

ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА МЕТОДОМ РАДИОКИП В СВЕРХДЛИННОВОЛНОВОЙ МОДИФИКАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАДИОСТАНЦИЙ СИСТЕМЫ ДАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ РСДН-20 («АЛЬФА»)

ДАВЫДОВ В.А.

Научный сотрудник Института геофизики УрО РАН, г. Екатеринбург

davyde@yandex.ru

Аннотация

Обоснована возможность проведения электроразведочных работ методом радиокип в сверхдлинноволновой модификации (сверхдлинноволновым радиокомпарационным методом - СДВР) с использованием сигналов радиотехнической системы дальней навигации РСДН-20 («Альфа»). Кратко описана методика полевых работ и обработки результатов наблюдений. Представлены примеры применения электроразведки методом СДВР на различных геологических объектах с построением карт и двухслойных геоэлектрических разрезов

Ключевые слова

Электроразведка; сверхдлинноволновый вариант метода радиокип; сверхдлинноволновый радиокомпарационный метод (СДВР); импеданс; геоэлектрический разрез

Введение

Изучение полей удаленных радиостанций для целей разведочной геофизики началось в 1946 году под руководством А.Г. Тархова, что привело к созданию метода радиокомпарации и пеленгации (радиокип) [7]. Поначалу использовались сигналы длинноволновых (ДВ) и средневолновых (СВ) радиостанций. В середине 1960-х годов появился сверхдлинноволновый (СДВ) вариант метода радиокип - сверхдлинноволновый радиокомпарационный метод (СДВР) и соответствующая аппаратура.

Метод радиокип применяется для изучения электрических свойств верхней части геологического разреза. Длинные волны позволяют исследовать разрез на глубину до 10 м, а сверхдлинные - примерно до 50 м. Диапазон вещания сверхдлинноволновых радиостанций находится в пределах 10-30 кГц. Для радиоволн с частотой менее 30 кГц токи проводимости существенно преобладают над токами смещения, благодаря чему при распространении волны происходит лишь незначительное поглощение энергии. Кроме того, сверхдлинные волны хорошо дифрагируют вокруг сферической поверхности Земли. Оба эти фактора обуславливают возможность распространения СДВ на расстояние до нескольких тысяч километров. Основное преимущество сигналов СДВ радиостанций - это большая устойчивость напряженности электрического поля, которая не подвержена случайным изменениям и мало меняется в течение суток и в течение года. Наиболее мощные передатчики могут обеспечить достаточную для приема напряженность поля на расстоянии более 10 000 км. В настоящее время СДВ радиостанции применяются в системах радиосвязи для подводного флота, радионавигации, а также для передачи сигналов эталонных частот и единого времени.

За рубежом СДВ вариант радиокип называется методом «очень низких частот» - VLF (very low frequency). Наибольшую популярность он приобрел в Канаде и на Скандинавском полуострове, часто применялся в США и на Балканах. Основные производители соответствующей аппаратуры - Geonics (Канада), Scintrex (Канада), IRIS (Франция), АВЕМ (Швеция) и др.

В СССР полевую аппаратуру СДВР-3 и СДВР-4М производил ЦНИГРИ. Она позволяла измерять напряженность и угол наклона электромагнитного (ЭМ) поля, а СДВР-4М - еще и импеданс [1].

При съемке методом радиокип можно использовать довольно много информационных параметров: амплитуды электрических и магнитных составляющих сигнала, их отношения и фазовые сдвиги, вещественные и мнимые компоненты сигнала, характеристики эллипса поляризации магнитного поля [2]. Несмотря на свои преимущества (отсутствие генератора, малый вес оборудования, быстрота съемки), метод радиокип обладает рядом недостатков, таких как ограниченная глубина исследований, влияние рельефа, узкая направленность сигнала. Эти факторы вместе со значительным сокращением действующих СДВ радиостанций привели к снижению интереса к методу.

К постоянно действующим на территории России СДВ станциям следует отнести радиотехническую систему дальней навигации РСДН-20 («Альфа»). Она состоит из пяти передатчиков мощностью по 500 кВт, которые расположены в районе Новосибирска, Краснодара, Комсомольска-на-Амуре, Ревды (Мурманская обл.) и Чарджоу (Туркмения) [9]. Первые три станции - постоянно действующие, две другие выходят в эфир периодически. Они излучают последовательности сигналов длительностью 3,6 с на частотах 11,905 кГц ($f1$), 12,649 кГц ($f2$) и 14,881 кГц ($f3$) (рис. 1).

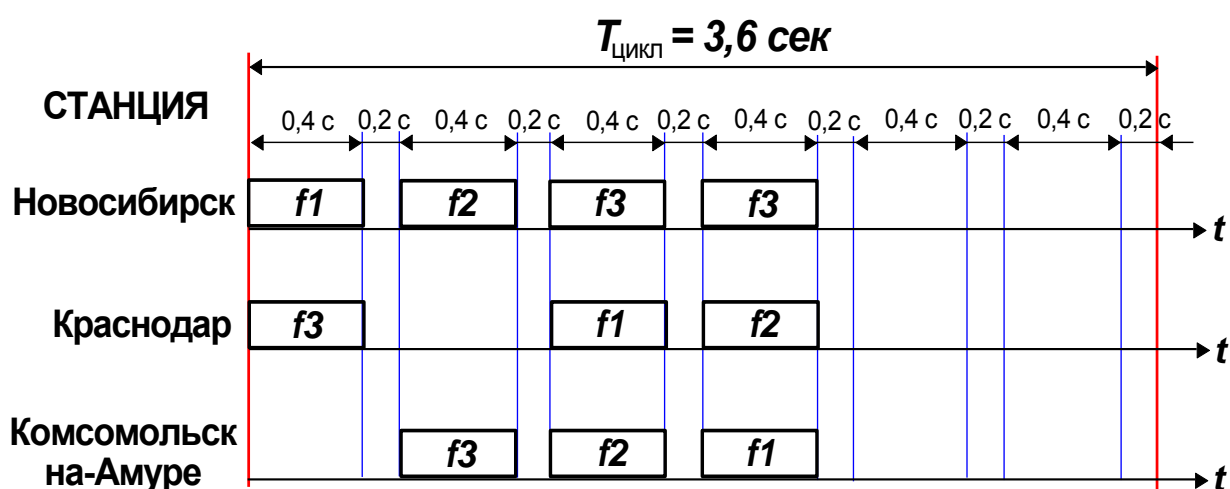


Рис. 1. Временные диаграммы сигналов РСДН-20 («Альфа») [6]. $T_{цикл}$ - длительность последовательности сигналов; t - время; $f1, f2, f3$ - частоты сигналов, равные 11,905; 12,649; 14,881 кГц соответственно

Напряженность ЭМ поля, создаваемая системой «Альфа», позволяет вести уверенный прием на всей территории бывшего Советского Союза и в сопредельных государствах. Несмотря на циклический характер сигналов, их можно использовать в качестве рабочих частот для исследований методом СДВР.

Методика измерений и обработки полученных результатов

Так как для работы методом радиокип не существует серийной аппаратуры, использующей частоты сигналов РСДН-20, применялся широкополосный универсальный приемник «ОМАР-2м» [4]. Измерялись две компоненты ЭМ поля - электрическая составляющая E_r вдоль профиля (с помощью незаземленной стелющейся электрической линии - электрической антенны) и поперечная компонента переменного магнитного поля H_ϕ (с использованием малогабаритной ферритовой антенны). При этом использовались два типа электрических линий - несимметричная электрическая антенна (ЭА) конструкции Яковлева [8] и симметричная ЭА оригинальной конструкции [5]. В гористой местности измерения проводились симметричной ЭА, чтобы ослабить влияние вертикальной компоненты электрического поля (E_z), возникающей при перепаде рельефа. В остальных случаях применялась несимметричная антенна. Оба вида антенн изготовлены из каротажного кабеля КТШ-0,3 (КГЗ-3-70Ш) и имеют длину по 10 м. Датчик переменного магнитного поля чувствительностью 80 В/(А/м) состоит из многовитковой катушки с ферритовым сердечником, настроенной в резонанс на частоту 12,65 кГц. При использовании

незаземляемой электрической линии и параллельного входного контура сдвиг фаз напряжений, поступающих на два входа прибора, соответствует реальному фазовому сдвигу между E_r и H_ϕ . Измерения проводились в точечном и непрерывном вариантах в зависимости от проходимости местности. Усиленные сигналы электрического (U_E) и магнитного каналов (U_H) записывались в цифровой регистратор (рис. 2). Их уровень контролировался по индикаторам на пульте аппаратуры.

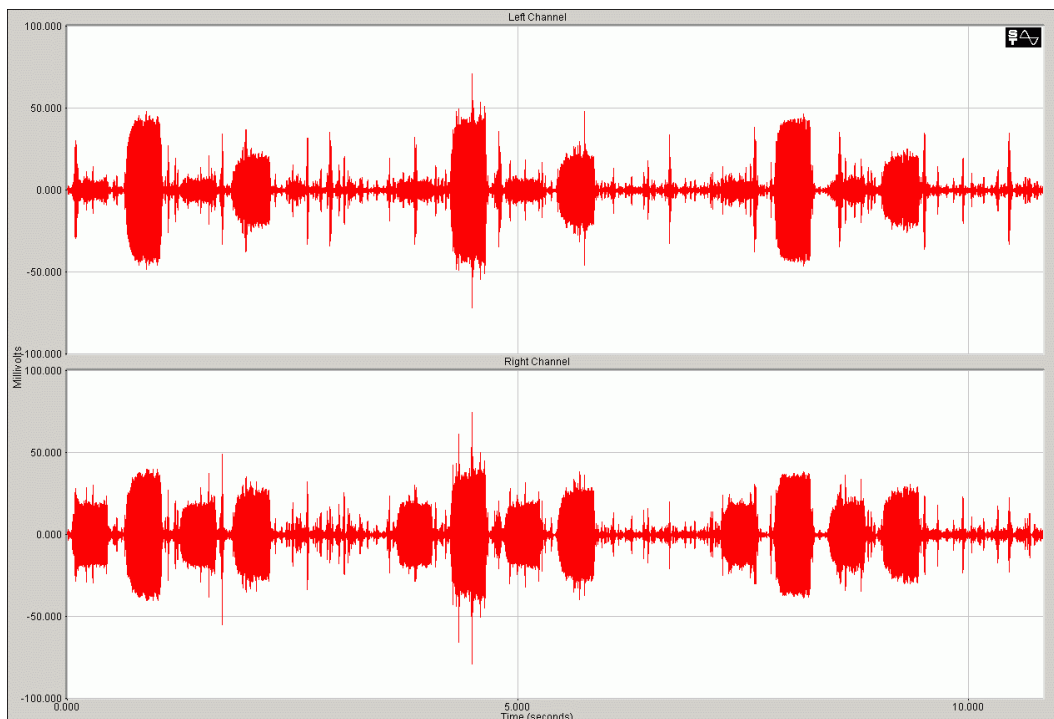


Рис. 2. Форма сигналов магнитного (вверху) и электрического (внизу) каналов. Горизонтальные оси - время, с; вертикальные оси - амплитуда, мВ

Данные обрабатываются в редакторе волновых форм с целью улучшения соотношения «сигнал/шум», а затем подвергаются быстрому преобразованию Фурье (БПФ) в скользящем окне с накоплением для снижения погрешности отсчетов. Спектральные амплитуды компонент электромагнитного поля всех трех частот РСДН-20 (рис. 3) служат основой для определения импеданса (волнового сопротивления) среды $Z = E_r / H_\phi$ на центральной частоте (12,65 кГц) с учетом дрейфа резонансной характеристики детектора.

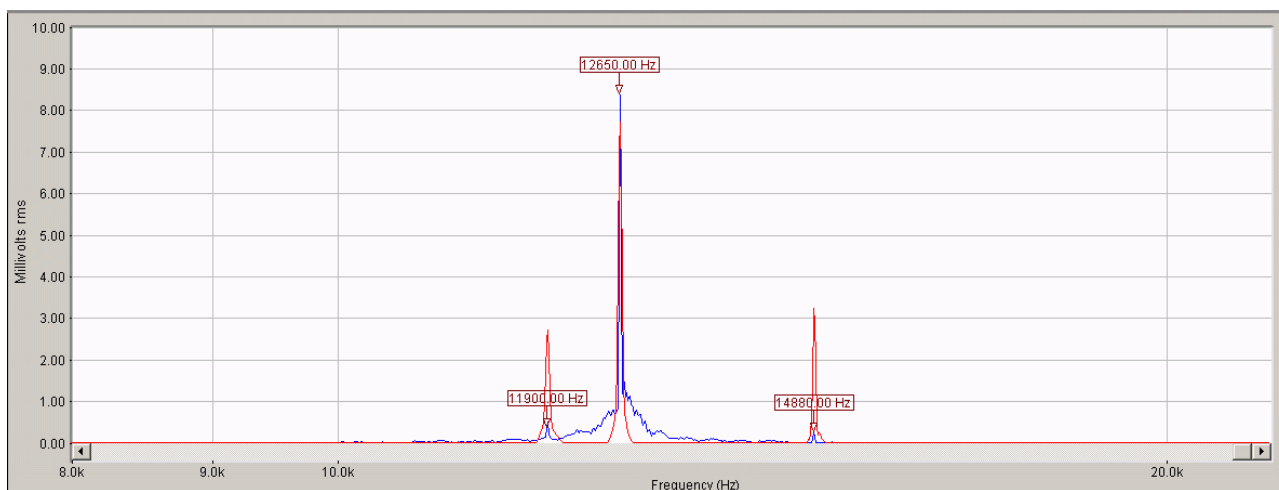


Рис. 3. Форма электромагнитных сигналов системы РСДН-20 («Альфа») в спектральной области. Горизонтальная ось - частота, Гц; вертикальная ось - амплитуда, мВ

Полученная величина импеданса пропорциональна электрическому сопротивлению подстилающих пород. Результаты измерений представляются в виде эффективного удельного электрического сопротивления ($\rho_{\text{эф}}$, Ом·м), вычисленного через модуль и фазу импеданса [2, 5]:

$$\rho_{\text{эф}} = (1/2\pi) \cdot f \cdot \mu \cdot |Z|^2; \quad (1)$$

$$Z = (U_e / U_m) \cdot (g / h_l) \cdot (K_M / K_E); \quad (2)$$

$$\varphi_Z = \varphi_E - \varphi_H, \quad (3)$$

где π - математическая константа (число «пи»); f - частота радиостанции, Гц; $\mu \approx \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ - магнитная проницаемость среды, Гн/м (μ_0 - магнитная постоянная, или магнитная проницаемость вакуума, Гн/м); Z - импеданс, Ом; U_e - напряжение на выходе электрического канала, В; U_m - напряжение на выходе магнитного канала, В; g - чувствительность магнитного датчика, В/(А/м); h_l - действующая длина электрической приемной линии, м; K_M - коэффициент усиления магнитного канала; K_E - коэффициент усиления электрического канала; φ_Z - фаза импеданса, град.; φ_E , φ_H - фазы электрической и магнитной компонент сигналов соответственно, град.

Чувствительность магнитного датчика и действующая длина электрической антенны определяются расчетным путем, а затем уточняются с помощью калибровки на каждой рабочей частоте.

Эффективная глубина проникновения электромагнитного поля в проводящую среду ($h_{\text{эф}}$, м) определяется скин-слоем и для однородного полупространства рассчитывается по формуле:

$$h_{\text{эф}} = \frac{\delta}{\sqrt{2}} = \frac{503}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{f}}, \quad (4)$$

где δ - толщина скин-слоя, м; ρ - удельное электрическое сопротивление среды, Ом·м.

Для удельного электрического сопротивления (УЭС) вмещающих пород $\rho = 100$ Ом·м, и частоты СДВР $f = 12,65$ кГц эффективная глубина исследований составляет 32 м, при изменениях УЭС в пределах 50-250 Ом·м глубинность измерений будет варьировать от 20 до 50 м.

По результатам обработки материалов съемки строятся графики и карты эффективных УЭС исследуемых участков. Для двухслойной модели геологической среды существует возможность получения количественного геоэлектрического разреза. В однородном изотропном пространстве $\rho_{\text{эф}}$ является истинным УЭС, а фазовый сдвиг между ортогональными горизонтальными компонентами электрического и магнитного полей равен 45° . Для двухслойного разреза фазовый сдвиг $\varphi_Z > 45^\circ$ при $\rho_1 > \rho_2$ и $\varphi_Z < 45^\circ$ при $\rho_1 < \rho_2$ (где ρ_1 , ρ_2 - УЭС верхнего и нижнего слоя соответственно). Поэтому, имея детальные измерения значений эффективных УЭС и фаз импеданса вдоль профиля, можно достаточно точно определить параметры двухслойного разреза. Автором для этой цели используется программа двумерной (2D) инверсии профильных данных, полученных при использовании метода радиоклип, 2LAYINV [10].

Примеры опытно-методических работ

Изучение мерзлотных свойств разреза

Целью исследовательских работ было изучение гидрогеологической ситуации в зоне развития многолетней мерзлоты на площади участка месторождения «Светлое» (Хабаровский край). Это месторождение относится к эпипермальному золото-серебряному оруденению Охотско-Чукотского вулканогенного пояса. Рудная минерализация приурочена к гидротермально-метасоматическим изменениям вулканогенных пород верхнего мела. Вулканические породы представлены лавами и туфами андезитов и дацитов, метасоматиты состоят из вторичных кварцитов и аргиллизитов.

Перед электроразведкой ставились задачи выделения основных геологических структур, выявления мерзлоты, областей оттайки (таликов) и связанных с ними путей разгрузки талых вод. По результатам площадной съемки методом СДВР на участке работ была построена карта эффективных УЭС (рис. 4). По пониженным значениям сопротивлений на ней отчетливо выделяется региональный Онемнинский разлом, проходящий по долине реки Алалиньдя. По обе стороны от него наблюдаются протяженные области повышенных значений УЭС. Так как на высоких частотах основной вклад в сопротивление вносят приповерхностные отложения верхней части разреза, а вмещающие породы достаточно однородны по составу, то повышенные значения УЭС предположительно обусловлены островной мерзлотой, переходящей на глубину в многолетнюю. С этим же, вероятно, связана и зона высоких значений УЭС на севере участка. Южная часть характеризуется в целом более низкими величинами УЭС, свидетельствующими об отсутствии в этой области сезонной мерзлоты, что позволяет отнести ее к таликовой зоне. Дешифрируемый по аэрофотоснимкам субмеридиональный разрыв в западной части участка, разделяющий измененные туфы хетанинской свиты (K_2ht) и дациты уракского комплекса (ζK_2ur), подтверждается линейной низкоомной аномалией. Хетанинская свита занимает основную часть площади. На востоке она контактирует с андезибазальтами хакаринского базальтового комплекса ($\alpha\beta K_2hk$). Данный контакт также выделяется субмеридиональной зоной пониженных УЭС. Очевидно, ослабленные контакты хетанинской свиты с комплексами других пород связаны с разгрузкой таликовых и поверхностных стоков в бассейн реки Алалиньдя.

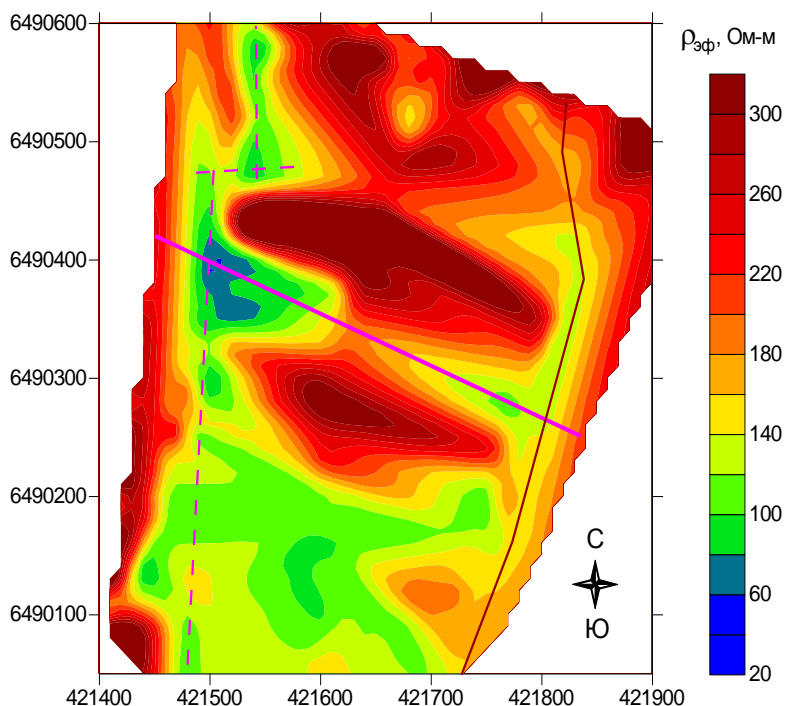


Рис. 4. Карта эффективных удельных электрических сопротивлений ($\rho_{эф}$, Ом·м) в верхней части разреза участка работ по данным площадной съемки методом СДВР. Сплошной малиновой линией выделен известный региональный разлом, пунктиром - разлом, дешифрируемый по аэрофотоснимкам, коричневой линией - контакт между породами разного состава. Оси координат - расстояния, м

Обнаружение подземных пустот

Исследуемый участок был расположен в городе Березовский Свердловской области на территории известного золоторудного поля. Целью исследований было выявление техногенных изменений, вызванных подработкой территории (присутствия пустотного пространства и зон разуплотнения грунтов).

Горные выработки здесь проходят по дайкам плагиогранит-порфиров, пронизанных кварцевыми жилами с золотосульфидной минерализацией. Вмещающие породы относятся к вулканогенно-осадочному комплексу. Верхняя часть разреза представлена делювиальными и элювиальными суглинками. Городская территория частично располагается над шахтным полем Березовского месторождения и может подвергаться просадочным явлениям.

В пределах участка, по данным Березовского рудоуправления, проходит дайка Соймановская, которая разрабатывалась в 40-60-е годы XX века на горизонтах 28 м и глубже. Верхние горизонты дайки были отработаны до революции, и точные сведения по ним не сохранились.

На исследуемой территории были проведены комбинированные сейсморазведочные работы с изучением скоростей продольных и поперечных волн и электроразведка методом СДВР. По опыту ранее выполненных работ было выяснено, что аномально низкие значения коэффициента Пуассона (ν) здесь являются наиболее показательным параметром для определения зон разуплотнения грунтов и обнаружения подземных пустот [3]. Электротметрия же позволяет определить характер заполнения пустотного пространства по величине УЭС.

На полученном разрезе коэффициента Пуассона можно уверенно выделить аномалии его пониженных значений по отношению к окружающим породам (на глубине 10-15 м), которые могут принадлежать подземным выработкам (рис. 5, а). Наибольшее внимание заслуживает зона с $\nu < 0,1$ на глубине 10 м в районе пикетов (ПК) 30-40 м. Объект также выделяется аномалией пониженных значений УЭС по данным измерений методом СДВР (рис. 5, б). Из чего можно сделать вывод о нахождении здесь подземной выработки, заполненной глинистым веществом. На представленном плане горных работ в этом месте ранее располагался вертикальный ствол шахты № 118^а, а старые горизонты отработки начинались с глубины 10 м.

Геофизические аномалии указывают на то, что процесс консолидации грунтов в районе выработанного пространства еще не завершен, а проникновение атмосферных осадков по старому стволу шахты может привести к суффозии и просадке грунтов.

По результатам выполненных работ данный участок признан потенциально опасным и непригодным для строительства капитальных сооружений.

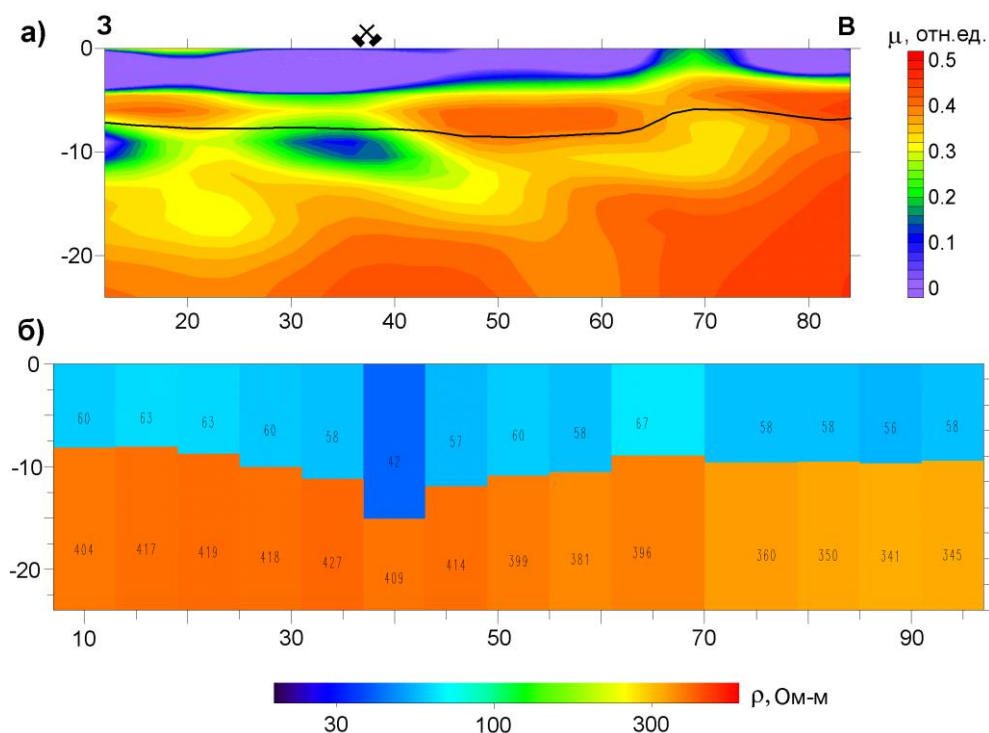


Рис. 5. Геофизические разрезы на подработанной территории Березовского месторождения, вблизи старого ствола шахты № 118^а, обозначенного значком из двух перекрещенных молотов (черной линией выделена преломляющая граница): а - разрез коэффициента Пуассона; б - двухслойный геоэлектрический разрез, полученный методом СДВР

Обследование плотин гидротехнических сооружений

При изучении насыпных плотин водохранилищ основными геофизическими методами исследований являются электрометрия и сейсмометрия.

Электрометрические исследования обычно включают: вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ), измерения естественного электрического поля (ЕП), использование разновидностей методов сопротивлений (в том числе с применением многоэлектродных установок, то есть метода электротомографии). При этом в основном применяются кондуктивные способы возбуждения и регистрации электрических полей.

Из сейсмических методов наибольшее распространение получил метод преломленных волн (МПВ) и сейсмоакустическое прозвучивание.

Применение тех или иных методов в основном зависит от задачи, поставленной перед исследователями. К таким задачам относятся: определение геометрии и структурных условий залегания коренных и насыпных грунтов, степени их сохранности, наличия ослабленных зон (подмыва, дренажа в теле плотины, деформаций, просадок и разуплотнений грунтов); изучение динамических воздействий, физических и прочностных свойств грунтов.

Следует отметить, что при геофизических исследованиях плотин часто появляются дополнительные трудности: отсутствие заземлений, пространственная ограниченность, мощные электрические и сейсмические помехи индустриального характера. Поэтому для получения достоверной информации достаточно важно использование дублирующих и дополнительных методов.

Плотина Нижне-Исетского пруда является последней в каскаде городских плотин г. Екатеринбурга на реке Исеть. При ее обследовании было проведено сопоставление геоэлектрических разрезов, полученных после количественной обработки результатов съемки методом СДВР и традиционно используемого метода ВЭЗ. Геоэлектрический разрез ВЭЗ имеет трехслойный характер. Верхняя часть разреза (1,5-2,5 м) характеризуется широким разбросом УЭС и представляет собой типичную зону аэрации. Средний слой соответствует ядру плотины с величинами УЭС, характерными для глин (10-16 Ом·м). Основание разреза представлено коренными подстилающими породами с повышенными значениями сопротивлений (рис. 6, а). Таким образом, методом ВЭЗ достаточно хорошо расчленяются основные структурные горизонты плотины с определением глубин их залегания. Двухслойный разрез СДВР (рис. 6, б) позволяет выделить насыпные грунты тела плотины и коренные породы ее основания. Недостаток технологии заключается в замене двух верхних слоев одним эквивалентным слоем, что делает невозможным расчленение рыхлой части разреза и вносит искажения в получаемые значения УЭС. Несмотря на это, глубина залегания поверхности коренных пород основания плотины определяется достаточно уверенно.

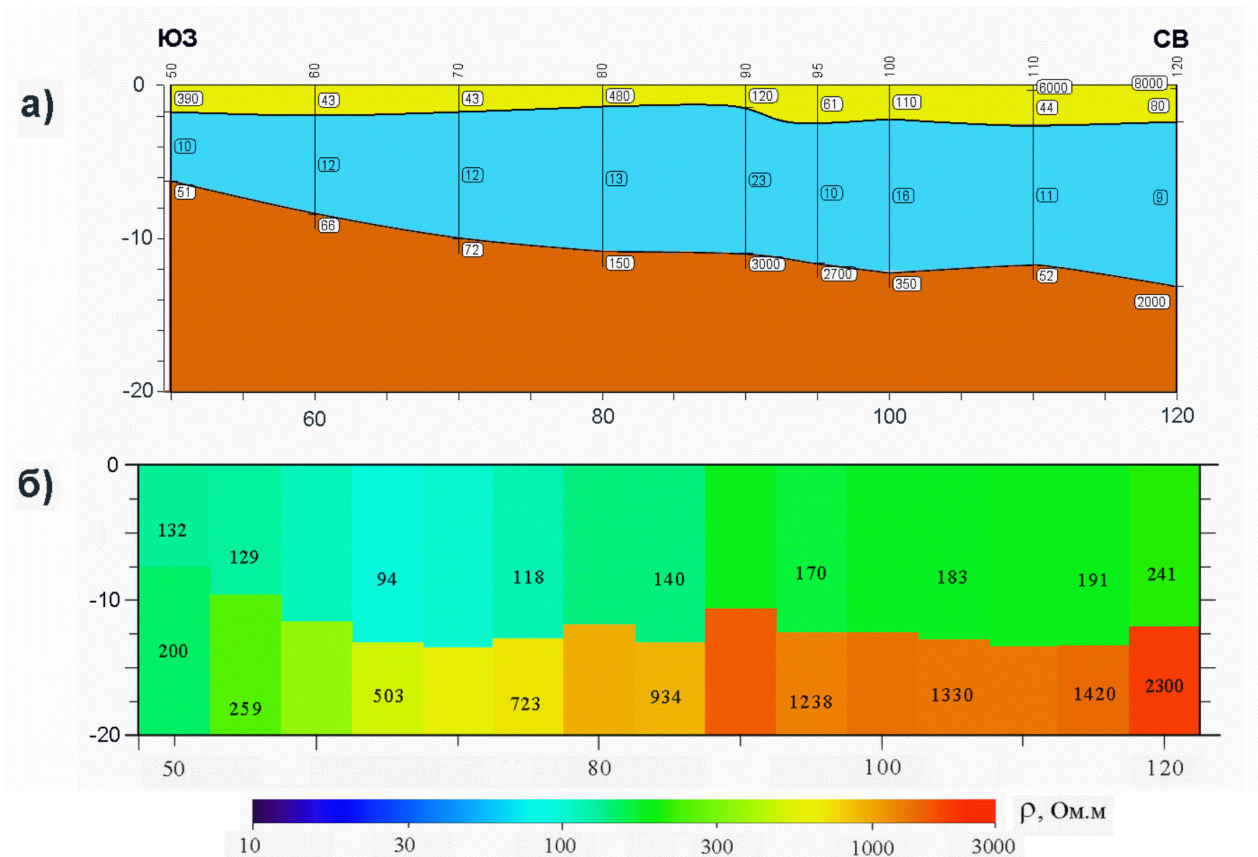


Рис. 6. Южный фрагмент плотины Нижне-Исетского пруда. Геоэлектрические разрезы по результатам ВЭЗ (а) и СДВР (б). ρ - удельное электрическое сопротивление, Ом·м. Вертикальные линии на рис. а показывают оси зондирования, цифры на обоих разрезах соответствуют УЭС слоев грунта в отдельных точках

Дамба Ельчевского пруда (Ельчевский пруд-осветлитель является отстойником для сброса нейтрализованных шахтных вод Дегтярского рудника) была выбрана в качестве объекта постановки опытно-методических работ из-за имеющейся подробной информации о геологическом строении разреза по результатам бурения (рис. 7). На дамбе была проведена поточечная съемка методом СДВР с использованием всех трех частот системы РСДН-20. Это позволило провести расширенную 2D инверсию и построить более подробный геоэлектрический разрез (см. рис. 7). Как видно из сопоставления разрезов, граница насыпных грунтов дамбы и пород ее основания определяется достаточно хорошо, особенно в западной части (0-270 м). В центре (280-500 м) мощность отсыпки занижена. Возможно, это связано с присутствием в теле плотины большего количества грубообломочного материала (песка, щебня). В восточной части дамбы (510-630 м) мощность рыхлых отложений чуть завышена, и этому есть объяснение: в породах основания присутствует низкоомная линза глин, близкая по проводимости к насыпным грунтам плотины. Из коренных пород на геоэлектрическом разрезе очень хорошо выделяются высокоомные порфириты (0-80 м) с западной стороны и известняки (500-630 м) в восточной части дамбы. Остальные породы основания характеризуются слабоконтрастными изменениями средних значений УЭС, возможно, связанных со степенью трещиноватости.

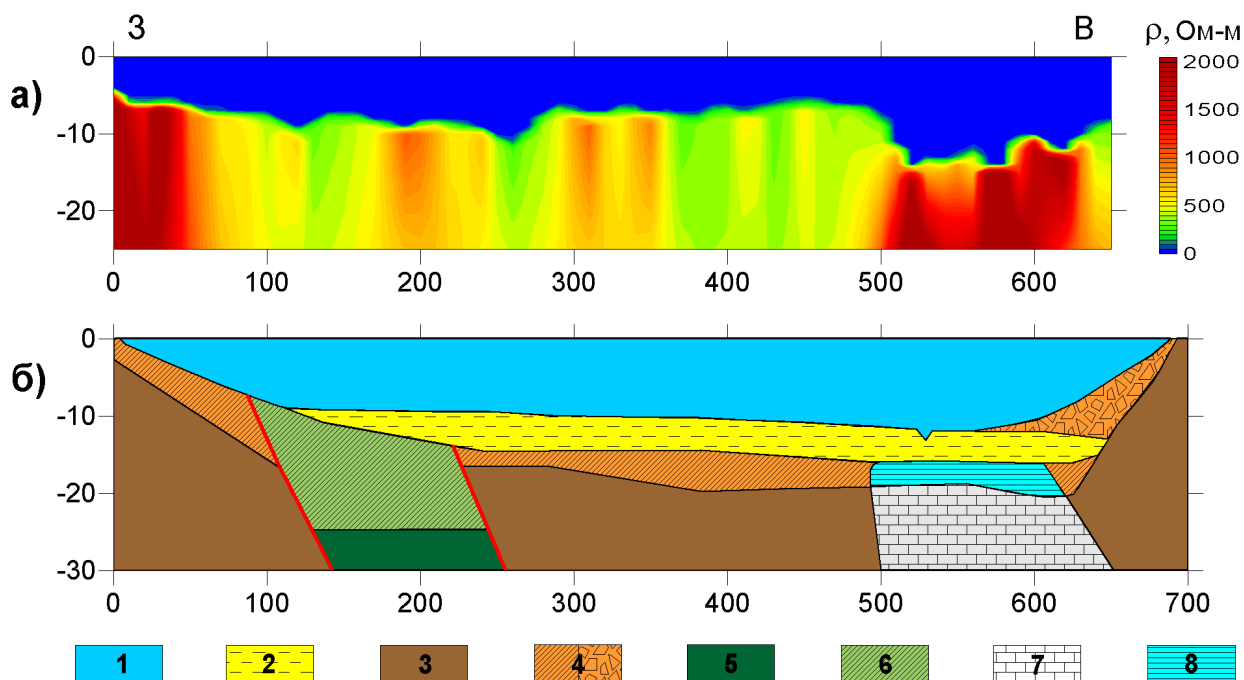


Рис. 7. Геоэлектрический разрез Ельчевской дамбы по результатам 2D инверсии данных СДВР (а); геологический разрез участка работ (б). Условные обозначения: ρ - удельное электрическое сопротивление, Ом·м; 1 - тело плотины; 2 - аллювиальные отложения; 3 - порфириты; 4 - элювиальные и делювиальные суглинки коры выветривания порфиритов; 5 - туфы; 6 - кора выветривания туфов; 7 - известняки; 8 - глины.

Заключение

Из существующих в настоящее время сверхдлинноволновых радиостанций для постановки электроразведки методом СДВР на территории России наиболее подходящей является радиотехническая система дальней навигации РСДН-20 («Альфа»). Благодаря интеграции спутниковых и наземных радионавигационных систем прекращения вещания станций данного типа в ближайшем будущем не ожидается. Несмотря на отсутствие серийной аппаратуры СДВР, данный метод можно реализовать с использованием широкополосных универсальных приемников, захватывающих частотный диапазон вещания радионавигационных систем РСДН-20.

Электропрофилирование методом СДВР имеет глубину исследований 20-50 м, что равносильно использованию симметричной установки метода сопротивлений с питающими разносами $AB=80\div 200$ м. Аппаратура для измерений методом радиокип легкая и компактная, что позволяет производить работы одному человеку на местности любой категории. Метод СДВР не критичен по отношению к условиям заземления и нечувствителен к промышленным помехам, что позволяет использовать его в городских условиях и вблизи промышленных предприятий.

Таким образом, применение метода СДВР позволяет значительно увеличить производительность электроразведочных работ при профилировании. Результаты электропрофилирования обычно предоставляются в виде графиков и карт эффективных удельных электрических сопротивлений. Для двухслойной модели геологической среды существует возможность получения количественного геоэлектрического разреза, определения УЭС слоев и глубины до границы с коренными породами. При многослойном характере разреза получаемый геоэлектрический разрез отвечает эквивалентной модели двух контрастных по проводимости сред (коренных пород и рыхлых отложений), при этом получаемая граница раздела в большинстве случаев соответствует рельефу коренных пород.

Приведенные примеры показывают, что электроразведка методом радиокип с использованием СДВ полей навигационных радиостанций может достаточно эффективно выделять основные структурные элементы геологического разреза как в плане, так и по глубине. Это позволяет применять ее в комплексе с другими геофизическими методами для решения широкого круга геологических, инженерно-геологических и гидрогеологических задач.

Список литературы

1. *Бобровников Л.З., Орлов Л.И., Попов В.А.* Полевая электроразведочная аппаратура: справочник. М.: Недра, 1986. 223 с.
2. *Гордеев С.Г., Седельников Э.С., Тархов А.Г.* Электроразведка методом радиокип. М.: Недра, 1981. 132 с.
3. *Давыдов В.А.* Обнаружение подземных пустот антропогенного характера с помощью геофизических методов // Инженерные изыскания. 2013. № 7. С. 52-57.
4. *Давыдов В.А.* Опытная малогабаритная аппаратура регистрации «ОМАР-2м» для метода АМТЗ // Материалы конференции «Шестые научные чтения им. Ю.П. Булашевича: геодинамика, глубинное строение, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей». Екатеринбург: Изд-во ИГФ УрО РАН, 2011. С. 112-115.
5. *Давыдов В.А.* Эквивалентные схемы и основные характеристики различных датчиков электромагнитных сигналов в широкой полосе частот // Уральский геофизический вестник. 2014. № 1 (в печати).
6. Радионавигационные системы дальней навигации (РСДН): учебно-методическое пособие / сост. А.В. Хафизов. Кировоград: Изд-во ГЛАУ, 2010. 30 с.
7. *Тархов А.Г.* Основы геофизической разведки методом радиокип. М.: Госгеолтехиздат, 1961. 213 с.
8. *Яковлев А.В., Ивочкин В.Г., Пертель М.И.* Прибор для непрерывных измерений импеданса по методу РЭМП // Геофизическая аппаратура. 1977. Вып. 63. С. 12-18.
9. *Jacobsen T.* The Russian VLF navaid system Alpha, RSDN-20 // Radio waves below 22 kHz. 2013. February. URL: <http://www.vlf.it/alphatrand/alpha.htm>.
10. *Pirttijärvi M.* Laterally constrained two-layer inversion of VLF-R measurements: user's guide. Oulu, Finland: Oulu University Press, 2006. 12 p.

Выходные данные: Журнал «Инженерные изыскания», №2/2014, С. 65-71