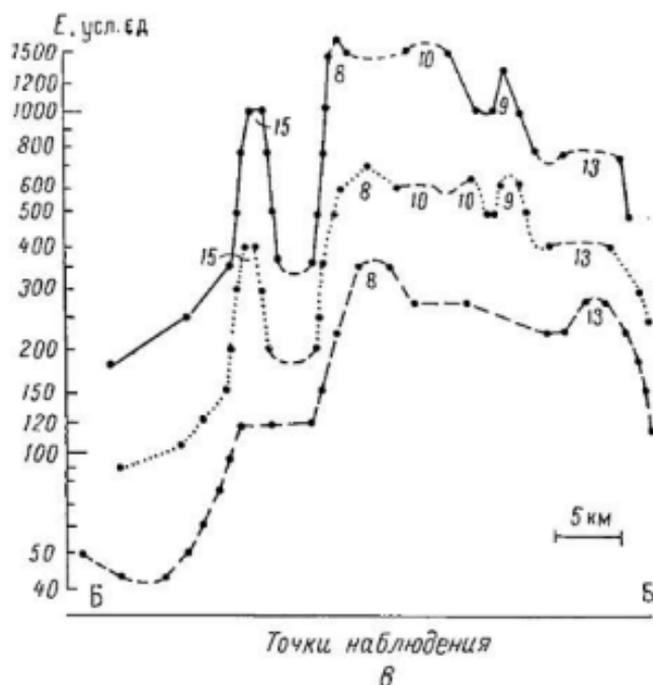


Рис. 51. Карты максимальной (а) и минимальной (б) напряженностей E поля ТТ и профили E_{\max} , E_{\min} , E по линии Б—Б (в) Вуктылско-Ильчского участка Верхнепечорской впадины (по К. С. Морозову и др., 1968 г.).

1 — точки МТЗ и их номера; 2 — изолинии E (в усл. ед.); 3 — аномальные зоны (см. рис. 50); 4 — максимумы E (см. рис. 50); 5, 6 — границы выходов отложений нижней перми и карбона; 7 — профиль E_{\max} ; 8 — профиль E_{\min} ; 9 — профиль E .

Саяно-Енисейская синеклиза (Иркутский амфитеатр) Сибирской платформы. Заслуживают внимания исследования модификациями ТТ, МТЗ и МТП в южной части Сибирской платформы. Большой объем региональных наблюдений ТТ произведен Восточным геофизическим трестом [28]. Исследовано более 195 тыс. км² со средней густотой сети 1 точка на 22 км². Значительная часть территории ранее была заснята с помощью ВЭЗ и ДЗ. Все эти работы обобщены под руководством В. И. Поспеева (Восточно-Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья; Восточный геофизический трест, 1970). Рассмотрим некоторые результаты этих исследований. Ограничимся частью, которая относится к территории Иркутского амфитеатра.

В геоэлектрическом разрезе этой территории (табл. 11), так же как и всего юга Сибирской платформы, отмечается мощный промежуточный высокоомный комплекс II, который служит опорным горизонтом при разведке постоянным током. Экранируя в той

или иной степени нижележащие горизонты, он в случаях неспокойного залегания оказывается опорным и при магнитотеллурических наблюдениях.

Таблица 11

Обобщенный геоэлектрический разрез южной части Сибирской платформы (по В. И. Поснееву, А. В. Пименовой и др.)

| Номер комплекса | Характеристика комплекса | Краткая литологическая характеристика и возраст пород | Мощность, км | Сопротивление, Ом·м |
|-----------------|--------------------------|--|-----------------|--|
| I | Проводящий | Песчано-глинистые отложения четвертичного возраста, мезозоя, перми, девона, силура, ордовика, верхнего кембрия. Широкое развитие высокоомных трапезовых образований преимущественно в ордовике | 0,1—4 | 4—70 |
| II | Высокоомный | Карбонатно-галогенные отложения среднего и нижнего кембрия | 0,5—2,5 и более | 100—200 и более |
| III | Проводящий | Терригенные и карбонатно-терригенные отложения низов нижнего кембрия (терригенная часть мотской свиты, ушаковская свита), верхней части рифея | 0,5—3 | 3—10 при большой мощности; 30—50 при малой |
| IV | Непроводящий | Метаморфизованные породы протерозоя (рифей), кристаллические породы архея | ∞ | ∞ |

В результате обобщения материалов МТЗ и результатов съемки ТТ были получены не только средние значения напряженности E поля ТТ, но и величины E_{\max} и E_{\min} . Известно, что E_{\max} соответствуют значениям напряженности поля ТТ, указываемым в точках наблюдения большой полуосью абсолютного эллипса, которая над линейными структурами обычно направлена по падению пород горизонтально-неоднородного разреза с промежуточным высокоомным экранирующим горизонтом. Предполагается, что изменения E_{\max} связаны преимущественно с изменением суммарной продольной проводимости отложений над экранирующим горизонтом. Однако исследования показали, что в пределах южной части Сибирской платформы значение E_{\max} в региональном плане зависит от проводимости S_1 отложений до некоторой физической границы внутри высокоомного комплекса II. Положение

ее оказывается непостоянным. Оно зависит от углов наклона слоев комплекса и его поперечного сопротивления T^* . С увеличением углов наклона и T^* граница, прослеживаемая значениями E_{\max} , перемещается вверх по разрезу, что влечет за собой уменьшение S_1 и увеличение E_{\max} . В случае больших углов наклона (десятки градусов) при значительном T^* эта граница совпадает с поверхностью комплекса II. На участках, где наклон слоев комплекса II невелик, граница может оказаться в нижней его части или даже за пределами комплекса вплоть до совпадения с поверхностью изолирующего основания (фундамента).

Полученные значения E_{\min} (они соответствуют малой оси полевого эллипса, направленной по простиранию пород) зависят от суммарной продольной проводимости S всей осадочной толщи пород. Изменениями E_{\min} , таким образом, прослеживается преимущественно рельеф поверхности непроводящего основания. Лишь на участках глубокого его погружения, где регистрируемые при наблюдениях ТТ и МТП периоды вариаций поля (от 20 до 50 с) относятся не к интервалу S , а к минимуму кривых МТЗ, значения E_{\min} теряют связь с S . Изменения E на этих участках зависят главным образом от изменения продольного сопротивления ρ_l осадочного чехла.

Средняя напряженность E поля ТТ зависит как от суммарной продольной проводимости всего осадочного чехла, так и от влияния условий залегания экранирующего комплекса II. Поэтому изменения значений E должны в какой-то степени отражать черты рельефа, свойственные поверхностям непроводящего основания и промежуточного высокоомного комплекса II.

По результатам обработки полевых наблюдений были составлены карты средней напряженности E , E_{\max} и E_{\min} . Анализ сравнения значений E и $S_{\text{эф}}$, полученных при МТЗ и МТП, указал на тесную корреляционную связь между этими величинами. Схемы значений E , E_{\max} и E_{\min} для юга Сибирской платформы настолько осложнены многочисленными мелкими локальными аномалиями, что не позволяют уловить региональные особенности изменения поля ТТ. Эти аномалии обусловлены неровностями рельефа пластовых трапцов в районах их развития, дайками этих высокоомных пород, секущими нормальные осадки. Аномалии возникают и на участках с резко выраженной складчатостью верхней части осадочного чехла, в зонах выхода пород с большим сопротивлением на дневную поверхность или в областях тектонических нарушений, трещиноватых зон повышенной проводимости.

При обобщении материалов была применена известная в гравиметрии методика осреднения поля при помощи круговой палетки с радиусом 12 км. Полученные карты характеризуют в основном, региональный фон изменения средней, максимальной и минимальной напряженностей поля ТТ.

Карта средней напряженности регионального поля ТТ, а также профили E , $E_{\text{рег}}$, $E_{\text{рег}}^{\max}$ и $E_{\text{рег}}^{\min}$ для Присяно-Енисейской

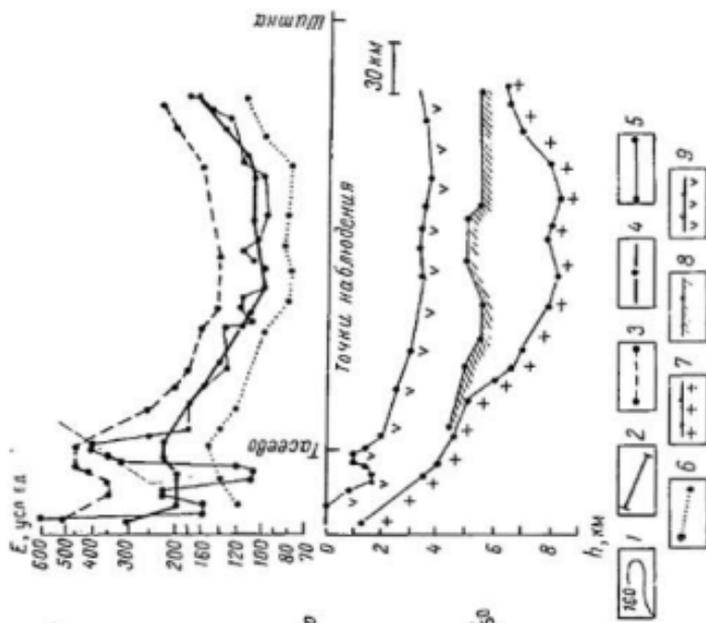
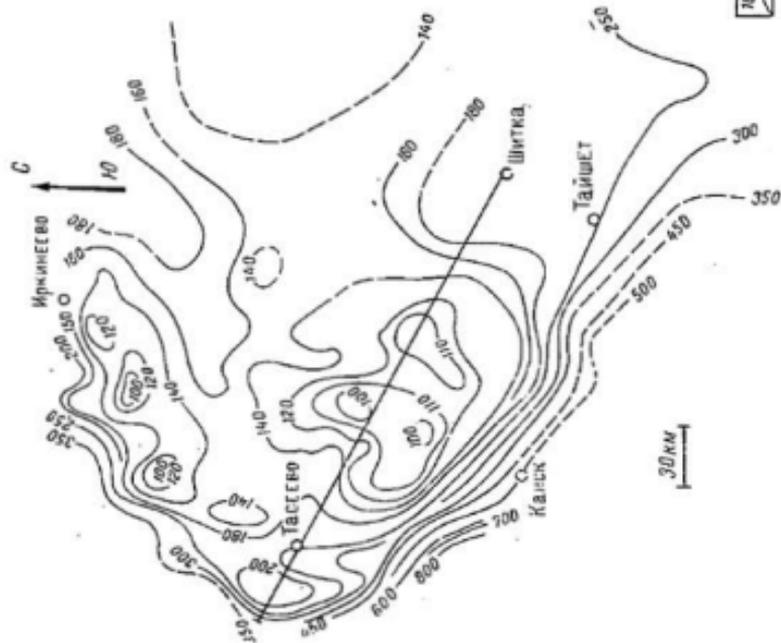


Рис. 52. Карта средней направленности регионального Ерег поля ТТ и профили Е, Ерег, Ерег^{Рег} и Ерег^{Рег} в Приисно-Енисейской синеклизе Иркутского афитагра (по В. И. Послеву и др., 1970 г.).
 1 — изолинии Ерег (в усл. ед.); 2 — линия геоэлектрического разреза; 3 — профиль Ерег^{Рег}; 4 — профиль Ерег^{Рег} — профиль Е; 5 — профиль Ерег^{Рег}; 6 — поверхность Ерег^{Рег}; 7 — поверхность непроводящего основания метаморфизованных пород рифов (?) по данным электроразведки; 8 — поверхность проводящего комплекса III по данным электроразведки; 9 — поверхность высокочастотного комплекса II по данным бурения и сейсморазведки.

синеклизы приведены на рис. 52. По результатам магнитотеллурического исследования для всей южной части Сибирской платформы была проведена количественная интерпретация с использованием данных глубокого бурения и сейсморазведки. На основе графиков корреляционной зависимости $E(S_{эф})$ карта регионального фона средней напряженности $E_{рег}$ поля ТТ была трансформирована в карту $S_{эф}$ (рис. 53).

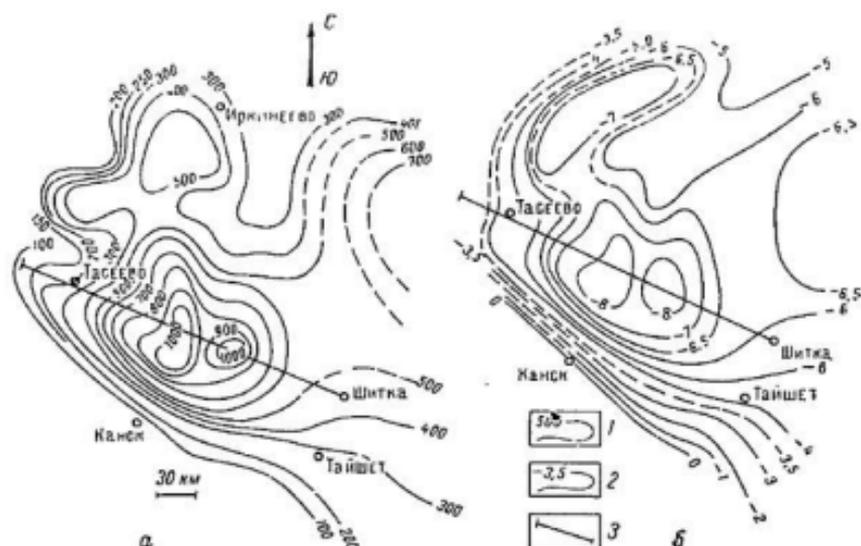


Рис. 53. Карта продольной проводимости $S_{эф}$ (а) и рельефа изолирующего основания (б) по данным МТЗ, МТЦ и наблюдений ТТ в Присяно-Евсейской синеклизе Иркутского амфитеатра (по В. И. Поспелову и др., 1970 г.).

1 — изолинии $S_{эф}$ (в См); 2 — изогипсы поверхности изолирующего основания (в км) по данным электроразведки с учетом данных бурения и сейсморазведки; 3 — линия геоцентрического разреза.

От карты $S_{эф}$ нетрудно перейти к карте рельефа непроводящего основания, если знать значения среднего продольного сопротивления ρ_l осадочного чехла в точках наблюдений. Этот параметр в пределах Иркутского амфитеатра изменяется в широких пределах — от 7—8 Ом·м на западе до 40—50 Ом·м и более на востоке. Установлена достаточно тесная корреляционная связь между ρ_l и $S_{эф}$. График зависимости между этими параметрами позволяет определить ρ_l по известному $S_{эф}$ в точках наблюдения со средней квадратической ошибкой $\pm 10\%$.

Глубины залегания непроводящего основания были вычислены по формуле $h = \rho_l S_{эф}$. Средняя квадратическая погрешность определения глубины не превышает $\pm 15\%$. Корреляционная зависимость между полученными значениями h и осредненными значениями $E_{рег}$ приведена на рис. 54, из которого следует, что по значениям $E_{рег}$ глубины h могут быть определены со средней

квадратической погрешностью $\pm 13\%$. Интересно заметить, что составленные графики корреляционной зависимости $E_{\text{пер}}^{\text{max}}(h)$ и $E_{\text{пер}}^{\text{min}}(h)$ указывают на ту же среднюю квадратическую погрешность, с которой можно определить по ним значения h . График $E_{\text{пер}}(h)$ был положен в основу составления карты рельефа высокоомного основания (см. рис. 53, б), которая имеет много общего с картами $E_{\text{пер}}$ и $S_{\text{эф}}$.

При изучении строения юга Сибирской платформы практически интересно было получить представление о рельефе поверхности проводящих отложений (комплекса III) под карбонатно-галогенным комплексом. Изучение корреляционной связи между значениями $E_{\text{пер}}$ и глубинами h_{12} залегания комплекса III по данным глубокого бурения и сейсморазведки позволило построить график $E_{\text{пер}}(h_{12})$, по которому, зная $E_{\text{пер}}$, можно определить h_{12} со средней квадратической погрешностью $\pm 12\%$. С несколько большей средней квадратической ошибкой ($\pm 15\%$) определяется h_{12} по графикам корреляционной зависимости $E_{\text{пер}}^{\text{max}}(h_{12})$ и $E_{\text{пер}}^{\text{min}}(h_{12})$. Карта рельефа поверхности проводящего комплекса III, полученная по графику зависимости $E_{\text{пер}}(h_{12})$, в общих чертах мало отличается от карты рельефа изолирующего основания, но на некоторых участках отмечает особенности строения поверхности проводящего комплекса.

В поведении поверхностей основного опорного горизонта (вероятно, поверхности метаморфизованных рифейских образований)

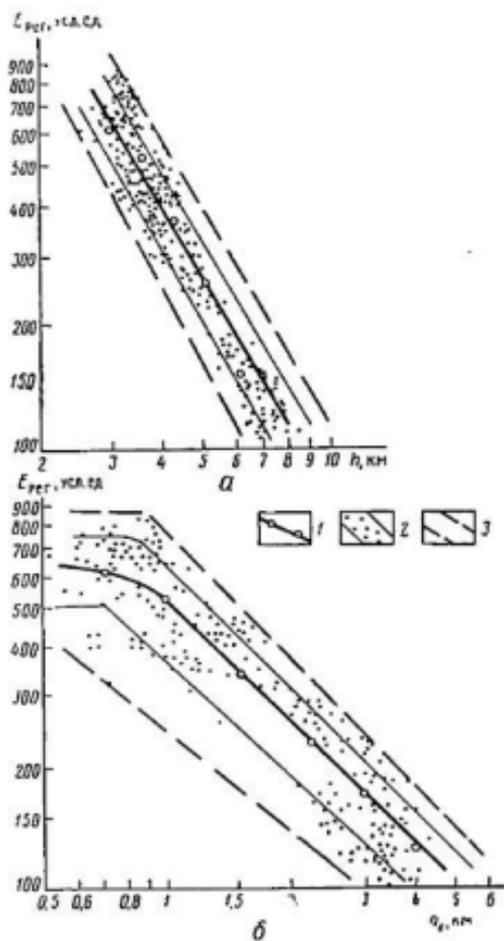


Рис. 54. Корреляционные зависимости $E_{\text{пер}}(h)$ (а) и $E_{\text{пер}}(h_{12})$ (б) (по В. И. Поспеву).

1 — графики корреляции по точкам осреднения; 2 — области разброса 70% точек, где средняя квадратическая ошибка при определении h составляет $\pm 13\%$, при определении h_{12} — $\pm 22\%$; 3 — границы разброса точек.

и проводящего комплекса III по линии Тасеево — Шитка наблюдается некоторое различие (см. рис. 52). Следует заметить, что попытка построения карты рельефа комплекса II, по данным магнитотеллурического исследования, оказалась неудачной из-за очень слабой корреляционной связи между значениями напряженностей $E_{\text{пер}}$, $E_{\text{пер}}^{\text{max}}$, $E_{\text{пер}}^{\text{min}}$ и глубинами h_1 залегания этого комплекса. На рис. 54, б представлен график корреляционной зависимости $E_{\text{пер}}$ (h_1). Большой разброс точек приводит к значительной средней квадратической ошибке ($\pm 22\%$) в определении h_1 по $E_{\text{пер}}$ (h_1). Еще бóльшая средняя квадратическая ошибка ($\pm 30\%$) получается при определении h_1 по графику зависимости $E_{\text{пер}}^{\text{max}}$ (h_1). Поэтому исключена возможность перехода от схем напряженности поля ТТ к схемам рельефа поверхности промежуточного высокоомного комплекса. Этого по существу и следовало ожидать, опираясь на упомянутый ранее вывод о связи изменений E_{max} (и, следовательно, E) не с рельефом комплекса II, а с изменением положения некоторой поверхности, перемещающейся в пределах комплекса в зависимости от поперечного сопротивления и условий залегания.

Таким образом, на основании обобщенных материалов наблюдений ТТ юга Сибирской платформы можно заключить, что изменения напряженностей E , E_{max} , E_{min} отражают преимущественно рельеф непроводящего основания разреза (рифейского и более раннего возраста). Связь же изменения E_{max} с рельефом промежуточного экранирующего карбонатно-галогенного комплекса в общем весьма слаба, и лишь на участках беспокойного его залегания (большие углы падения) изменения E_{max} отражают изменения рельефа высокоомного комплекса. При этом, однако, последний должен быть погружен более чем на 1 км: при меньших глубинах (см. рис. 54) изменение рельефа поверхности комплекса не отражается на напряженности поля ТТ. Это можно объяснить тем, что суммарная проводимость осадков над высокоомным комплексом при неглубоком его залегании связана не столько с изменением мощности, сколько с изменением их среднего продольного сопротивления, от которого в рассматриваемых условиях мало зависит изменение напряженности поля. Приведенные схемы могут служить исходным материалом для последующего изучения Сибирской платформы.

Центральная часть Вилюйской синеклизы Сибирской платформы. Остановимся на примере использования результатов наблюдений ТТ для изучения рельефа не изолирующего основания, как во всех предыдущих случаях, а рельефа толщи низкоомных отложений. Эти работы [41] выполнялись на территории центральной части Вилюйской синеклизы (Якутская АССР) с 1961 г. под руководством И. А. Яковлева (ВНИИГеофизика).

Геозлектрический разрез в районе исследования сводится к обобщенному трехслойному, в котором верхний слой сложен песчано-глинистыми породами мезозоя мощностью от 2 до 4 км

и более с сопротивлением 30—50 Ом·м. Верхнюю часть слоя представляют многолетнемерзлые породы мощностью до сотен метров с очень большим сопротивлением. Ко второму — проводящему песчано-глинистому слою мощностью 1,5—2 км и сопротивлением

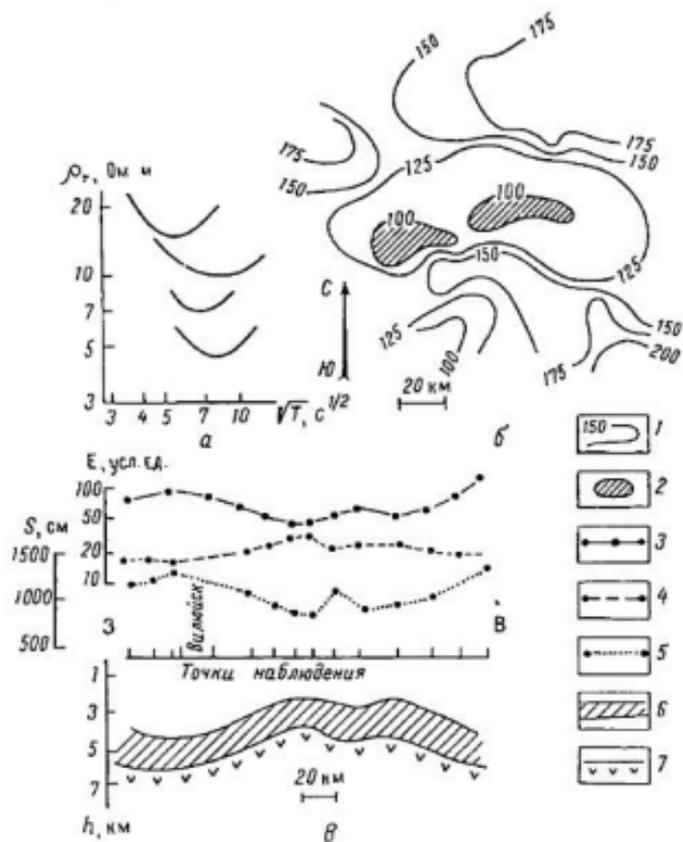


Рис. 55. Результаты исследований модификациями ТТ, МТП, МТЗ в центральной части Вилуйской синеклизы (по И. А. Яковлеву, 1961—1963 гг.).

а — кривые $\rho_{Tэф}$; б — карта средней напряженности E поля ТТ, отражающая рельеф проводящей толщи разреза; в — геоэлектрический разрез по р. Вилуйе;

1 — изолинии E (в усл. ед.); 2 — минимумы E (подллия проводящей толщи); 3 — профиль E_A ; 4 — профиль E_S ; 5 — профиль S ; 6 — толщина проводящих отложений (триас, верхний палеозой); 7 — поверхность высокоомного комплекса (нижний палеозой).

1—3 Ом·м относится часть отложений мезозойского возраста (триас) и верхне-среднепалеозойские осадки, насыщенные сильно минерализованными водами. Третий слой большой мощности, предположительно представляющий высокоомный горизонт, сложен галогенно-карбонатными породами нижнепалеозойского возраста.

Кривые МТЗ на изучаемой площади показывают, что вариации поля ТТ в диапазоне обычно регистрируемых периодов (от 10 до 60 с) относятся преимущественно к нисходящей ветви (рис. 55, а). Это позволило И. А. Яковлеву считать опорным горизонтом, прослеживаемым с помощью наблюдений ТТ, проводящую толщу разреза осадочной толщи. В указанных условиях при сочетании регистрации поля ТТ и МТЗ обрабатывались лишь те записи вариаций поля, периоды которых заведомо относятся к нисходящей ветви кривых ρ_T (интервалу h).

Полученная карта средней напряженности E поля ТТ (рис. 55, б) отражает рельеф поверхности проводящего горизонта. Как указывалось ранее, интерпретация такой карты противоположна истолкованию карты, отмечающей поведение поверхности высокоомного опорного горизонта. Повышенные значения E соответствуют прогибанию поверхности проводящего горизонта, пониженные — поднятию. В частности, минимальными значениями E (100 усл. ед. и менее) на рассматриваемой карте отмечается поднятие, которое известно в настоящее время по результатам сейсморазведки и бурения как Средневилюйское.

Легко представить себе, что если подвергнуть обработке вариации поля с периодами, которые относятся к восходящей ветви кривых (интервалу S), то полученные значения средней напряженности E поля ТТ будут отражать рельеф высокоомного основания (галогенно-карбонатной толщи нижнего палеозоя).

На рис. 55, в приведен геoeлектрический разрез в том же районе, построенный по данным модификаций ТТ, МТЗ, МТП. Последние позволили определить суммарную продольную проводимость S разреза по всему маршруту. Значения средней напряженности E поля ТТ определены по периодам вариаций в интервалах (E_h) и (E_S). Приближенное количественное истолкование кривых ρ_T по нисходящей и восходящей ветвям в сочетании с данными МТП позволило получить представление о рельефе поверхностей как проводящей толщи, так и высокоомного основания. Отмечается согласное залегание обеих поверхностей. Перегиб слоев относится к Средневилюйскому поднятию.

Г Л А В А IV

МАГНИТОВАРИАЦИОННАЯ РАЗВЕДКА (МВР) И КОМБИНИРОВАННОЕ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОЕ ПРОФИЛИРОВАНИЕ (КМТП)

ОСНОВЫ МЕТОДИКИ МВР, КМТП И ИНТЕРПРЕТАЦИИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Магнитовариационная разведка отличается от модификации ТТ тем, что в основу ее положено изучение не электрической, а магнитной компоненты переменного электромагнитного поля Земли. Вариации горизонтальных составляющих H_x , H_y магнитного поля регистрируются синхронно в базисной p и полевой q точках, обрабатываются так же, как и при наблюдениях ТТ.

Параметр N . Средняя магнитная напряженность поля. Результаты обработки записей позволяют определить в каждой точке наблюдений параметр $N = H_{q\text{эф}}/H_{p\text{эф}}$, аналогично тому, как при исследовании ТТ определяется параметр K . По значению N вычисляется средняя (эффективная) напряженность $H_{\text{эф}}$ геомагнитного поля в этих точках (подобно тому, как по параметру K при исследованиях ТТ определяется эффективная напряженность электрического поля). Значения эффективной напряженности $H_{\text{эф}}$ вычисляются (так же, как и $E_{\text{эф}}$) в условных единицах, причем значения $H_{\text{эф}}$ в базисных точках принимают за 100 усл. ед.

Значения эффективной напряженности $E_{\text{эф}}$ поля связаны с суммарной продольной проводимостью S толщи пород, залегающих над опорным горизонтом большого сопротивления, обратной зависимостью, а значения $H_{\text{эф}}$ и S — прямой. Кроме того, следует подчеркнуть, что с изменением S магнитная напряженность поля изменяется значительно менее интенсивно, чем электрическая. Например, при многократном увеличении S магнитная напряженность может увеличиться всего лишь на 10—20 %, в то время как степень уменьшения электрической напряженности приблизительно соответствует степени увеличения S . Поэтому разрешающая способность МВР значительно ниже, чем модификации ТТ.

С другой стороны, на результаты МВР слабее, чем на результаты наблюдений ТТ, влияют промежуточные высокоомные экраны в проводящем разрезе. Карта $H_{эф}$ поэтому может дать более достоверное представление о рельефе непроводящего основания, чем карта $E_{эф}$, которая может быть сильно искажена влиянием неровностей рельефа промежуточного высокоомного горизонта.

К настоящему времени выполнено очень мало работ в модификации МВР. Можно указать лишь на единичные исследования в Балтийской и Днепровско-Донецкой впадинах, в Западной Сибири и некоторых других районах. Работы эти производились попутно с наблюдениями КМТП, ТТ, МТП, МТЗ и самостоятельного значения не имеют. Рассмотрим в качестве примера результат небольших опытных работ МВР и МТП на восточном борту Балтийской впадины (профиль Друскининкай — Каунас — Советск). Впадина выполнена проводящими терригенными отложениями палеозоя и мезозоя. Галогенно-карбонатные осадки в разрезе на изучаемом участке большой роли не играют. Мощность осадочного чехла, по данным бурения и сейсморазведки, увеличивается от Друскининкай (0,4 км) к Советску (2,1 км). По этому же направлению значительно уменьшается среднее продольное сопротивление ρ_l осадочных пород, что благоприятствует применению электроразведки.

По результатам МТП суммарная продольная проводимость S пород увеличивается в пределах профиля от 30 до 790 См (рис. 56), а средняя магнитная напряженность H поля, по данным МВР, возрастает от 100 до 142 усл. ед., т. е. всего на 42%. Исследование ТТ показывает на этом участке уменьшение средней напряженности E более чем в 4 раза. Таким образом, изменение H по профилю отражает рельеф фундамента, но в значительно меньшей степени, чем изменения S и E .

Комбинированное магнитотеллурическое профилирование (КМТП). Комплексное применение модификаций ТТ, МТП и МВР привело к идее комбинированного магнитотеллурического профилирования [4, 6]. Так названа модификация, сочетающая методики наблюдений ГТ, магнитовариационной разведки и магнитотеллурического профилирования. При КМТП синхронно в базисной и полевой точках регистрируют короткопериодные вариации горизонтальных составляющих E_x , E_y , H_x , H_y электрического и магнитного полей Земли. Обработка наблюдений приводит к определению трех величин: эффективных (средних) напряженностей электрического $E_{эф}$ и магнитного $H_{эф}$ полей и суммарной продольной проводимости $S_{эф}$ толщи отложений над опорным горизонтом большого сопротивления. Для упрощения в дальнейшем не будем вводить индекс, подразумевая всегда под E , H , S эффективные значения этих параметров.

При обработке записей КМТП используются колебания практически любой (не только синусоидальной) формы, что сокращает длительность наблюдений по сравнению с записью МТП. Этим

обстоятельством, а также расширением одновременно получаемой информации определяется преимущество модификации КМТП перед МТП и модификацией ТТ, отдельно взятых. Производительность КМТП та же, что и модификации ТТ. Стоимость точки КМТП при площадной съемке приблизительно в полтора — два раза меньше стоимости точки МТП, несколько превышая, однако (на 15—20%), стоимость точки наблюдений ТТ. Для применения

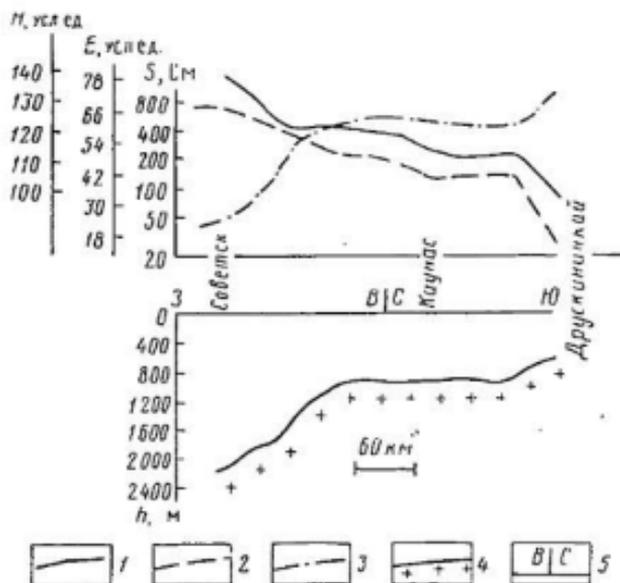


Рис. 56. Результаты электроразведки по профилю Советск—Каунас—Друскининкай (по М. Н. Бердичевскому, 1959 г.).

1 — профиль H по данным МВР; 2 — профиль S по данным МТП; 3 — профиль E ; 4 — поверхность фундамента по данным бурения и сейсморазведки; 5 — излом линии профиля

КМТП остаются благоприятными те же условия, что и для МТП. Одно из них заключается в необходимости, чтобы колебания с периодами T от 10 до 80 с входили в главный интервал МТП (или интервал S).

При выполнении КМТП по результатам записи в базисных точках получают восходящие ветви кривых МТЗ, по которым определяют значения суммарной продольной проводимости S и сопротивления ρ_n опорного горизонта. Они являются исходными для дальнейших вычислений. По найденным значениям напряженности электрического и магнитного полей в точках p и q вычисляются параметры K и N , а по ним — значения E и H .

Значения S_q в полевых точках вычисляются по выражению, называемому формулой КМТП: $S_q = (N/K) S_p + 796 \left(\frac{N}{K} - 1 \right) \sqrt{T/\rho_n}$,

где T — средний период вариаций поля, принятый при обработке. Если $\rho_n = \infty$, то $S_q = (N/K) S_p$ определяется с точностью, вполне достаточной для практики.

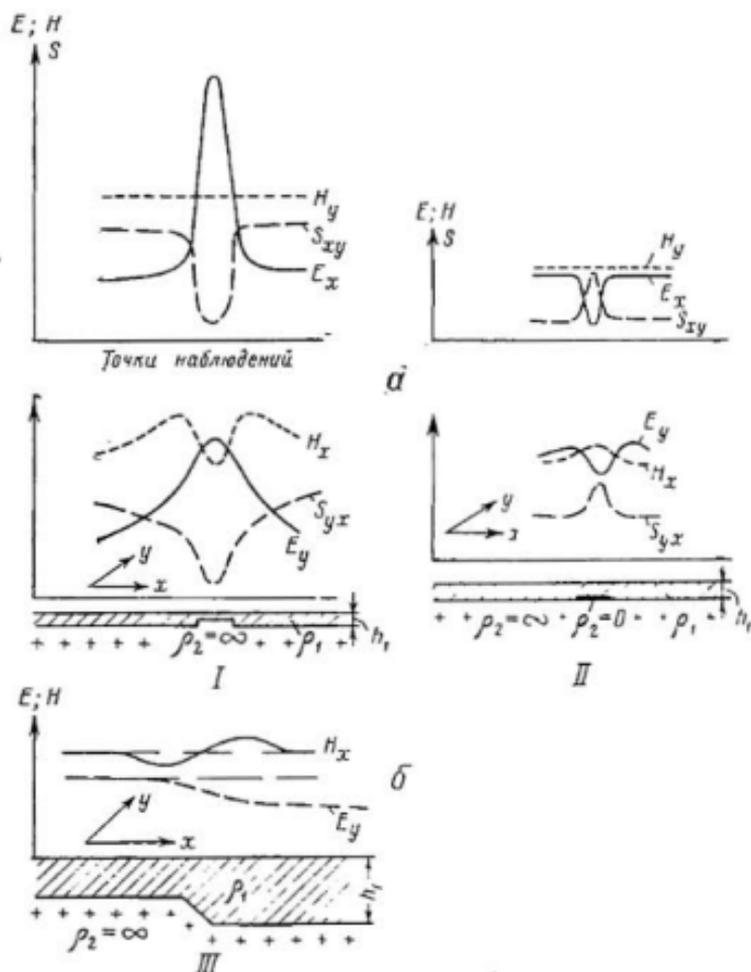


Рис. 57. Графики напряженности магнитного H и электрического E полей и суммарной продольной проводимости S над моделями выступа (I), грабена (II) (по В. Е. Брюнелли и др.) и наклонного уступа (III) (по М. Н. Бердичевскому).

α — H -поляризованное поле; β — E -поляризованное поле.

Отчетные карты КМТП. Результаты работ по КМТП представляются тремя картами S , E , H . При исследовании разреза, в котором нет промежуточных толщ большого сопротивления, основной обычно служит карта S ; две другие дополняют ее. Максимумам S соответствуют минимумы E и максимумы H , а минимумам S — максимумы E и минимумы H . Ранее уже указыва-

лось, что параметр E имеет почти такую же чувствительность к изменениям разреза, как и S , а H во много раз меньшую.

Сопоставление карт E и H весьма полезно в районах, где проводящий разрез осложнен промежуточной высокоомной толщей. На горизонтальную компоненту магнитного поля слабое влияние оказывает рельеф этой толщи, поэтому карта H отражает главным образом поведение поверхности изолирующего основания. Карта E может быть значительно искажена аномалиями, вызываемыми неровностями рельефа промежуточной высокоомной толщи. Отсюда следует, что карты E и H , рассматриваемые совместно, могут дать представление о соотношениях рельефа промежуточной толщи и изолирующего основания. Карта S отразит в той или иной степени сочетание особенностей изменения рельефа обеих поверхностей.

Некоторые результаты лабораторных и вычислительных работ по КМТП. Прежде чем перейти к практическим примерам КМТП, посмотрим, как изменяются профили напряженностей составляющих электрического и магнитного полей, а также значений S вкrest простейших структур большого протяжения [25] по результатам лабораторных исследований (Б. Е. Брюнелли, М. А. Добровольская, А. А. Ковтун, Н. С. Кузнецов и др.; кафедра физики Земли ИГУ).

Из рис. 57, I следует, что над протяженным выступом изолирующего горизонта, перекрытым проводящей толщей, при H -поляризованном поле отмечаются отчетливые максимум E_x и минимум S_{xy} . Составляющая же H_y выступ не отмечает. При E -поляризованном поле выступ отмечается всеми тремя профилями: максимумом E_y , минимумами S_{yx} и H_x . Профили E_y и S_{yx} более расплывчаты, чем профили E_x и S_{xy} . Профиль H_x отличается двумя характерными симметричными максимумами над вертикальными гранями выступа.

Моделирование вкrest длинной весьма проводящей полосы, помещенной на границе между изолирующим основанием и проводящей толщей (рис. 57, II), показывает, что эта полоса, имитирующая грабен, выполненный породами большой проводимости, четко отмечается при H -поляризованном поле минимумом E_x , максимумом S_{xy} и не прослеживается профилем H_y . При E -поляризованном поле грабен прослеживается всеми тремя профилями: минимумом E_y , максимумами S_{yx} и H_x . Из этих профилей первые два менее четко выражены, чем профили E_x и S_{xy} при H -поляризованном поле.

При E -поляризованном поле над протяженным наклонным уступом непроводящего основания $\rho_2 = \infty$, перекрытого однородной средой ρ_1 (рис. 57, III), образуется минимум H_x над приподнятой и максимум H_x над опущенной частью уступа. Значения E_y плавно уменьшаются от приподнятой к опущенной части уступа. Почти зеркальным изображением профиля E_y является профиль S_{xy} , не отмеченный на рисунке.

Таким образом, если на карте E отмечается максимум, не сопровождаемый минимумом H , то маловероятна связь этого максимума с поднятием высокоомного опорного горизонта даже при минимуме S . Точно так же минимум E , не подтверждаемый максимумом H , нельзя связывать с погружением опорного горизонта. Резкий переход профиля H от минимума к максимуму при плавном уменьшении E и увеличении S можно с достаточной уверенностью интерпретировать как отражение уступа опорного горизонта или пологого борта широкой впадины.

ПРИМЕРЫ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ КМТП

Исследования с помощью модификации КМТП были начаты сравнительно недавно (с 1964 г.). Объем их к настоящему времени составляет всего лишь около 2,5 тыс. точек. КМТП применяется пока преимущественно на территории Русской плиты. Небольшое количество работ выполнено также в Печорской синеклизе.

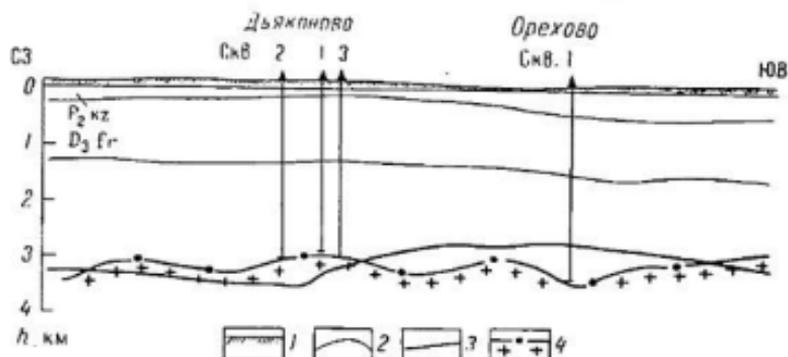


Рис. 58. Результаты электроразведки и сейсморазведки по профилю Дьяконово—Орехово (по А. Л. Шейнкману).

1 — линия профиля; 2 — стратиграфические поверхности по данным бурения; 3 — поверхность фундамента по данным сейсморазведки; 4 — то же, по данным электроразведки (КМТП, МТЗ).

Центральная часть Московской синеклизы. В этом районе Центральным геофизическим трестом выполнено много работ магнитотеллурическим методом. Большой интерес представляет сравнение результатов электроразведки (в основном КМТП, опорное МТЗ) с данными сейсморазведки на Дьяконовской площади (рис. 58). Здесь в 1967 г. на основании исследований КМПВ был получен (Е. Н. Розенберг) профиль, отмечающий рельеф фундамента. Этот профиль резко отличается от профиля, составленного А. Л. Шейнкманом в 1968 г. по результатам КМТП и МТЗ. Данные бурения в Орехове (1969 г.) и Дьяконове (1970, 1971 гг.) больше соответствуют результатам электроразведки, чем сейсморазведки (см. рис. 58).

В табл. 12 приведены глубины залегания фундамента и год, когда они были получены. Как видим, данные электроразведки отличаются здесь, за исключением районов Галича и Рослятино, вполне достаточной точностью.

Таблица 12

Глубина залегания фундамента по данным бурения, сейсморазведки и электроразведки в Московской синеклизе (по А. Л. Шейнкману)

| Площадь исследования и номер скважины | Бурение | | Данные сейсморазведки (КМПВ) | | Данные электроразведки (магнитотеллурический метод) | |
|--|----------------|------|---------------------------------|------|---|------|
| | глубина, км | год | глубина, км | год | глубина, км | год |
| Дьяконово, 1 | 2,99 | 1970 | 73,3 | 1969 | 3,0 | 1968 |
| Дьяконово, 2 | 3,18 * | 1971 | 3,5 | 1969 | 3,1 | 1968 |
| Дьяконово, 3 | 3,10 | 1971 | 3,2 | 1969 | 3,0 | 1968 |
| Орехово, 1 | 3,39 ** | 1969 | 2,9 | 1969 | 3,5 | 1968 |
| Тотьма | 2,68 | 1971 | 2,6 | 1969 | 2,7 | 1968 |
| Посехонье | 2,82 | 1969 | — | — | 2,8 | 1968 |
| Нея, 1 | 2,99 | 1971 | 3,0 | 1969 | 3,1 | 1966 |
| Нея, 2 | 2,90 | 1972 | 2,9 | 1969 | 3,0 | 1966 |
| Галич | 3,60 | 1972 | 3,4 | 1969 | 3,2 | 1968 |
| Рослятино | 4,39 * | 1971 | 4,3 | 1969 | >3,8 | 1968 |

* Забой в рифее (R).

** Забой в венде (V).

Северо-западная часть Печорской синеклизы. Приведем пример профильного исследования модификацией КМТП, относящийся к северной части Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции. Работы выполнены в 1970 г. Г. С. Габляной, О. А. Жарковой, Г. С. Савицкой и др. [Комплексная геофизическая экспедиция Ухтинского территориального геологического управления (УТГУ)]. Пример интересен тем, что профилирование производилось по маршруту, изученному сейсморазведкой КМПВ и МОВ (А. Л. Кокоско, УТГУ, 1968). Это позволяет до некоторой степени оценить возможности модификации КМТП при изучении рельефа поверхности высокоомных горизонтов.

Исследованный маршрут длиной около 120 км проложен в низовье р. Печоры с юго-запада на северо-восток в 11—12 км к востоку от г. Нарьян-Мара. Северо-восточное окончание маршрута лежит в 7—8 км от берега Печорского моря. Профиль пересекает ряд известных в региональном плане протяженных структур: северо-восточный склон Седухинского поднятия Ижма-Печорской впадины, Нарьян-Марский выступ, Шапкино-Юрьяхинский и Лайский валы (Деписовская впадина) с погружениями между

нами. В пределах этих крупных вытянутых в субмеридиональном направлении структур сейсморазведкой намечаются области локальных поднятий и погружений. Глубины залегания высокоомного непроводящего основания (складчатого фундамента рифейского возраста) по маршруту оцениваются от 2,5—3 км на юго-западе до 5,5—6 км на северо-востоке. Обобщенный геоэлектрический разрез района исследования представляется как шестислойный (табл. 13).

Таблица 13

Обобщенный геоэлектрический разрез северной части
Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции (по Г. С. Габлиной и др.)

| Номер комплекса | Характеристика комплекса | Литологическая характеристика и возраст пород | Мощность, км | Сопротивление, Ом·м |
|-----------------|---------------------------|--|--------------------------|-----------------------|
| I | Проводящий | Песчано-глинистые осадки кайнозоя, мезозоя, верхней и частично нижней перми | 0,9—2,5 | Единицы |
| II | Повышенного сопротивления | Преимущественно карбонатные отложения нижней перми, карбона, части верхнего девона | 1,5—2,3 | Десятки, первые сотни |
| III | Проводящий | Преимущественно терригенные осадки верхнего и среднего девона | До 0,6 и более (?) | 10—15 |
| IV | Высокоомный | Карбонатные осадки нижнего девона, силура | До 1 и более (?) | Сотни |
| V | Проводящий | Терригенные осадки досилурейского возраста (ордовик?) | от 0 до сотен метров (?) | 2—5 и более |
| VI | Непроводящий | Метаморфические сланцы рифейского возраста | ∞ | Сотни, тысячи |

Комплексы II и IV при относительно малой мощности комплекса III могут отмечаться как единый высокоомный горизонт. Если при этом из разреза выпадает или замещается отложениями большого сопротивления комплекс V, то разрез становится трехслойным с высокоомной толщей над изолирующим основанием (комплексом VI). Опорным горизонтом, прослеживаемым ВЭЗ, служит комплекс II. При магнитотеллурических исследованиях опорным изолирующим основанием оказывается фундамент. В случае, когда из разреза выпадает проводящий комплекс V или он

замещается высокоомными осадками, поверхность изолирующего основания перемещается к кровле комплекса IV.

КМТП выполнялось по маршруту в основном с шагом 3 км. Магнитометры и оси установки для наблюдения электрической составляющей ориентировались по простиранию (ось y) и вкрест простирания (ось x) структур. Азимут осей составлял соответственно $155-160^\circ$ и $65-70^\circ$. Кривые МТЗ, полученные по наблюдениям в базисных пунктах 1, 2 и точках 38, 6 и 92, приведены на рис. 59, а. Расположение этих точек указано на рис. 59, б. Как видим, кривые ρ_T^\perp (или ρ_{Txy}) и ρ_T^\parallel (или ρ_{Tyx}) незначительно отличаются друг от друга. Правые ветви их наклонены под углом около 63° к оси абсцисс. Почти во всех случаях $\rho_T^\perp > \rho_T^\parallel$, т. е. $S^\perp < S^\parallel$. Значения S^\perp , S^\parallel и S (S_{ϕ}), определенные по кривым МТЗ, указаны в табл. 14.

Таблица 14

Результаты интерпретации кривых МТЗ

| Номер точки МТЗ | S^\perp , См | S^\parallel , См | S , См | h , км | ρ_l , Ом·м |
|-----------------|----------------|--------------------|----------|----------|-----------------|
| 1 | 660 | 820 | 730 | 4,9 | 6,7 |
| 38 | 640 | 780 | 750 | 5,4 | 7,3 |
| 6 | 710 | 750 | 740 | 4,7 | 6,4 |
| 92 | 680 | 640 | 680 | 5,5 | 8,1 |
| 2 | 590 | 750 | 640 | 6,1 | 9,6 |

По известным глубинам до фундамента (данные КМПВ) в точках МТЗ были определены значения среднего продольного сопротивления ρ_l осадочной толщи. Как видно, ρ_l не остается постоянным, увеличиваясь с погружением фундамента. Эта закономерность относится ко всему маршруту исследования. Кривые ρ_T^\parallel в точках МТЗ 6, 92 и 2 характеризуются некоторым перегибом правой ветви. Возможно, это указывает на существование проводящей толщи в разрезе (комплекса V), которая не отмечается в районе точек 38, 1, где кривые имеют вид, отражающий трехслойный разрез с промежуточным горизонтом повышенного сопротивления.

В итоге обработки наблюдений в базисных и полевых точках были вычислены по известным формулам КМТП и МТП значения суммарной продольной проводимости осадочной толщи S , S_{\max} и S_{\min} . Имея в виду взаимоотношение полученных кривых ρ_T^\perp и ρ_T^\parallel , можно предположить, что значения S_{\max} получены при E -поляризованном поле (по простиранию пород): $S_{\max} = S^\parallel$, а значения S_{\min} при H -поляризованном поле (вкрест простирания): $S_{\min} = S^\perp$.

Обработка наблюдений с использованием ЭВМ (Минск-22) позволила построить абсолютные эллипсы в точках исследования и получить значения электрической и магнитной напряженности поля: E_{\max} , E_{\min} , E ; H_{\max} , H_{\min} , H . Большие полуоси эллипсов, соответствующих электрической составляющей поля, как и следует ожидать, по взаимоотношению кривых ρ_T^{\perp} и ρ_T^{\parallel} оказались направлены вкост простирания пород (азимут $50-70^\circ$) и определяют значения E_{\max} в точках наблюдения. Значения E_{\min} определяются малыми полуосями эллипсов, направленными по простиранию пород. Большие полуоси эллипсов, построенных по магнитной составляющей поля (азимуты их в пределах $140-160^\circ$), определяют значения H_{\max} , малые — значения H_{\min} . Профили полученных параметров по маршруту показаны на рис. 59, б.

Рассмотрение помимо средних (эффективных) еще и дополнительных параметров поля (максимальных и минимальных), как мы знаем, весьма полезно при изучении горизонтально-неоднородных разрезов с промежуточным экраном. В этом случае эффективные параметры могут быть сильно искажены. Нам известно, что в условиях геологического строения районов, которое характеризуется протяженными структурами изолирующего основания разреза, изменение получаемых значений E^{\perp} , S^{\perp} (при H -поляризованном поле) более отчетливо отражает рельеф промежуточной экранирующей толщи, чем рельеф изолирующего основания (фундамента). При E -поляризованном поле, наоборот, изменение E^{\parallel} , S^{\parallel} более тесно связано с рельефом фундамента, чем промежуточного экрана. На изменениях же эффективных значений E , S будут сказываться в какой-то степени и рельеф фундамента и рельеф промежуточной высокоомной толщи, что лишает результат исследования этих изменений значительной доли определенности. По исследуемому маршруту значения E_{\max} и соответственно S_{\min} получены при H -поляризованном поле ($E_{\max} = E^{\perp}$; $S_{\min} = S^{\perp}$), а E_{\min} и соответственно S_{\max} — при E -поляризованном поле ($E_{\min} = E^{\parallel}$; $S_{\max} = S^{\parallel}$). Поэтому можно предположить, что в этих условиях E_{\max} и S_{\min} в наибольшей степени будут отражать рельеф промежуточного высокоомного комплекса II, а E_{\min} и S_{\max} — рельеф поверхности изолирующего основания (фундамента). Что касается напряженности магнитного поля, то изменения

Рис. 59. Результаты КМТП по маршруту в северо-западной части Печорской свеклы и данные сейсморазведки (по Г. С. Габлиной и др., 1970 г.). а — кривые МТЗ; б — профили ρ_T , суммарной продольной проводимости разреза, электрической и магнитной напряженности поля.

1 — точки КМТП и их номера; 2 — точки МТЗ и их номера; 3 — профили H^{\perp} , E^{\perp} и S^{\perp} ; 4 — профили H^{\parallel} , E^{\parallel} и S^{\parallel} ; 5 — профили H , E и S ; 6 — профиль ρ_T . Поверхности по данным сейсморазведки: 7 — карбонатной толщи перми и карбона; 8 — силура; 9 — метаморфического складчатого фундамента. Структуры по фундаменту и осадочной толще: I, I' — северо-восточный склон Седуянского поднятия; II — глубинный разлом; III — Нарьян-Марское погружение; VI, IV' — Нарьян-Марское поднятие; V, V' — поднятие Удэлюс; VI, VI' — поднятие Васильковское; VII — Тьбейское погружение; VIII — зона, связанная, вероятно, с уменьшением сопротивления пород в верхней части фундамента; IX — Лайское поднятие; X — возможное поднятие силурійских отложений, не отраженное в фундаменте и верхнем палеозое.

величин H_{\max} , H_{\min} , H должны отражать рельеф непроводящего основания; теоретически они не зависят от неровностей поверхности экрана.

Рассмотрим результаты исследования по маршруту (рис. 59, б). Будем сопоставлять их с данными сейсморазведки о глубинах залегания фундамента и поверхности верхнего сейсмического опорного горизонта, за который можно приближенно принять высокоомный комплекс *II*. Вычисленное среднее продольное сопротивление ρ_l осадочных пород по маршруту в общем возрастает в северо-восточном направлении от 4 до 8—10 Ом·м. При этом отчетливо заметно увеличение ρ_l в областях погружения фундамента и уменьшение на поднятиях. Такое изменение ρ_l обычно не благоприятствует прослеживанию рельефа фундамента с помощью электроразведки: наблюдаемые значения E и особенно S могут значительно сглаживаться из-за влияния ρ_l .

Проследим за рельефом фундамента и профилями E^{\parallel} , S^{\parallel} и H^{\parallel} .

Переход от Седухинского поднятия фундамента *I* к резкому Нарьян-Марскому погружению *III* отмечается значительным уменьшением E^{\parallel} и увеличением S^{\parallel} (точки КМТП 2,3 МТЗ 38). Глубинный разлом *II* не находит явного отражения на профилях E^{\parallel} и S^{\parallel} . Но уступ фундамента хорошо отражается на профиле H^{\parallel} , что вполне согласуется с теоретическим графиком магнитной напряженности для модели уступа при E -поляризованном поле (см. рис. 57).

Нарьян-Марское поднятие фундамента *IV* достаточно отчетливо отмечается максимумом E^{\parallel} и минимумом S^{\parallel} . Несколько приподнятое залегание фундамента *V* далее к северо-востоку находит некоторое отражение лишь на профиле S^{\parallel} . Следующее к северо-востоку Василковское поднятие *VI* отмечается на профиле E^{\parallel} (точка КМТП 40). Профиль S^{\parallel} претерпевает здесь резкие изменения. Далее к северо-востоку уменьшение E^{\parallel} в точке 91 вызывает представление о значительном погружении фундамента; это согласуется с сейсморазведочными данными (погружение *VII* фундамента). Предполагается, что оно соответствует опущенному блоку фундамента с тектоническим нарушением близ точки КМТП 40. Заметим, что профили магнитной напряженности поля в точках 93, 40—96 можно толковать как четко отражающие уступ фундамента с приподнятым его залеганием в районе точек 93, 40 и погружением к северо-востоку от точки 40. Эта часть (*VI—VII*) всех трех профилей H^{\parallel} схожа с участком *II—III* профиля H^{\parallel} , отмечающим уступ фундамента. Опускание фундамента *VII* не находит отражения на профиле S^{\parallel} . Вероятно, это связано со значительным увеличением здесь ρ_l .

Сейсморазведка в зоне *VII* отмечает близ окончания маршрута прогиб небольшой амплитуды (пункт КМТП 42). Сразу же за ним наблюдается преломляющая граница ниже поверхности фундамента, падающая к северо-востоку. Сама же поверхность фундамента на протяжении последних 20—25 км маршрута прослежи-

вается неуверенно. Вероятно на участке VIII (в точках КМТП 42—44) электроразведкой (профили H и E^{\parallel}), так же как и сейсморазведкой, отмечается поверхность, залегающая несколько ниже кровли фундамента, что может быть вызвано значительным уменьшением сопротивления пород верхней его части. Намечаемое сейсморазведкой Лайское поднятие фундамента IX на северо-восточном конце маршрута, вероятно, находит отражение на профилях E^{\parallel} и S^{\parallel} в точках 99—98.

Из совместного рассмотрения профилей E^{\perp} , S^{\perp} и H в сопоставлении с рельефом фундамента следует, что результаты КМТП отражают этот рельеф, за исключением некоторых участков, где на результаты наибольшее влияние оказывает неблагоприятное для электроразведки соотношение между изменением ρ_t и глубинами до фундамента. Рельеф поверхности высокоомной толщи (комплекса II), по предположению, наиболее отчетливо должны отражать профили E^{\perp} и S^{\perp} . Действительно, можно убедиться, что почти все крупные особенности рельефа этой поверхности отмечаются изменениями E^{\perp} и S^{\perp} . Весьма четко прослеживаются электроразведкой поднятия IV' , V' и VI' , причем в соответствии с результатами сейсморазведки хорошо виден сдвиг планового положения поднятия IV' в осадочной толще относительно поднятия IV по фундаменту, а также сдвиг относительно друг друга поднятий VI' и VI . В северо-восточной части маршрута электроразведка отмечает аномалию X' , не связанную с поднятием комплекса II. Возможно, эта аномалия отражает поднятие высокоомных отложений силурийского возраста, прослеживаемое сейсморазведкой. Профили E^{\perp} и S^{\perp} еще более четко отражают рельеф поверхности верхней высокоомной толщи, чем профили E^{\parallel} и S^{\parallel} рельеф фундамента. Профили средних значений E и S в изучаемых условиях, за некоторыми исключениями, не дают правильного представления о рельефе ни фундамента, ни промежуточного высокоомного комплекса.

На этом примере еще раз подтверждается целесообразность интерпретации максимальных и минимальных значений составляющих поля. Пример показывает реальную возможность (даже в геоэлектрических условиях не вполне благоприятных) с помощью КМТП раздельно прослеживать рельеф непроводящего основания и промежуточной высокоомной толщи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В книге сделана попытка рассказать очень кратко, без изложения математической теории, об основах методики и истолкования магнитотеллурических исследований при разведочных работах в нефтегазовой промышленности и главным образом показать на практических примерах геологические результаты, к которым эти исследования приводят. Объем книги позволил ознакомить лишь с малой частью обширных материалов магнитотеллурической

разведки в Советском Союзе. Мы старались выбрать из них те, которые наиболее отчетливо отражают возможности каждой модификации в различных геоэлектрических условиях.

Наиболее благоприятными геоэлектрическими условиями для применения метода магнитотеллурической разведки являются следующие:

1) опорным электрическим горизонтом служит непроводящее основание (фундамент) или мощный комплекс отложений с сопротивлением, по крайней мере, в 100 раз больше, чем среднее продольное сопротивление толщи перекрывающих пород;

2) глубина залегания опорного горизонта не превышает 2,5—3 км (лишь при МТЗ она может быть значительно больше); — непосредственно над опорным горизонтом залегает проводящий слой мощностью, достаточной для того, чтобы он нашел отражение на кривых МТЗ;

3) среднее продольное сопротивление пород разреза остается практически постоянным в пределах площади исследования или изменяется с закономерностью, которую нетрудно определить с помощью небольшого количества опорных данных (бурения, сейсморазведки);

4) разрез не содержит в себе промежуточных высокоомных горизонтов (экранов) с резкими формами рельефа;

5) на территории исследования нет тектонических нарушений или других резких проявлений горизонтальной неоднородности, особенно в верхней части разреза;

6) вариации поля с периодами от 10 до 80 с входят в интервал S кривых МТЗ.

Такие геоэлектрические условия для применения магнитотеллурической разведки встречены в ряде районов Русской, Западно-Сибирской и Туранской плит. Из рассмотренных результатов видно, что, изучая естественное электромагнитное поле Земли с разведочной целью, удается проследить в региональном плане поведение поверхности фундамента или залегающей над ним высокоомной толщи при глубинах до нескольких километров. Эта возможность ограничивается или вовсе исключается, если в осадочном чехле развит промежуточный экран большого сопротивления, особенно, когда он залегает неспокойно. Исследования в таких случаях могут привести лишь к прослеживанию экранирующей толщи. Мы видели, однако, что при полупрозрачных промежуточных экранах намечается реальный путь изучения одновременно рельефа фундамента и поверхности экранирующего слоя, если использовать методику разделения поля на максимальную и минимальную составляющие.

Магнитотеллурические исследования модификациями МТЗ, ТТ позволяют проследить также рельеф поверхности проводящих отложений при большой их мощности и значительной глубине залегания под осадками повышенного сопротивления. Такими условиями характеризуются, например, некоторые из районов

Якутии. Модификацией ТТ, наиболее производительной, в благоприятных условиях может выполняться и детальная съемка для поисков локальных структур в осадочном чехле по непрозрачным высокоомным горизонтам (например, для поисков солянокупольных структур или резко выраженных поднятий карбонатной толщи). К объектам применения модификации ТТ с этой целью можно отнести Прикаспийскую впадину, Припятский прогиб, Солигаличский и Рослятинский грабены, Печоро-Кожвинский мегавал и другие подобные им структуры, где в верхней части разреза развиты четко выраженные локальные поднятия высокоомных отложений.

Результаты геологического истолкования магнитотеллурических наблюдений дают лишь приближенное представление об изучаемом рельефе опорного горизонта. Различные влияния горизонтальных неоднородностей разреза искажают поля, известные нам по теоретическим расчетам в однородных горизонтально-слоистых средах или по лабораторным исследованиям на моделях структур. Эти искажения нередко приводят к сложной и запутанной картине строения прослеживаемых поверхностей. Тем не менее интерпретаторам при тщательном анализе материала наблюдений во многих случаях удается обнаружить характерные особенности тектоники изучаемых территорий. Примером могут служить результаты исследований в геоэлектрически сложных районах Украины (Днепроовско-Донецкая впадина), Западной и Восточной Сибири, Якутии, на Сахалине. Даже приближенная интерпретация магнитотеллурических наблюдений на слабо изученных территориях представляет интерес в качестве основы, наряду с данными гравитационной и магнитной разведок, для ориентации дальнейших поисковых работ.

Региональная и поисковая магнитотеллурическая разведка крупных территорий требуют относительно небольших затрат времени и материальных средств. Опыт показывает, что за полевой сезон (4—5 месяцев) партия из трех отрядов (двух полевых и одного базисного) в нормальных условиях передвижения модификацией ТТ может исследовать площадь 3—4 тыс. км². Стоимость исследований модификациями ТТ, МТП, КМТП при густоте сети 1 точка на 10—15 км² с необходимым количеством опорных МТЗ составляет в среднем от 15 до 30 руб за 1 км² изучаемой площади. Уплотнение сети до 1 точки на 4—6 км² (при модификации ТТ) увеличивает стоимость съемки 1 км² до 40—60 руб, а детальные исследования при густоте сети 1 точка на 1,5—3 км² — в труднодоступной местности (например, в северных таежных и заболоченных районах Коми АССР) обходятся 80—120 руб за 1 км². Стоимость маршрутной съемки модификацией КМТП в этих условиях определяется приблизительно в 500 руб. за 1 км. Это, по меньшей мере, вдвое ниже стоимости исследования 1 км сейсморазведкой КМПВ в таких же условиях. Выполнение МТЗ до последнего времени обходилось дорого — по приблизительным

подсчетам не менее 1—2 тыс. руб в одной точке. С введением в эксплуатацию цифровой электроразведочной станции производительность увеличится в несколько раз, и стоимость МТЗ значительно снизится.

Говоря о затратах на магнитотеллурические исследования, в сравнении с затратами на сейсморазведку, нельзя не упомянуть о некоторых экономических подсчетах производственных организаций. В Западной Сибири, например, стоимость региональной съемки модификацией ТТ с применением вертолета вдвое меньше стоимости исследования с помощью точечных сейсмических зондирований, не превосходящих электроразведку достоверностью результатов. В районах, где можно использовать наземный транспорт (вездеходы), стоимость МТП — МТЗ во много раз ниже затрат на сейсморазведочные работы, решающие ту же задачу регионального исследования, что и электроразведка [12].

Анализ материалов по поискам соляных подвытий в Прикаспийской впадине, где результаты наблюдений ТТ хорошо увязываются с данными сейсморазведки МОВ и РНП, показывает, что комплексирование модификации ТТ с опорными профилями сейсморазведки позволило бы втрое уменьшить объем сейсморазведочных работ [40]. Тем самым значительно снизилась бы стоимость поисков.

По подсчетам Узбекского геофизического треста [12] затраты на исследования модификацией ТТ при участии опорного профилирования КМПВ в пять раз ниже расходов на разведку той же площади только КМПВ с результатами, приблизительно теми же, что дает электроразведка в комплексе с ограниченным объемом сейсморазведочных работ.

Таким образом, применение магнитотеллурических исследований в рациональном комплексе с сейсморазведкой при региональных и поисковых работах лишь вдвое сократит затраты в сравнении с теми, которые требуются при использовании только одной сейсморазведки для работ такого же вида. Даже в этом осторожном предположении суммарная экономия окажется большой, если иметь в виду ежегодные затраты на сейсморазведку. Кроме того, комплексирование поможет сберечь немалый объем сейсмических исследований, необходимых для подготовки площадей к глубокому бурению. Все эти доводы заставляют еще раз настоятельно рекомендовать при региональных и поисковых исследованиях в районах, где магнитотеллурический метод дает удовлетворительные результаты, вместо массового применения дорогостоящей сейсморазведки использовать ее ограниченно в сочетании с магнитотеллурическим методом.

Перспективы развития магнитотеллурических исследований, с нашей точки зрения, связаны прежде всего с усовершенствованием модификации МТЗ. Широкое внедрение цифровой электроразведочной станции, полная реализация обработки материалов, на ЭВМ и получение кривых МТЗ, характеризующих полностью

весь разрез, должны привести к применению этой модификации не только в качестве вспомогательной, но и как основной для изучения строения нефтегазоносных площадей. Из примеров, которые были рассмотрены, нетрудно представить себе, какие принципиальные возможности заключены в МТЗ, сочетаемом с более простыми модификациями, особенно для региональной разведки малозученных территорий. Не лишены реальности намечающиеся пути использования МТЗ и при детальном поисковых исследованиях. К настоящему времени, вероятно, истерпаны не все возможности информации, которую может дать МТЗ.

Перспективы методики геологического истолкования магнитотеллурических исследований можно усмотреть в слабо еще практикуемом разделении поля на максимальную и минимальную составляющие. Следует развивать и совершенствовать эту методику, значительно расширяющую информацию. Надо также развивать детальный анализ практических материалов МТЗ с целью наиболее полного представления о горизонтальных неоднородностях изучаемого разреза. Мы не касаемся здесь, как само собой разумеющейся необходимости дальнейших поисков путей количественной интерпретации, продолжения вычислительных работ и моделирования для изучения поля над различными горизонтально-неоднородными средами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альперович И. М., Кононов В. Э., Чернявский Г. А. Геологическая эффективность магнитотеллурических зондирований в северо-западной части Сахалина. — «Геология нефти и газа», 1971, № 10.
2. Анищенко Г. Н., Голубков В. В. Использование длиннопериодных вариаций поля ТТ для изучения геологического строения Центральной Туркмении. — В кн.: Разведочная и промысловая геофизика, вып. 46, М. Гостоптехиздат, 1962.
3. Бердичевский М. Н. Электрическая разведка методом теллурических токов. М., Гостоптехиздат, 1960.
4. Бердичевский М. Н. Электрическая разведка методом магнитотеллурического профилирования. М., «Недра», 1968.
5. Бердичевский М. Н. Магнитотеллурическое поле на поверхности выклинивающегося слоя, содержащего наклонную непроводящую плоскость. — В кн.: Магнитотеллурические методы изучения строения земной коры и верхней мантии № 4. М., «Наука», 1969.
6. Бердичевский М. Н., Бубнов В. П., Липилин В. А. Комбинированное магнитотеллурическое профилирование. — В кн.: Прикладная геофизика, вып. 48. М., «Недра», 1966.
7. Бердичевский М. Н., Завадская Т. Н., Чернявский Г. А. МТЗ в вытянутых впадинах. — «Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли», 1970, № 12.
8. Бердичевский М. Н., Завадская Т. Н. Интерпретация амплитудных кривых МТЗ с помощью теоретических палеток. — В кн.: Прикладная геофизика, вып. 62. М., «Недра», 1971.
9. Бердичевский М. Н., Коцелев Ю. С., Ланцов А. Е. Изучение геологического строения северной части Западно-Сибирской низменности методом МТП. — В кн.: Геофизические методы разведки в Арктике. М., Гостоптехиздат, 1962. (Труды научно-исследовательского ин-та геологии Арктики).
10. Бердичевский М. Н., Никитенко К. И. Методика определения стратиграфической принадлежности опорного горизонта в методе ТТ. — В кн.: Прикладная геофизика, вып. 33. М., Гостоптехиздат, 1962.
11. Бердичевский М. Н., Никитенко К. И. Вопросы геологической интерпретации данных метода ТТ. — В кн.: Новые методы электроразведки на нефть и газ. М., Гостоптехиздат, 1963.
12. Бердичевский М. Н., Фомина В. И. Промышленное применение новых методов структурной электроразведки. — В кн.: Прикладная геофизика, вып. 47. М., «Недра», 1966.
13. Гугунава Г. Е., Чернявский Г. А. Применение абсолютных эллипсов при анализе вариаций естественного электромагнитного поля Земли. — «Изв. АН СССР. Сер. Геофиз.», 1964, № 7.

14. Дмитриев В. П., Кокотушкин Г. А. Альбом палеток для магнитотеллурического зондирования. М., Изд-во МГУ, 1971.

15. Завадская Т. Н. Некоторые свойства кривых магнитотеллурического зондирования. — В кн.: Прикладная геофизика, вып. 40. М., «Недра», 1964.

16. Завадская Т. Н. К вопросу о связи координат экстремальных точек кривых МТЗ с параметрами разреза. — В кн.: Разведочная геофизика, вып. 9. М., «Недра», 1965.

17. Завадская Т. Н. Графическое построение кривых магнитотеллурического зондирования. — В кн.: Магнитотеллурические методы изучения строения земной коры и верхней мантии, № 4. М., «Наука», 1969.

18. Каленов Е. Н. Геологическая эффективность нефтегазовой электроразведки. М., «Недра», 1970.

19. Ключки В. Н. Цифровая электроразведочная станция. — В кн.: Прикладная геофизика, вып. 60. М., «Недра», 1970.

20. Магнитотеллурическое зондирование горизонтально-неоднородных сред. — «Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли», 1973, № 1, Авт.: М. Н. Бердичевский, В. И. Дмитриев, И. А. Яковлев и др.

21. Матвеев В. К. Графическое построение кривых электромагнитного зондирования. М., «Недра», 1966.

22. Никитенко К. И. Методика статистической интерпретации теллурических наблюдений. — В кн.: Разведочная и промысловая геофизика, вып. 49. М., Гостехиздат, 1963.

23. Никитенко К. И., Терехин Е. И., Фомина В. И. Комплексные глубинные исследования электрическими методами разведки. — В кн.: Прикладная геофизика, вып. 62. М., «Недра», 1971.

24. Новые возможности МТЗ при изучении глубинного строения Московской синеклизы. — В кн.: Разведочная геофизика, вып. 53. М., «Недра», 1972. Авт.: К. И. Никитенко, О. М. Чинарева, Е. С. Киселев, Ю. Н. Попов.

25. Некоторые результаты МТП и МТЗ на моделях неоднородных структур. — В кн.: Магнитотеллурические методы изучения земной коры и верхней мантии, № 4. М., «Наука», 1969. Авт.: Б. Е. Брюнелли, М. А. Добровольская, А. А. Ковтун, Н. С. Кузнецов.

26. Обухов Г. Г. Магнитотеллурическое поле над пологими структурами (поляризация H). — В кн.: Прикладная геофизика вып. 44. М., «Недра», 1965.

27. Обухов Г. Г. Магнитотеллурическое поле над пологими вытянутыми структурами (поляризация E). — В кн.: Прикладная геофизика, вып. 46. М., «Недра», 1965.

28. Поспеев В. И., Михалевский В. И., Горностаев В. П. Результаты применения магнитотеллурических методов в районах Восточной Сибирь и Дальнего Востока. — В кн.: Магнитотеллурические методы изучения строения земной коры и верхней мантии, № 4. М., «Наука», 1969.

29. Расширенные магнитотеллурические зондирования на Северном Сахалине. — В кн.: Прикладная геофизика, вып. 62. М., «Недра», 1971. Авт.: Н. П. Владимирев, С. М. Крылов, Г. А. Червявский, И. М. Альперович.

30. Соико И. Ф. О влиянии высокоомной промежуточной толщи на результаты обработки наблюдений ТТ. — В кн.: Разведочная геофизика, вып. 15. М., «Недра», 1966.

31. Стадник Ю. Н., Проценко В. М., Пинчук А. П. О результатах магнитотеллурических исследований в Припятской впадине. — В кн.: Магнитотеллурические методы изучения земной коры и верхней мантии, № 4. М., «Наука», 1969.

32. Ткачев Г. Н. Обработка теллуриграмм способом истинных эллипсов. — «Геология и геофизика», 1963, № 11.

33. Троицкая В. А. Короткопериодическое возмущение электромагнитного поля Земли. — Труды Геофиз. ин-та АН СССР, № 32 (169), 1956.

34. Троицкая В. А. Земные токи. — «Природа», 1959, № 5.
35. Троицкая В. А., Шепетнов Р. В. Зависимость интенсивности и частоты возбуждения короткопериодических колебаний электромагнитного поля Земли от циклов солнечной активности. — В кн.: Прикладная геофизика, вып. 37. М., Гостоптехиздат, 1963.
36. Троицкая В. А. Результаты изучения земных токов. — В кн.: Геофизический бюллетень, № 14. М., «Наука», 1964.
37. Хомизур В. Р., Завадская Т. Н. Способы графического построения трехслойных кривых магнитотеллурического зондирования. — В кн.: Прикладная геофизика, вып. 46. М., «Недра», 1965.
38. Чернявский Г. А. Зависимость результатов наблюдений от азимута измерительной установки при МТЗ. — В кн.: Разведочная геофизика, вып. 8. М., «Недра», 1965.
39. Шкабарня Н. Г., Гриценко В. Г. Интерпретация кривых МТЗ с помощью ЭВМ. — В кн.: Прикладная геофизика, вып. 62, М., «Недра», 1971.
40. Электрическое исследование методом ТТ бортовой зоны Прикаспийской впадины. — В кн.: Нефтегазовая геология и геофизика, вып. 5. М., ВНИИОЭНГ, 1972. Авт.: Г. Н. Анищенко, И. Г. Дементьева, А. М. Виленчик и др.
41. Яковлев И. А. Картирование кровли низкоомных отложений методом ТТ. — В кн.: Прикладная геофизика, вып. 43. М., «Недра», 1965.
42. Яковлев И. А. К вопросу о свойствах поля ТТ в частотном интервале нисходящей ветви кривых МТЗ. — В кн.: Разведочная геофизика, вып. 32. М., «Недра», 1969.
43. Яковлев И. А., Савицкий В. П. Методика количественной интерпретации кривых МТЗ в условиях геoeлектрического разреза Вилуйской синеклизы. — В кн.: Разведочная геофизика, вып. 36. М., «Недра», 1969.

О Г Л А В Л Е Н И Е

| | Стр. |
|--|------------|
| Предисловие | 3 |
| Глава I. Магнитотеллурическое зондирование (МТЗ) | 6 |
| Переменное электромагнитное поле Земли и его изучение при магнитотеллурической разведке | 6 |
| Основы методики и интерпретации МТЗ | 8 |
| Практика геологического истолкования результатов МТЗ | 38 |
| Глава II. Магнитотеллурическое профилирование (МТП) | 59 |
| Основы методики и интерпретации МТП | 59 |
| Геологическое истолкование результатов МТП | 64 |
| Глава III. Исследование с помощью теллурических токов (ТТ) | 77 |
| Основы методики наблюдений ТТ и их интерпретации | 77 |
| Геологическое истолкование исследований ТТ | 90 |
| Глава IV. Магнитовариационная разведка (МВР) и комбинированное магнитотеллурическое профилирование (КМТП) | 131 |
| Основы методики МВР, КМТП и интерпретации исследований | 131 |
| Примеры геологической интерпретации результатов КМТП | 136 |
| Заключение | 143 |
| Список литературы | 148 |

Евгений Николаевич Каленов

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ИСТОЛКОВАНИЕ
РЕЗУЛЬТАТОВ
МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОЙ
РАЗВЕДКИ

Редактор издательства Т. И. Борущко
Технический редактор А. В. Дунаева
Корректор Э. И. Капульская

Сдано в набор 30/X 1973 г.
Подписано в печать 26/II 1974 г. Т-01278.
Формат 60×90^{1/16}. Бумага № 2.
Печ. л. 9,5. Уч.-изд. л. 9,82.
Тираж 2200 экз. Заказ № 637/3893-3.
Цена 49 коп.

Издательство «Недра», 103633,
Москва, К-12, Третьяковский проезд. 1/19.
Ленинградская типография № 6
«Союзполиграфпрома» при
Государственном комитете
Совета Министров СССР по делам
издательства, полиграфии и книжной
торговли.
196006, г. Ленинград, Московский пр., 91.

49 коп.

НЕДРА - 1974