

УДК 550.837:551.345

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЕТЕКТОРА ВОДЫ ПРИ ИЗУЧЕНИИ СТРУКТУРЫ МЕРЗЛЫХ ПОРОД

© 2022 г. В. П. Мельчинов¹, *, А. А. Павлов¹, **

¹Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия

*e-mail: melchinovvp@mail.ru

**e-mail: aisen-pavlov@outlook.com

Поступила в редакцию 15.10.2021 г.

После доработки 20.01.2022 г.

Принята к публикации 27.01.2022 г.

Приведены результаты изучения геоэлектрического разреза верхних слоев земли на опорных пунктах наблюдений в Якутии методами вертикального электрического зондирования и поверхностного импеданса. Апробация детектора воды ADMT-200S, основанного на принципах аудиоманнителлурического метода зондирования, показала качественное совпадение распределения электрического сопротивления с глубиной и количественное совпадение положения нижней границы мерзлых рыхлых отложений с достаточной для практики точностью. Предлагается использовать данный прибор при комплексировании геофизических методов исследования структуры подстилающей среды.

DOI: 10.31857/S0016794022030105

1. ВВЕДЕНИЕ

При решении практических задач распространения радиоволн ДВ–СВ-диапазонов над земной поверхностью необходимо знание электрической модели подстилающей среды на глубину проникновения радиоволн. Зная число слоев, их мощность и электрические характеристики каждого слоя (проводимость и диэлектрическую проницаемость) можно определить так называемый поверхностный импеданс, который лежит в основе расчета характеристик распространения земных радиоволн. Для определения геоэлектрического разреза верхних слоев земли широко используется комплексирование радиофизических, геофизических и геологических методов изучения подповерхностной структуры. Выбор методов комплексирования является одним из главных моментов при изучении структуры подстилающей среды, поскольку использование одного метода не дает однозначного определения структуры подстилающей среды и электрических характеристик слоев.

В работе приведены результаты исследования подстилающей среды на типичных участках залегания многолетнемерзлых пород методами вертикального электрического зондирования на постоянном токе, поверхностного импеданса и аудиоманнителлурического зондирования. Цель работы заключается в апробации прибора аудиоманнителлурического зонди-

рования ADMT-200S при определении положения геологических границ и распределения электрического сопротивления по глубине на опорных пунктах наблюдений, на которых были выполнены указанные выше комплексные геофизические исследования в предыдущие годы.

2. ОПИСАНИЕ УЧАСТКОВ НАБЛЮДЕНИЙ

Участки, на которых проводились комплексные геофизические измерения расположены в долине р. Лены и на ее высокой террасе в 25–30 км от г. Якутска. Долина р. Лены представляет ровную поверхность с абсолютными отметками высот 95–107 м, на которой расположен г. Якутск. По результатам бурений мощность мерзлых рыхлых отложений в Якутской скважине достигает 24 м. До глубины 3–6 м разрез представлен льдистыми супесями, суглинками, мелкозернистыми песками и местами алевритами. Далее залегают пески разной зернистости от мелкозернистых до крупнозернистых с прослоями галечника. Дочетвертичные (коренные породы) отложения представлены голубовато-серыми плотными песчаниками с прослоями серых и черных алевролитов. Мощность сезонного протаивания изменяется от 1–1.5 м в суглинках и до 2–3 м в песках. [Спектор и др., 2008].

По результатам электроразведки в долине реки р. Лены мощность мерзлых рыхлых отложений

меняется от 12.4–14.5 до 16.2–22.7 м при удалении от берега реки. Удельные электрические сопротивления мерзлых рыхлых отложений находятся в пределах 468–1965 Ом м со средним медианным значением 1201 Ом м, а для коренных пород электрическое сопротивление изменяется от 24 до 1037 Ом м со средним медианным значением 217 Ом м [Нерадовский, 2019].

Следующий террасовый уровень рельефа расположен на высотах 100–200 м и выше над урезом воды р. Лены, который сложен косослоистыми песками с прослоями галечников и подчиненными им прослоями глин и суглинков. Общая мощность этих рыхлых отложений иногда достигает 80–100 м [Игнатченко, 1961]. Изучению этой террасы способствовало наличие Кильдямского и Кангаласского угольных месторождений. В работе [Угольные ..., 1973] приведены геологические разрезы вдоль этой террасы по работам Игнатченко Н.А., согласно которым сверху залегают косослоистые пески с галечником, а ниже находятся песчаники и пески с прослоями бурого угля. По результатам бурения на Кангаласском месторождении мощность рыхлых гравийно-песчаных отложений составляет порядка 60 м, ниже которых находятся прослойки угля общей мощностью до 8–9 м. Далее залегают песчаники разной зернистости. Вблизи опорного участка наблюдения, в карьерах 35-го километра Намского тракта на высоте около 120 м над урезом воды в р. Лена рыхлые отложения представлены серовато-желтыми охристыми разнозернистыми косослоистыми песками с хорошо окатанными гравием и галькой [Правкин и др., 2018]. Данных по электрическому сопротивлению на данном участке наблюдений нами не встречено в литературе.

3. АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Наиболее простым и распространенным методом определения электрофизических характеристик подстилающей среды является метод вертикального электрического зондирования на постоянном токе. Сущность этого метода проста и состоит в возбуждении электрического тока в земле и измерении наводимого напряжения на приемных электродах при изменении величины разносов как питающей, так и приемной линий. По результатам измерения величины тока и напряжения строится график кажущегося сопротивления ρ_k подповерхностной среды в зависимости от полуразносов питающей линии $AB/2$. В процессе интерпретации кривых ρ_k можно оценить мощность и удельное электрическое сопротивление слоев. При интерпретации кривых кажущегося сопротивления используется палеточный метод интерпретации [Пылаев, 1968]. В послед-

нее время широко применяются компьютерные методы интерпретации.

Основным недостатком этого метода является проблема определения глубины границ из-за широкой области эквивалентных решений. Неоднозначность интерпретации кривых ρ_k особенно сильно проявляется при работе в зоне залегания многолетнемерзлых пород. Поскольку значительная контрастность по электрическому сопротивлению мерзлого и верхнего талого слоя приводит к совпадению кривых для предельного случая, когда электрическое сопротивление мерзлого слоя равно бесконечности, т.е. появляется неоднозначность в определении еще и электрического сопротивления [Якупов, 1968]. Использование комплексирования геофизических методов позволяет достичь однозначного определения параметров геоэлектрического разреза на мерзлых породах [Рекомендации ..., 1987]. Наилучшие результаты при комплексировании методов можно получить, используя электромагнитные (радиоволновые) методы электроразведки [Никитин и Хмелевской, 2012].

Метод поверхностного импеданса заключается в измерении тангенциальных составляющих электромагнитного поля на поверхности земли. Источниками электромагнитного поля являются радиостанции СДВ-ДВ-СВ диапазонов. По результатам измерений определяется приведенный поверхностный импеданс, который записывается в комплексном виде:

$$\delta_{\text{изм}} = \frac{E_{\tau}}{Z_0 H_{\tau}} \exp(i\varphi_{\delta}).$$

Где E_{τ} и H_{τ} – электрическая и магнитная тангенциальные составляющие соответственно, $Z_0 = 120\pi$ Ом – импеданс свободного пространства, φ_{δ} – фаза импеданса, равная разности фаз между E_{τ} и H_{τ} .

Измерения методом поверхностного импеданса были выполнены измерителем импеданса в диапазоне частот 10–1000 кГц, описание которого приведено в работе [Парфентьев и Пертель, 1991]. Знание модуля и фазы поверхностного импеданса позволяет определить амплитудные и фазовые характеристики радиоволн при распространении над земной поверхностью [Макаров и др., 1991].

Метод поверхностного импеданса также используется в разведочной геофизике для определения электрофизических характеристик слоев земли. В этом случае решается обратная задача, которая заключается в восстановлении параметров геоэлектрического разреза по измеренным значениям модуля и фазы поверхностного импеданса [Ангархаева и др., 1997]. При решении обратной задачи применяется метод регуляризации А.Н. Тихонова для решения некорректно постав-

ленных задач. Метод решения обратной задачи основан на минимизации сглаживающего функционала. При этом сглаживающий функционал имеет вид:

$$M_{\alpha}[g] = I[g] + \alpha\Omega[g],$$

где $I[g] = \sum_{l=1}^L |\delta_l - \delta_3|^2$ – функционал невязки;

$$\Omega[g] = \sum_{n=1}^N p_n |\varepsilon_n - \varepsilon_n^0|^2 + \sum_{n=1}^N q_n |\sigma_n - \sigma_n^0|^2 + \sum_{n=1}^N r_n |h_n - h_n^0|^2$$

– стабилизирующий функционал;

$g = (\varepsilon, \sigma, h)$ – параметры многослойной полупроводящей среды; α – параметр регуляризации; $(\varepsilon^0, \sigma^0, h^0)$ – гипотетическое распределение параметров разреза; p_n, q_n, r_n – веса соответствующих параметров; δ_3 – экспериментальные значения импеданса на l -ой частоте. Минимизация рассматриваемого функционала производилась с помощью метода Ньютона–Канторовича (метод линеаризации).

Критерием выбора “наилучшего” геоэлектрического разреза служит минимум среднеквадратического отклонения экспериментальных значений импеданса от рассчитанных для модели n -слойной среды.

Для решения обратной задачи необходимо знать априори начальные значения искомым параметров: мощность слоев и их электрические характеристики.

В настоящее время в Китайской Народной Республике разработаны приборы для поисков воды, основанные на измерении электрической или магнитной компоненты естественного электромагнитного поля Земли. Нами был использован прибор ADMT-200S. Этот прибор также может решать широкий круг вопросов при инженерно-геологических изысканиях до глубины 200 м (Operation..., 2021). Принцип действия детектора воды ADMT-200S основан на измерении разности потенциалов между двумя электродами, наводимых в земле от горизонтальной электрической составляющей естественных источников поля в диапазоне частот от единиц Гц до единиц кГц. При обработке полученных данных и построении графиков изолиний напряжения и цветной палитры электрического сопротивления подстилающей среды в зависимости от глубины используются теоретические принципы магнитотеллурического и аудиоманнитотеллурического методов зондирования [Бердичевский, 1968].

Современная компьютерная обработка принятых сигналов в определенном частотном диапазоне позволяет решить обратную задачу по-

строения изолиний электрической составляющей естественного поля земли в зависимости от глубины. Эти изолинии характеризуют распределение электрических свойств массивов горных пород по глубине, что позволяет на качественном уровне оценить распределение по глубине горизонтов с разными электрическими характеристиками (Operation ..., 2021).

Особенность естественного электрического поля заключается в том, что оно постоянно меняется, т.е. при последовательных измерениях разность потенциалов будет меняться, возникает неопределенность при решении обратной задачи. Использование метода многоканальных измерений в приборе ADMT-200S полностью решило проблему изменений естественного электрического поля: поскольку происходит одновременная регистрация данных путем использования большого количества каналов.

Основные характеристики прибора ADMT-200S:

1. Диапазон измерения разности потенциалов: 0–200 мВ с разрешением 1 мВ.
2. Количество частотных каналов 40 с погрешностью определения частоты 3%.
3. Диапазон принимаемых частот от 0.1 Гц до 5 кГц, что обеспечивает глубинность исследования до 200 м.
4. Входное сопротивление: ≥ 10 Мом.
5. Подавление промышленных помех: > 80 дБ.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рисунке 1 приведена кривая кажущегося сопротивления ρ_k для пункта наблюдения в долине р. Лены. В силу неоднозначности количественной интерпретации кривой ρ_k без результатов бурения, на данном пункте наблюдений была выполнена только ее качественная интерпретация. Как видно из рис. 1, восходящая ветвь кривой идет под углом в 45° , что характерно для резкой контрастности электрического сопротивления талых и мерзлых рыхлых отложений. Причем строение слоя мерзлых рыхлых отложений неоднородно судя по перегибу на полуразносе 25 м. Ход кривой ρ_k показывает, что электрическое сопротивление мерзлого слоя может достигать нескольких тысяч Ом м. Отметим также резкий спад кривой ρ_k на полуразносах 500–750 м, что свидетельствует о наличии проводящего слоя ниже мерзлого слоя. Максимальное число слоев для данной кривой ρ_k равно 4.

Используя вышеприведенные сведения и сведения о геологическом строении надпойменной террасы р. Лены можно восстановить параметры геоэлектрического разреза на данном пункте наблюдений при решении обратной задачи метода поверхностного импеданса.

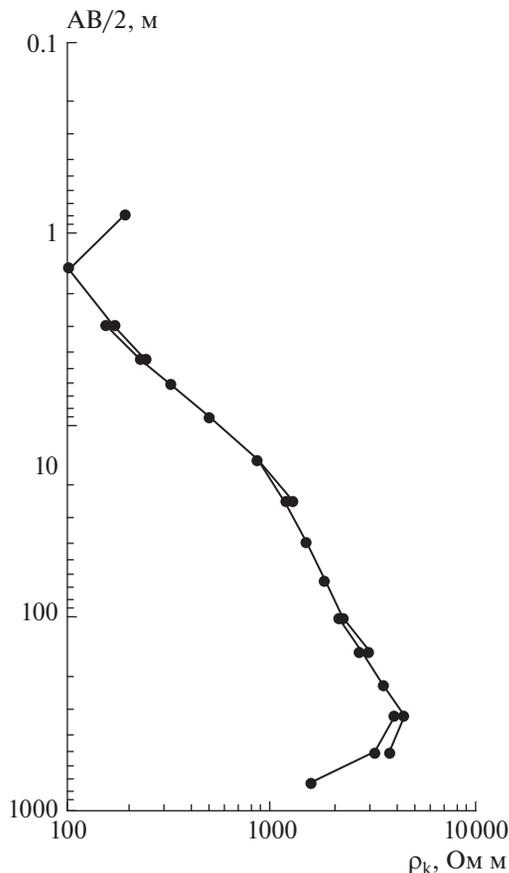
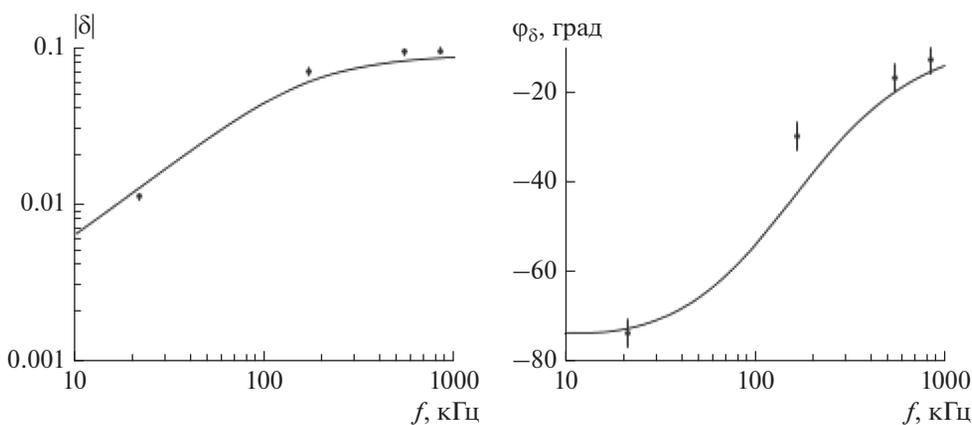


Рис. 1. Кривая кажущегося сопротивления в долине реки.

На рисунке 2 приведены результаты сравнения измеренных и расчетных значений модуля и фазы поверхностного импеданса в зависимости от частоты. Экспериментальные значения модуля и фазы поверхностного импеданса обозначены дискретными точками, а расчетные значения — непрерывными линиями. Для экспериментальных значений фазы импеданса приведены абсолютные погрешности измерений $+3^\circ$. Погрешности измерения модуля импеданса настолько малы, что укладываются в размеры точек. Расчетные значения модуля и фазы поверхностного импеданса выполнены по восстановленным значениям параметров геоэлектрического разреза. Совпадения экспериментальных и расчетных значений модуля и фазы поверхностного импеданса свидетельствует о близости восстановленных значений параметров геоэлектрического разреза к действительным.

В таблице к рис. 2 приведены восстановленные значения параметров геоэлектрического разреза с округлением величины электрического сопротивления в зависимости от ее величины. Из таблицы к рис. 2 следует, что нижняя граница мерзлых рыхлых отложений находится на глубине 24.5 м, а электрическое сопротивление этого слоя составляет 8000 Ом м. Ниже этого слоя залегает коренные породы с аномально низким значением электрического сопротивления — 7 Ом м. Согласно литературным данным, такие значения электрического сопротивления характерны для свободных минерализованных вод или связанных



ϵ	ρ , Омм	h , м
5.0	50	1.5
5.0	3000	3.0
5.0	8000	20
5.0	7	

Рис. 2. Результаты восстановления геоэлектрического разреза в долине реки.

вод, адсорбированных твердыми частицами породы. Возможно, что кровля коренных пород является водоупорным горизонтом для межмерзлотных вод и насыщена водным раствором.

Следует отметить, что полученное значение электрического сопротивления мерзлых рыхлых отложений на данном пункте наблюдений выходит за верхний предел (1950 Ом м) возможных значений, приведенных в работе [Нерадовский, 2019]. Также для коренных пород – его электрическое сопротивление выходит за пределы минимальных значений (24 Ом м), приведенных в этой же работе. Причина может заключаться в зависимости электрического сопротивления слагающих разрез пород от рельефа местности и времени года наблюдений.

На этом же участке были выполнены измерения прибором ADMT-200S с базой 20 м и шагом 5 м. Общая длина профиля составляет 440 м. Интерпретация и построение графиков изолиний напряжения в зависимости от глубины (псевдоразреза) производились с использованием программы обработки результатов измерений на сайте производителя и приведены на рис. 3. В правой части рис. 3 показана шкала распределения разности потенциалов между электродами. Как следует из описания по использованию данного прибора, чем меньше разность потенциалов, тем ниже электрическое сопротивление данной зоны псевдоразреза. В черно-белом варианте темные цвета соответствуют зонам с низкими значениями электрического сопротивления. На рисунке 3 выделяются две горизонтально залегающие области: верхний слой (1), соответствующий изолиниям с высокими значениями разности потенциалов (0.46–0.70) мВ и область 2, ограниченная изолинией 0.3 мВ, соответствующей зоне с низким значением электрического сопротивления. Таким образом, на глубине 26–27 м залегаёт слой с низкими значениями электрического сопротивления, что с погрешностью 1.2–2.2 м совпадает с мощностью рыхлых отложений, определенной по результатам восстановления параметров геоэлектрического разреза. Как следует из рис. 3 качественная оценка распределения электрического сопротивления по глубине соответствует результатам, приведенным в таблице рис. 2, т.е. сверху находится слой с высокими значениями электрического сопротивления, а затем следует горизонт, соответствующий низким значениям разности потенциалов, т.е. зоне с низким значением электрического сопротивления.

На рисунке 4 приведена кривая ρ_k для пункта наблюдения на высокой террасе реки Лена. Как видно из качественного анализа кривой ρ_k на данном участке наблюдается структура, состоящая из 5 слоев. Эта кривая ρ_k также имеет ломаный характер на полуразносах 3.0–4.5 м и более 100 м,

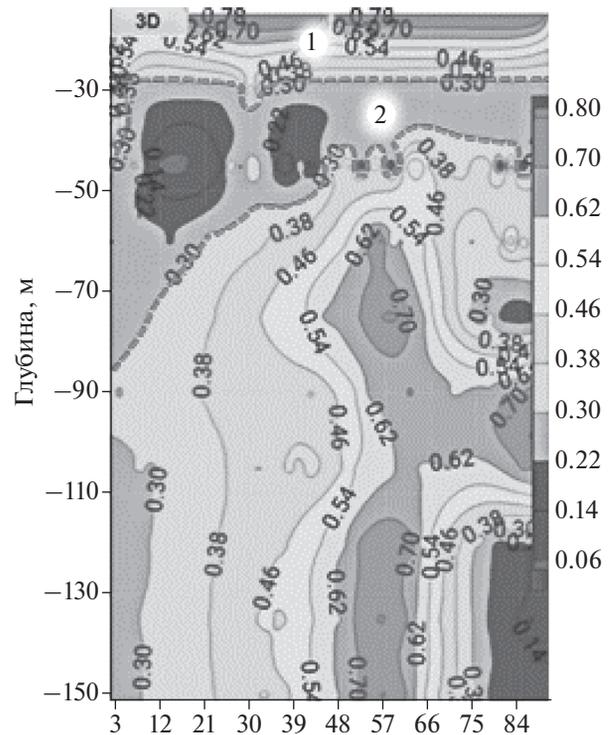


Рис. 3. Изолинии разности потенциалов (мВ) в долине реки.

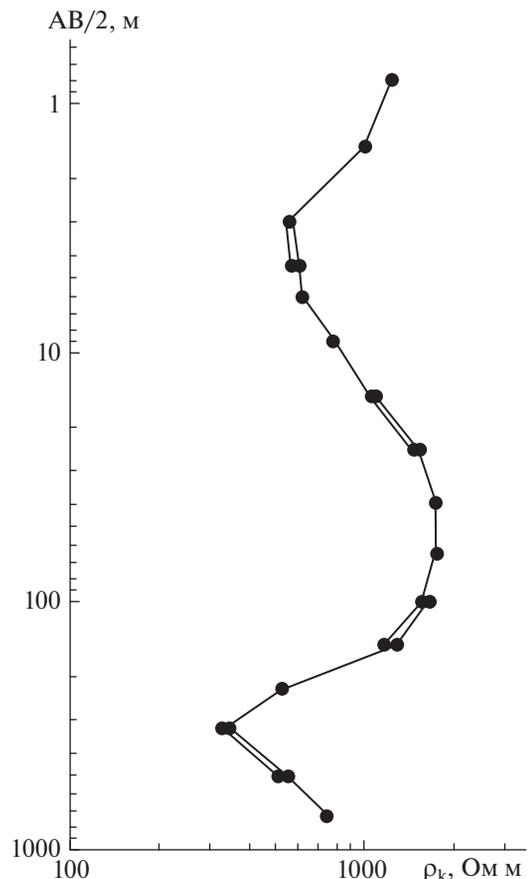
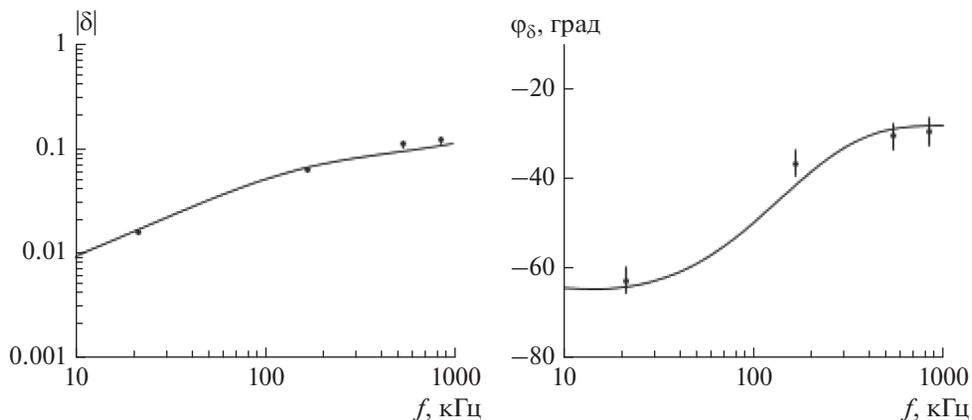


Рис. 4. Кривая кажущегося сопротивления на высокой террасе.



ϵ	ρ , Ом	h , м
5.0	100	2.0
5.0	600	8.0
5.0	4000	20
5.0	40	

Рис. 5. Результаты восстановления геоэлектрического разреза на высокой террасе.

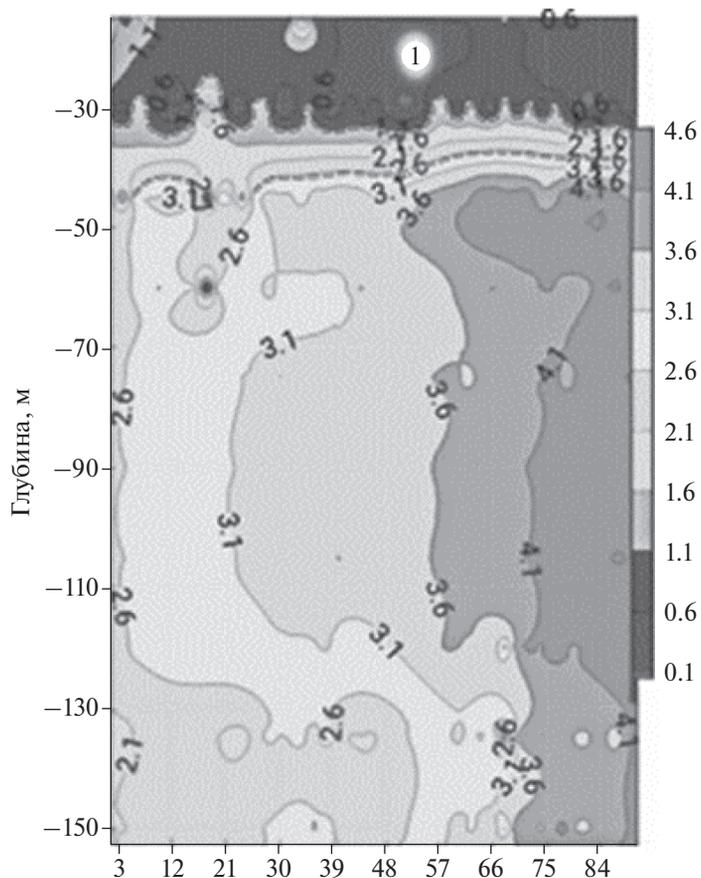


Рис. 6. Изолинии разности потенциалов (мВ) на высокой террасе.

что затрудняет ее количественную интерпретацию. Можно предположить, что резкий спад кривой ρ_k на полуразносе 225 м вызван влиянием уг-

леносного слоя с низкими значениями электрического сопротивления. Далее кривая ρ_k резко уходит вверх, что указывает на наличие высоко-

омного фундамента (песчаников). Такое поведение кривой ρ_k согласуется с геологическим описанием высокой речной террасы, на которой предполагался опорный пункт наблюдения.

В таблице к рис. 5 приведены результаты восстановления параметров геоэлектрического разреза по импедансным измерениям. Мощность мерзлых рыхлых отложений оценивается в 30 м, а их электрическое сопротивление изменяется с глубиной от 600 Ом м до 4000 Ом м. Нижний горизонт с электрическим сопротивлением 40 Ом м может соответствовать нижележащим угленосным отложениям небольшой толщины.

На рисунке 6 приведен псевдоразрез изолиний разности потенциалов, полученный после обработки результатов измерений прибором ADMT-200S. Согласно рис. 6, верхний слой песчаных рыхлых отложений вместе с прослоями угленосных отложений идентифицируется как один низкоомный слой (область 1) с мощностью порядка 30–32 м с значениями разности потенциалов 0.6 мВ. Получается, что слой с низким электрическим сопротивлением, полученный при восстановлении методом поверхностного импеданса не отражается на псевдоразрезе разности потенциалов из-за его малой толщины. Таким образом, нижние границы рыхлых отложений, полученные методом поверхностного импеданса и методом аудиоманнитотеллурического зондирования, совпадают с достаточной для практики точностью.

Далее по глубине залегают высокоомные породы, которые представлены песчаниками согласно геологическому описанию участка наблюдения. Эта область на рис. 6 характеризуется изолиниями с разностью потенциалов 2.6 мВ и выше, что соответствует зоне с более высокими значениями электрического сопротивления, чем область 1. На рисунке 4 песчаникам соответствует резкий подъем кривой ρ_k на полуразносах 325 м под углом в 45°, что соответствует их очень большому, теоретически, бесконечному электрическому сопротивлению.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, детектор воды ADMT-200S позволяет получить качественную картину распределения электрического сопротивления верхних слоев земли и количественные оценки мощности мерзлых рыхлых отложений.

Использование этого мобильного прибора ADMT-200S в комплексе с другими геофизическими и радиоволновыми методами окажется весьма востребованным для определения параметров геоэлектрического разреза подстилающей среды, которые будут использованы при составлении электрических моделей радиотрасс в целях

прогнозирования распространения радиоволн ДВ-СВ диапазонов вдоль земной поверхности на территории северо-востока России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ангархаева Л.Х., Башкуев Ю.Б., Мельчинов В.П. Обратная задача для слоистой импедансной среды // Радиотехника и электроника. Т. 42. № 10. С. 1169–1173. 1997.
- Бердичевский М.Н. Электрическая разведка методом магнитотеллурического профилирования. М.: Недра, 1968. 253 с.
- Игнатченко Н.А. Геологическое строение и формирование Якутско-Кангаласского района. (Ленский угольный бассейн) / Академия наук СССР. Якут. филиал сиб. отд-ния. Ин-т геологии. М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1961. 144 с
- Макаров Г.И., Новиков В.В., Рыбачек С.Т. Распространение электромагнитных волн над земной поверхностью. М.: Наука, 1991. 196 с.
- Нерадовский Л. Г. Электросопротивление мерзлых пород долины “Туймаада” // Научный форум: Технические и физико-математические науки: // Сб. материалов XXI междунар. науч.-практ. конф. № 2(21). М.: Изд. “МЦНО”, С. 19–28. 2019.
- Никитин А.А., Хмелевской В.К. Комплексирование геофизических методов: учебник для вузов. – 2-е изд. испр. и доп. М.: ВНИИгеосистем, 346 с. 2012.
- Парфентьев П.А., Пертель М.И. Измеритель поверхностного импеданса на СДВ-СВ диапазоны//Проблемы дифракции и распространения волн. (Низкочастотный волновод Земля – ионосфера). Алма-Ата: Гылым. С. 133–135. 1991.
- Правкин С.А., Большианов Д.Ю., Поморцев О.А., Савельева Л.А., Молодьков А.Н., Григорьев М.Н., Арсланов Х.А. Рельеф, строение и возраст четвертичных отложений долины р. Лены в Якутской излучине // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. Т. 63. Вып. 2. С. 209–229. 2018.
- Пылаев А.А. Руководство по интерпретации вертикальных электрических зондирований изд. 2-е, испр. М.: Недра, 148 с. 1968.
- Рекомендации по комплексированию геофизических методов при мерзлотной съемке/ПНИИИС – М.: Стройиздат, 1987
- Спектор В.В., Бакулина Н.Е., Спектор В.Б. Рельеф и возраст аллювиального покрова долины р. Лены на “Якутском разбое” // Геоморфология. № 1. С. 87–94. 2008.
- Угольные бассейны и месторождения Забайкалья, Якутской АССР, Дальнего Востока, острова Сахалин и островов Ледовитого океана. Кн. 2. Месторождения и бассейны Якутской АССР и островов Ледовитого океана / Г.Д. Петровский (ред.) и др. 399 с. 1973.
- Якутов В.С. Электропроводность и геоэлектрический разрез мерзлых толщ. М.: Наука, 179 с. 1968.
- Operation Manual of ADMT-200S Natural Electrical Prospecting Instrument Water Detector. 2021. <http://www.aiduny.com/>