

Результаты комплексирования методов ЭМС и МСК для изучения ВЧР в условиях распространения ММП с целью прогноза глубины погружения заряда

- Дмитриев Ю.Ю., ЗАО «Аэрогеофизическая разведка», г.Новосибирск
- Гоц И.А., ПАО «ГЕОТЕК Сейсморазведка», г.Москва
- Батманов И.А., ОАО «Севергеофизика», г.Ухта
- Тригубович Г.М., АО СНИИГГИМС, г.Новосибирск
- Лыгин. С. К., ООО «ЛУКОЙЛ-Коми», г.Усинск

Введение

С целью опробования возможностей комплекса геофизических методов, включающего обращенный микросейсмокаротаж (МСК), электромагнитную съёмку (ЭМС), электрокаротаж (КС) и геологическое сопровождение бурения, для прогнозирования оптимальных глубин заложения зарядов при выполнении полевых сейсморазведочных работ 3D на границе Ненецкого АО и Республики Коми, в марте-апреле 2017 г. были проведены опытно-методические работы на площади 60 кв.км. Объем работ составил - 200 пог.км ЭМС, МСК в 60 скважинах, электрокаротаж в 19 скважинах, геологическое сопровождение бурения в 60 скважинах.

Главной задачей исследований являлось опережающее изучение геологического строения верхней части разреза (ВЧР) с целью оптимизации глубины возбуждения упругих колебаний для улучшения частотно-динамических характеристик регистрируемых сейсмических данных при сейсморазведочных работах.

История вопроса

Изучение ВЧР северной части Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции (ТПП) началось одновременно с первыми попытками проведения сейсморазведочных работ на этой территории в 1953 году. Однако, в силу технологических причин и организационно-технических

особенностей проведения полевых работ (работы в подавляющем большинстве проводились в модификации так называемой «речной сейсморазведки») широкого распространения эти работы не получили.

Систематический характер работы по изучению геологического строения и сейсмогеологических характеристик ВЧР приобрели в 60-х – 70-х годах прошлого столетия в ходе работ МОВ.

Основными методиками изучения ВЧР в тот период были классический прямой микросейсмокаротаж и МПВ.

С повсеместным переходом на современную методику сейсморазведки МОГТ в модификации 2D в конце 70-х – начале 80-х годов прямой МСК был вытеснен более технологичным обращенным МСК, а работы МПВ стали выполняться в модификации центрально-симметричного МОВ-МПВ.

Изучение ВЧР проводилось с целью уточнения скоростной модели среды, использовавшейся при обработке результатов полевых работ. Работы выполнялись в составе основного комплекса полевых СРР в Большеземельской тундре, в Малоземельской тундре и на о.Колгуев.

Задача оптимизации условий возбуждения в тот период не ставилась, т.к. по аналогии с более южными регионами за основу строения ВЧР была принята простая слоистая модель и повсеместно применяемыми параметрами БВР

априори была глубина 20 м при зарядах 15-25 кг, а качество каждой сейсмограммы оценивалось визуально, на основании общепринятых субъективных предпосылок.

Регистрация как МСК, так и МОВ-МПВ осуществлялась типовыми аналоговыми 24-х канальными сейсмостанциями типа «Поиск», позднее - «СМОВ-0-24» с использованием самодельных сейсмодос из одиночных сейсмодетекторов СВ-20П с шагом 1-5 м. Возбуждение при МСК производилось с помощью гирлянды ЭДС с шагом по стволу скважины 1-2 м, при МОВ-МПВ – зарядами 2,5 кг в одиночных скважинах глубиной 5-10 м. Шаг наблюдений составлял 3-5 км по профилям МОГТ.

В начале 80-х годов 7-ой Полевой экспедицией в летнее время предпринимались единичные попытки опережающего изучения ВЧР электроразведкой по методике ВЭЗ, которые распространения не получили ввиду технической сложности реализации полевого цикла.

Из-за сильной латеральной изменчивости ВЧР и не соответствующей ей плотности наблюдений все указанные методики поставленной цели не достигали. Построить достоверную карту скоростей ВЧР на площадь работ не удавалось, поэтому обработка достаточно успешно проводилась с использованием априорной участковой скоростной модели ВЧР с постоянной скоростью в верхнем слое, определяемой по первым вступлениям производственных сейсмограмм, и коррекцией статических поправок с учётом данных регистрации То.

Работы по изучению ВЧР в северной части ТПП, зоне повсеместного развития многолетнемерзлых пород (ММП), в современной модификации обращённого МСК с основной целью оптимизации глубины заложения заряда были возоб-

новлены в 2011 году по настоянию некоторых заказчиков сейсморазведочных работ.

Но, как и прежде, из-за сильной латеральной (и глубинной) изменчивости строения ВЧР, проблема априорного получения объективных критериев для глубины заложения заряда на каждом ПВ оставалась нерешенной.

Обоснование комплекса методов исследования ВЧР

При выборе комплекса методов исследования ВЧР в ММП мы опирались на имеющийся опыт по решению аналогичных задач в Западной Сибири [1], в Эвенкии и в северной части ТПП [9].

Опыт свидетельствует, что в изучении ВЧР необходим жесткий системный подход. Системность подхода должна учитывать наиболее информативные методы, устоявшиеся в структуре сейсморазведочных работ, и в проверке новых технологий, которые способны претендовать на использование в составе стандартного комплекса полевой сейсморазведки.

Разумеется, что в основе комплекса изучения ВЧР должен быть МСК (или другой информативный метод малоглубинной сейсморазведки) и методы стандартного каротажа, позволяющие более детально расчленивать разрез (гамма-каротаж, электрокаротаж). Реализация гамма-каротажа связана с серьезными сложностями в практическом использовании (большой диаметр скважинного прибора – 28-36 мм). Электрокаротаж (диаметр прибора 8 мм) можно проводить и при сложных условиях ВЧР при зарядке зонда в полую шнековую колонну.

Чтобы проследить локальные изменения разреза между скважинами МСК, нужен метод непрерывного изучения

строения ВЧР в интервалах между скважинами объективного контроля.

Для методов наземной геофизики при исследовании ВЧР существует ряд объективных ограничений, связанных с условиями их реализации и информативности:

1. Большая площадь участков работ (сотни квадратных километров) при протяженности профилей возбуждения более 1000 пог.км. При таких объемах технология наземных геофизических исследований должна обеспечивать очень высокую производительность (не менее 20 пог.км в смену), мобильность, низкую себестоимость и возможность существенного опережения БВР для оперативного планирования буровых работ;

2. Проведение исследований в мерзлых и талых породах различного состава;

3. Выполнение работ в зимний период в условиях Крайнего Севера и при наличии снежного покрова мощностью более 1м, не только в тундре, но и в местности с плотным кустарниковым покровом;

4. Глубинность исследований до 30-45м;

5. Детальность расчленения разреза в интервале глубин 3-45м не хуже 0.5-1м;

6. Оперативность обработки геофизических данных, позволяющая своевременно (за 3-4 дня до буровых работ) выдавать материалы по прогнозу условий БВР. Процедуры обработки должны обеспечивать глубокий анализ полученных данных, исходя из условия обработки материалов в объеме 20-30 пог.км в течение одной ночи.

При таких исходных условиях круг методов наземной геофизики, применимых для детального изучения ВЧР на больших площадях, резко сокращается.

Фактически до разработки технологии импульсных электромагнитных зондиро-

ваний становлением поля во временной области, которая в последние 10-12 лет была усовершенствована до уровня непрерывного электромагнитного сканирования разреза (выполняемого в движении), задача исследования ВЧР для целей сейсморазведки МОГТ методами наземной электроразведки не решалась в принципе.

Особенностью электромагнитных зондирований ЭМС является низкая информативность в интервале глубин 0-3м.

Обобщая вышесказанное, предложенный комплекс методов исследования ВЧР включает:

1. МСК и электрокаротаж в одних и тех же скважинах (расположенных друг от друга на удалении не более 2м). Сопоставление данных МСК и электрокаротажа позволяет определить характер и уровень связи сейсмических и электрических параметров ВЧР;

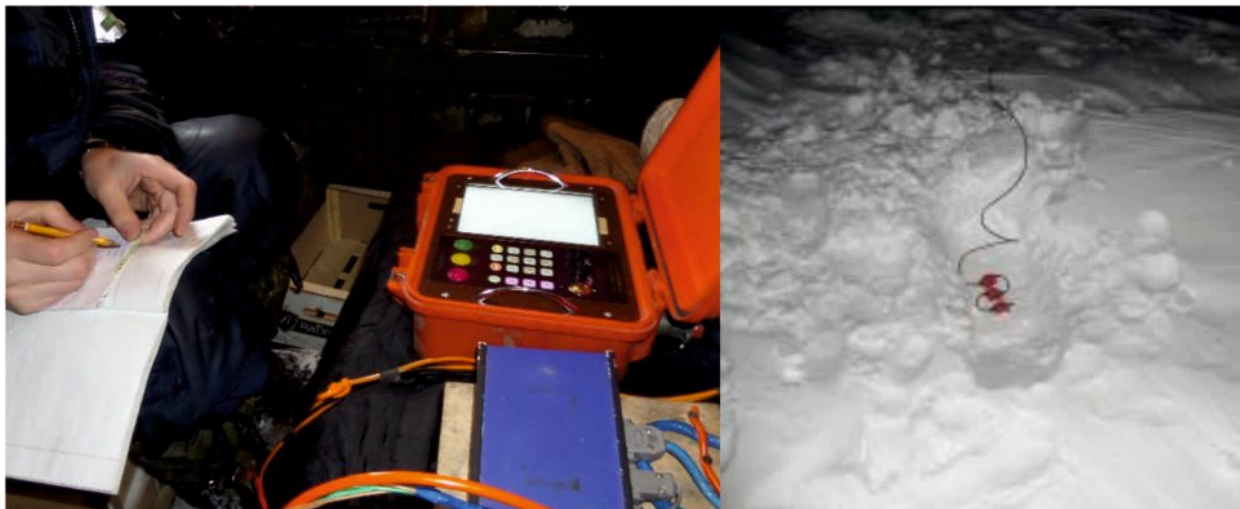
2. ЭМС, предназначенный для непрерывного прослеживания между опорными скважинами зон ВЧР, благоприятных (по данным МСК) для заложения заряда на каждом ПВ;

3. Геологическое сопровождение бурения в скважинах МСК и электрокаротажа, позволяющее в ряде случаев по шламу определить основные характеристики геологического строения ВЧР и в совокупности с данными электрокаротажа и МСК построить сводную геологическую колонку.

Методика МСК

Сейсмокаротажные работы проводились с помощью сейсмической станции SGD-SEL (НПК «СибГеофизПрибор»)(Рис. 1).

При выполнении МСК прием колебаний осуществлялся с помощью 10-метровой 4-канальной расстановки с



▲ Рис. 1. Станция SGD-SEL на точке МСК.

установкой каналов на расстояниях 1, 3, 5, 10 м от устья скважины. В качестве приемников использовались геофоны GS-20DX.

Возбуждение упругих колебаний выполнялось в скважине с использованием взрывной косы с электродетонаторами, опущенной в ствол скважины до забоя, по 1-3 ЭДС на каждое наблюдение. Шаг исследования по стволу скважины – 1 м.

Отработка ЭДС велась снизу-вверх (во избежание нарушения проводимости проводов от взрывов) с использованием системы SGD-S.

При выполнении работ МСК обеспечивалась предельно качественная установка всех сейсмоприемников в вертикальном положении с обязательным заглублением в снег.

Обработка данных МСК производилась с использованием комплекса FQC-MSK (О.А.Цуканов, ОАО «Севергеофизика») непосредственно на базе партии. Единичное наблюдение МСК состояло из записи всеми геофонами одного взрыва ЭДС. Отработка МСК по одной скважине состоит из 30-ти единичных записей с глубин в интервале 29.5 м – 0.5 м. Результат отработки МСК оценивался по монтажу выборки записей точек возбуждения

из единичных записей по каждой точке приема в отдельности.

Для кинематической интерпретации использовался стандартный метод определения слоёв по прямолинейным участкам графика, т.е. постоянная скорость в слое.

Методика электрокаротажа

Электрокаротаж скважин производился специально изготовленным зондом, обеспечивающим его зарядку в скважину как в открытый ствол, так и через полую шнековую колонну. Диаметр зонда 8 мм. Схема зонда симметричная А 0.5 М 0.5 N 0.5 В. Режим измерений точечный через 0.2 м. Сухие скважины во время каротажа заполнялись водой. Измерения выполнялись аппаратурой «Syscal-Pro-72» (Франция). Обработка данных производилась в программе Excel.

Методика ЭМС

Технология ЭМС, реализованная на основе измерений в движении, позволяет получить непрерывный геоэлектрический разрез любой протяжённости с дискретностью замеров 0.1-0.2 м по латерали [2, 3].

При проведении ЭМС одновременно использовались выносная и соосная

системы измерений. Эти генераторно-измерительные конструкции позволяют исследовать геоэлектрический разрез в интервале глубин 3-35 м за счёт подавления собственных процессов в генераторном контуре. В выносной системе подавление собственных процессов происходит за счёт разнесения генераторной и измерительных антенн, в соосной – за счёт использования обратных токов. Соосная установка имеет линейные размеры в 5 раз меньшие, чем выносная.

Обе генераторно-измерительные системы размещались на надувном каркасе, буксируемом по сейсмическим профилям с помощью гусеничного вездехода типа ГАЗ со скоростью 7-10 км/ч. Размер пневмокаркаса составлял 2×9 м (Рис.2), расстояние до вездехода 10-12 м. Технология ЭМС, выполняемая в движении, в отличие от других методов наземной электроразведки обеспечивает чрезвычайно высокую плотность точек измерений (более 30 000 на 1 км съёмки), благодаря чему обеспечивается высокая точность регистрации процесса становления поля и практически непрерывное исследование геологического разреза, позволяющее выявить локальные изменения геологической среды. Технология ЭМС успешно применялась для исследования ВЧР на нескольких объектах работ МОГТ и защищена патентами РФ № 2194294, 47533, 52199, 52200.

Измерения методом ЭМС выполнялись комплектом аппаратуры: измеритель «Импульс-Д13», генератор тока «КТ-5». Аппаратура разработана и изготовлена в ЗАО «Аэрогеофизическая разведка», г. Новосибирск.

Топографическая привязка точек измерений в процессе съёмки осуществлялась спутниковой системой GPS, встроенной в измеритель. Погрешность плановой привязки ЭМС не превышает 1,5 м.

Обработка результатов измерений ЭМС проведена с помощью пакета лицензионных программ «EmData Processor» [8] с использованием процедуры «dS/H – дифференциальная проводимость по H» с последующим пересчётом в удельные сопротивления. В качестве вспомогательных применялись программные продукты «Convert» и «Gorizont». Все программы разработаны ЗАО «Аэрогеофизическая разведка».



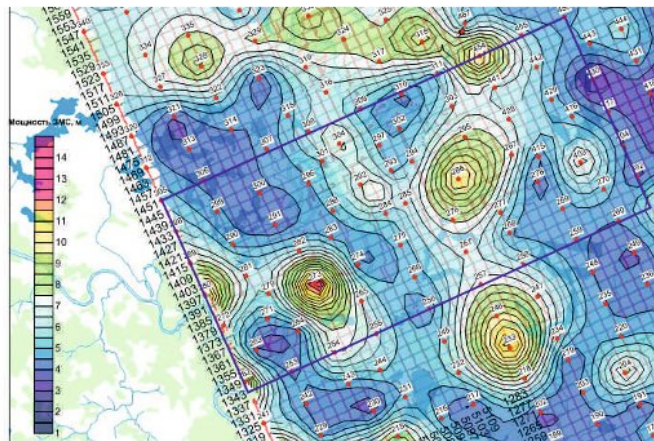
▲ Рис. 2. Пневматическая конструкция ЭМС.

Результаты МСК

Выполненные работы методом МСК в очередной раз показали, что строение ВЧР в данном регионе чрезвычайно изменчиво (рис.3). ЗМС изменяется от практически полного отсутствия до 10 и более метров. При этом зависимость мощности ЗМС от поверхностных условий не наблюдается. Кинематическая интерпретация, традиционная для данного региона, не дает достаточной информации для выбора оптимальных глубин заложения заряда.

Визуально на волновой картине записей МСК можно выделить различные слои с хорошими и плохими динамическими показателями, однако большинство из этих слоев не выделяются по кинематической интерпретации (рис.4).

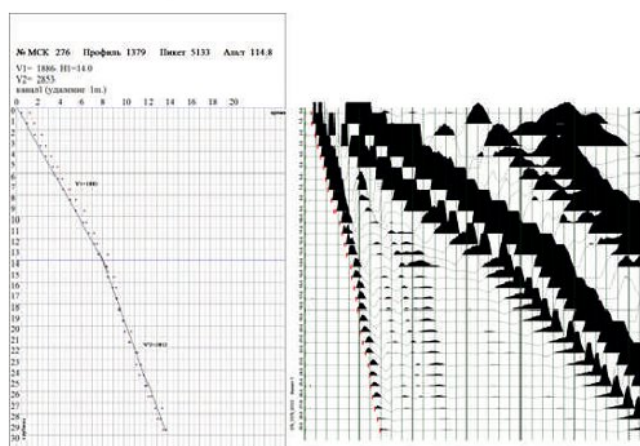
В основном ВЧР как на участке опытных работ, так и в целом на всей площади



▲ Рис. 3. Схема распределения мощности ЗМС на участке ОМР.



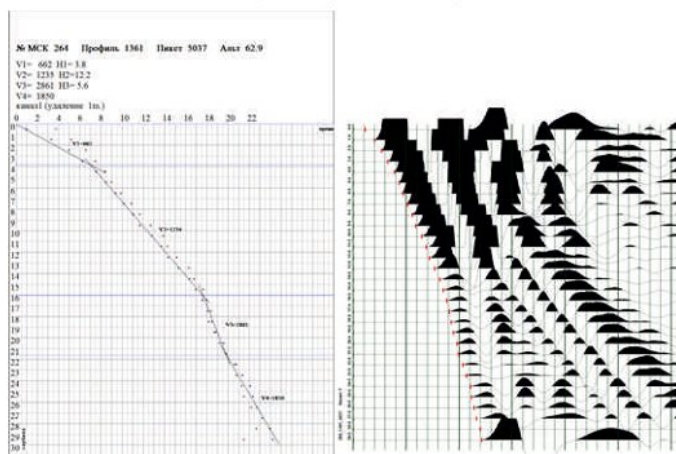
▲ Рис. 4. Схема распределения скоростей в подстилающих породах на участке ОМР.



▲ Рис. 5. Типичная волновая картина МСК в мерзлоте.

двухслойная (рис. 5), на отдельных точках можно выделить 3-4 слоя (рис. 6) с различными скоростями, связанными с наличием в разрезе мерзлых пород – торфа, песков, глин, а также «плывунов».

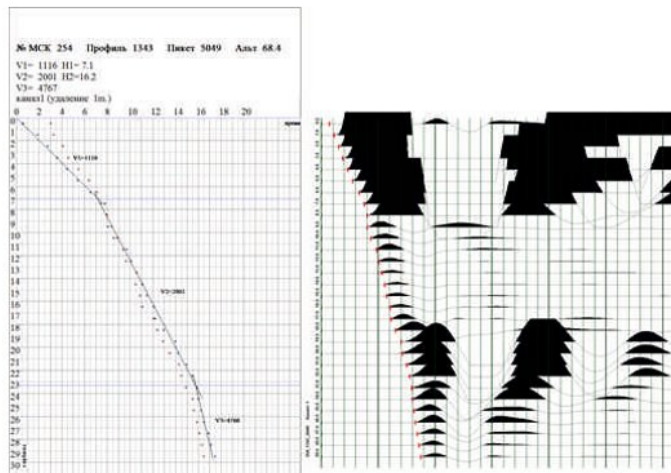
Если, принимая решение об оптимальных глубинах заложения заряда, ориентироваться исключительно на скоростные характеристики слоев можно прийти к ошибочному выводу. Например, на рис. 6 ЗМС представлена двумя слоями со скоростями от 662 м/с до 1234 м/с. Суммарная мощность слоев – 16 м. Ниже выделяются подстилающие породы со скоростями 2861 м/с. Соответственно, можно сделать вывод о том, что глубина заложения заряда должна быть 22-26 метров. Однако, визуально на



▲ Рис. 6. Пример четырехслойной МСК.

записи можно отметить, что ниже глубины 13.5 м. амплитуда сигнала значительно затухает, а в районе, казалось бы, оптимального интервала 22-24 метров амплитуда сигнала вообще минимальна. При этом так же отчетливо видно, что увеличение глубины не приводит к улучшению ни формы сигнала, ни частоты. То есть в данном случае глубина заложения заряда не должна превышать 13.5 м.

В другом примере на рис. 7 обратная ситуация. Чтобы зарядить ниже ЗМС достаточно глубины 13-17 метров. Однако это худший по динамическим показателям интервал, а оптимальными являются глубины от 19.5 до 22.5 м, где динамически выделяется «плывун».

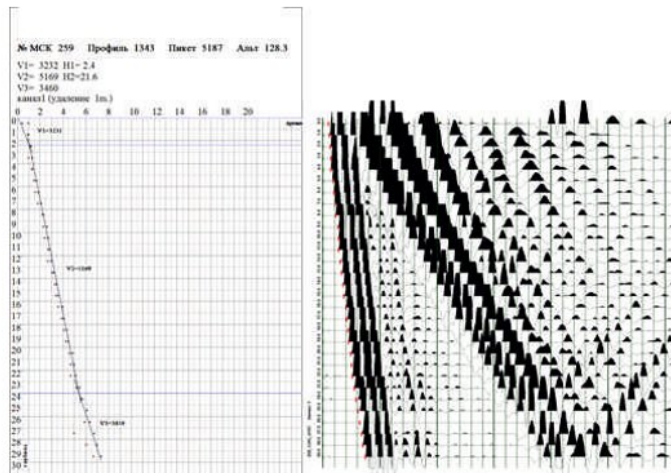


▲ Рис. 7. Пример трехслойной МСК.

Из всего выше сказанного, на наш взгляд, следует, что МСК, даже с достаточно высокой для районов его традиционного применения плотностью 1МСК/1кв.км, в северной части ТПП (зоне сплошного распространения ММП) задачи построения скоростной модели ВЧР, соответствующей масштабу и параметрам съёмки МОГТ, не решает.

Как показывает всесторонний анализ, данные МСК, конечно, позволяют определять оптимальные глубины заложения зарядов, но из-за сильной латеральной изменчивости строения ВЧР справедливы только в тех точках, где получены. Даже в этом случае остаются «белые пятна», так как не редки случаи, когда волновая картина МСК вообще не поддаётся интерпретации (рис. 8). Причём, для участка работ это характерно не только в зоне распространения ММП, но и в зонах ожидаемого растепления (возле реки).

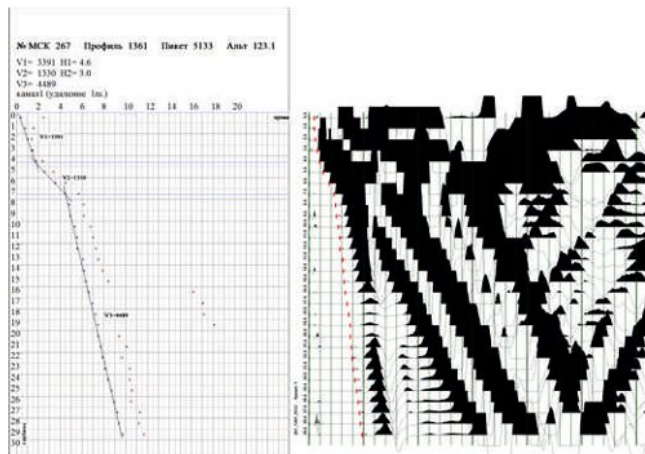
Очевидно, что оптимальная глубина заложения в гораздо большей степени определяется характером волновой картины МСК, чем скоростной и пластовой моделью, полученной по данным МСК. На рис.9 представлен еще один вариант волновой картины в мерзлотном разрезе: сама МСК трехслойная, ЗМС отсутствует, скорость в первом слое



▲ Рис. 8. Пример неинтерпретируемой МСК в мерзлоте.

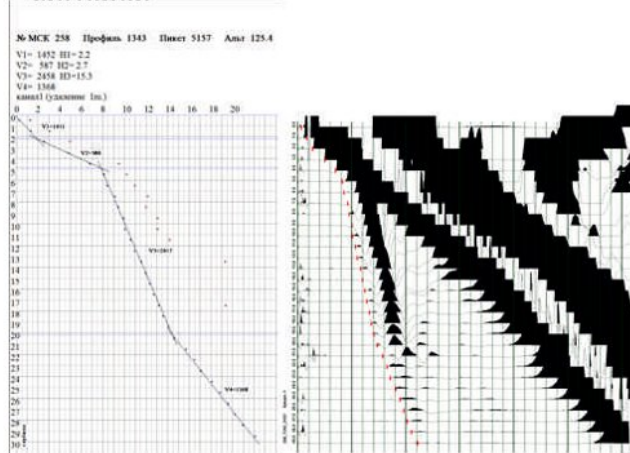
3391м/с, во втором слое наблюдается скоростная инверсия (1330м/с), далее от глубины 7.5м скорость не изменяется и при этом аномально высока - 4489м/с. При визуальном анализе динамики записи от 16.5 до 20.5м выделяется слой с высоким затуханием амплитуды сигнала. В данном случае выбранная на опытных работах глубина заложения заряда оптимальна (15м), поскольку низкоамплитудный слой находится ниже, но для выбора глубин на некотором удалении от скважины МСК было бы полезно иметь представление о поведении данного слоя. На соседней скважине МСК (см. рис 10) мощность ЗМС+ЗПС составляет 12 метров, по требованиям ГТЗ интервал зарядки скважины -18-20 метров. На этих глубинах амплитуда затухает, хотя и не так явно как на рис. 9.

В данном случае нельзя достоверно прогнозировать оптимальные глубины заложения заряда на удалении от точек МСК ни по кинематическим характеристикам (так как ЗМС увеличилась вдвое и непонятно, произошло это плавно или скачкообразно в какой-то точке), ни по динамическим (так как, даже если на основе визуального анализа можно предполагать, что схожая картина на соседних точках связана с одними лито-



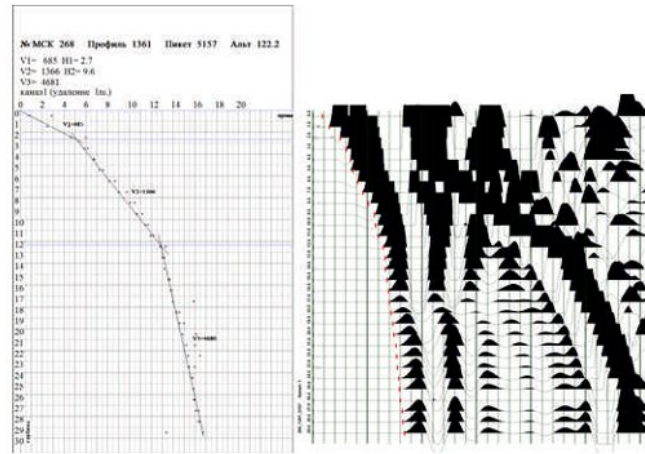
▲ Рис. 9. Пример сложной волновой МСК в мерзлоте (МСК 267).

логическими особенностями, остается непонятным поведение слоя между точками МСК в различных направлениях). Например, в точке расположенной севернее (рис. 11), мощность ЗМС уменьшилась, а в четвертом слое с глубины 20 метров наблюдается скоростная инверсия и сильное затухание амплитуды сигнала.



▲ Рис. 11. Пример сложной волновой МСК в мерзлоте (МСК 258).

Вышеприведённые примеры картопостроений носят достаточно сглаженный характер и зачастую не соответствуют реальному строению ВЧР на промежуточных между точками МСК ПВ рядовой сети наблюдений МОГТ, что исключает возможность их использования для



▲ Рис. 10. Пример сложной волновой МСК в мерзлоте (МСК 268).

целей оптимизации глубины заложения зарядов.

Дальнейшее сгущение сети наблюдений МСК до плотности, обеспечивающей действительно достоверное отражение строения ВЧР в масштабе съёмки МОГТ, приведёт к затратам, сопоставимым с собственно сейсморазведочными работами.

Таким образом, проведение работ МСК в сегодняшней модификации для целей оптимизации глубины заложения заряда в зонах распространения ММП лишено всякого практического смысла. Совершенно очевидно, что назрела необходимость разработки методики и технологии работ по изучению строения ВЧР, позволяющих распространить данные точечных опорных зондирований МСК на всю площадь исследований с сопоставимой, как минимум, достоверностью и сопоставимо меньшими затратами.

Результаты электрокаротажа, оценка корреляционной связи сейсмических и электрических характеристик ВЧР

Выбранная конструкция зонда КС позволяет выделять в разрезе слои мощностью 1 м и определять непосредственно

дственно в них удельные сопротивления при мощности слоев более 1,5 м [7].

Диапазон изменения удельных сопротивлений по данным КС в пределах участка ОМР составляет от 15-20 Ом*м до 300-700 Ом*м. Такой диапазон сопротивлений указывает на достаточно разнообразный литологический состав отложений ВЧР и на изменение их мерзлотного состояния. Исходя из этого, строение ВЧР можно охарактеризовать как весьма сложное и сильноизменчивое.

С учётом данных геологической документации шлама можно дать геоэлектрическую характеристику отложений ВЧР в пределах участка ОМР:

1. Удельные сопротивления 15-20 Ом*м соответствуют талым суглинкам-глинам;

2. Удельные сопротивления 30-50 Ом*м соответствуют пластично-мёрзлым суглинкам-глинам;

3. Удельные сопротивления 60-100 Ом*м указывают на увеличение доли песчаной составляющей в глинисто-суглинистых отложениях и соответствуют талым супесям, пластично-мёрзлым суглинкам-глинам с тонкими прослоями супесей-песков или талыми пескам с тонкими прослоями суглинков-глин;

4. Удельные сопротивления 200-250 Ом*м соответствуют либо мёрзлым супесям, либо талым пескам;

5. Сопротивления более 400-700 Ом*м соответствуют пескам (супесям) мёрзлым.

Необходимо особенно отметить, что в пластично-мерзлом разрезе (при отрицательных температурах пород до -0,5-2 градусов Цельсия, характерных для большей части территории ММП РФ) физические свойства суглинистых пород слабо подвержены изменению. В них только появляются кристаллики льда (от 5% до 15%), обусловленные заморажива-

нием свободной воды. Чтобы такие породы перевести в другое фазовое состояние, необходимо их заморозить до температур не менее -50-70 градусов Цельсия (такое возможно только в слое сезонного промерзания, но и то не всегда и не везде). Слабые изменения температурно-фазовых переходов нельзя зафиксировать по данным документации шлама – необходимы термометрические измерения. Разрез суглинистых отложений по своим физическим свойствам (сейсмическим и электрическим) в целом слабо зависит от мерзлотного состояния.

Аллювиальные породы песчаного состава (супеси и пески), наоборот, в мерзлой фазе (при отрицательных температурах всего -0,1-0,3 градусов Цельсия) кардинально меняют свои физикомеханические свойства.

Эти особенности мерзлой ВЧР мы и наблюдаем на сейсмограммах МСК. Чтобы прояснить этот вопрос, следует обратиться к фундаментальным исследованиям Лещикова [5] и Цытовича [4].

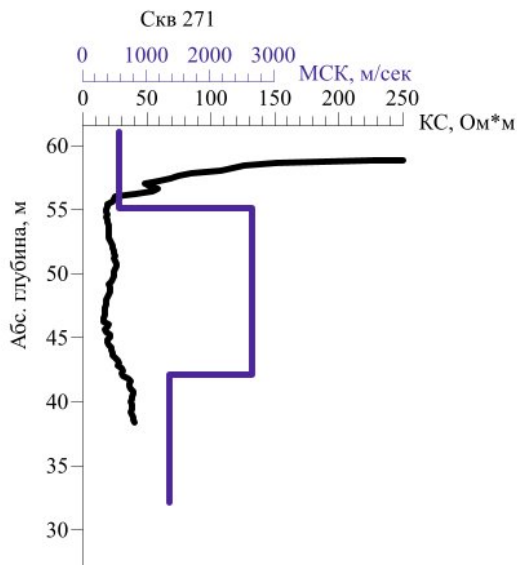
Анализ сопоставлений КС и МСК подтвердил наличие корреляционных связей между электрическими и сейсмическими характеристиками ВЧР (рис.12).

Между тем, следует отметить ряд особенностей выполненных сопоставлений:

1. МСК менее детально расчленяет разрез, чем КС, что может быть связано как с различной детальностью исследований по оси скважины (МСК через 1 м, КС через 20 см), так и с особенностями обработки материалов МСК (Рис. 13);

2. На некоторых годографах МСК практически отсутствует дифференциация слоёв по скоростям, хотя данные электрокаротажа показывают довольно изменчивый разрез (Рис. 14);

3. Отмечен случай резкого отличия



▲ Рис. 12. Типичный пример хорошей корреляционной связи данных МСК и КС.

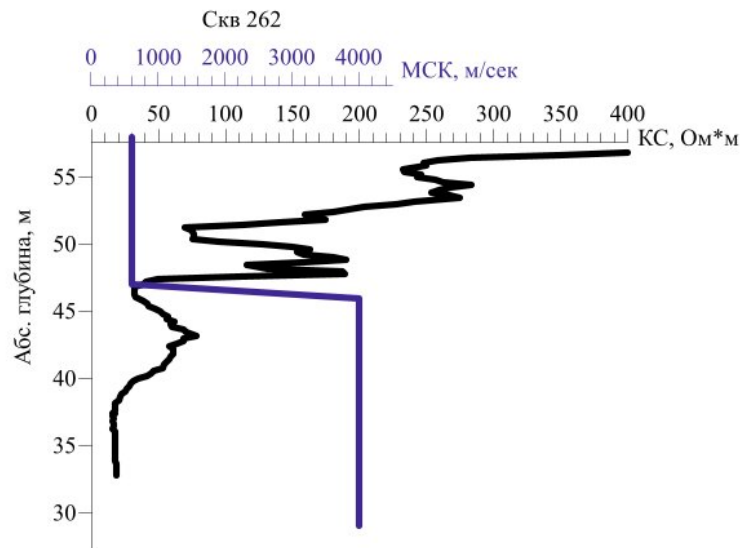
состава шлама в скважинах КС и МСК, расположенных друг от друга на расстоянии не более 2-2,5 м, что связано с сильной латеральной изменчивостью ВЧР.

Более детальный анализ сопоставлений КС и МСК позволил количественно оценить тесноту корреляционной связи электрических и сейсмических характеристик ВЧР (Рис.15).

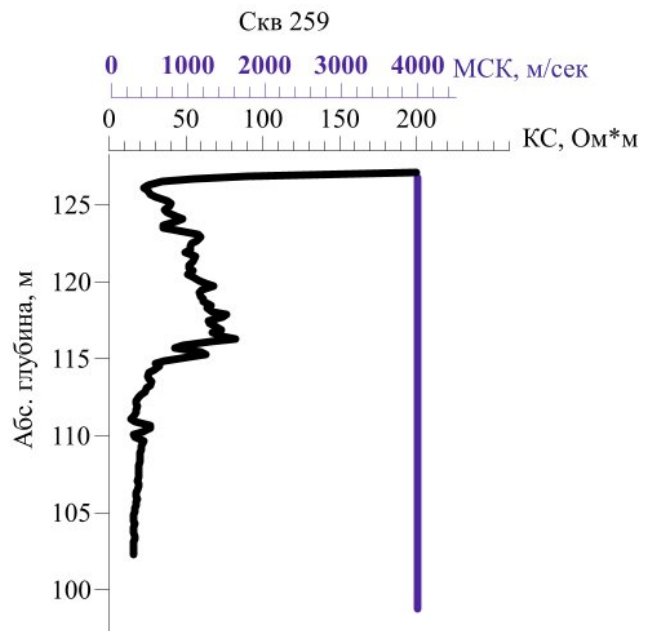
Полученное поле корреляции полностью подтверждает зависимость, установленную ранее для районов Западной Сибири в условиях аллювиального разреза [1], и соответствует накопленным данным по связи амплитуды сейсмического сигнала и геоэлектрического строения ВЧР в районах Западной Сибири, Эвенкии и Севера Европейской части РФ.

Главные практические выводы из полученной зависимости:

1. Наиболее сильные (до 4-х раз и возможно более) изменения в амплитудах, регистрируемых МОГТ, наблюдаются в области значений удельных сопротивлений, характерных для глинистых пород. Эти изменения в большей степени связаны не с мерзлотным состоянием ВЧР, а с ростом доли песчаных отложений



▲ Рис. 13. Пример слабой дифференциации ВЧР методом МСК по сравнению с КС.

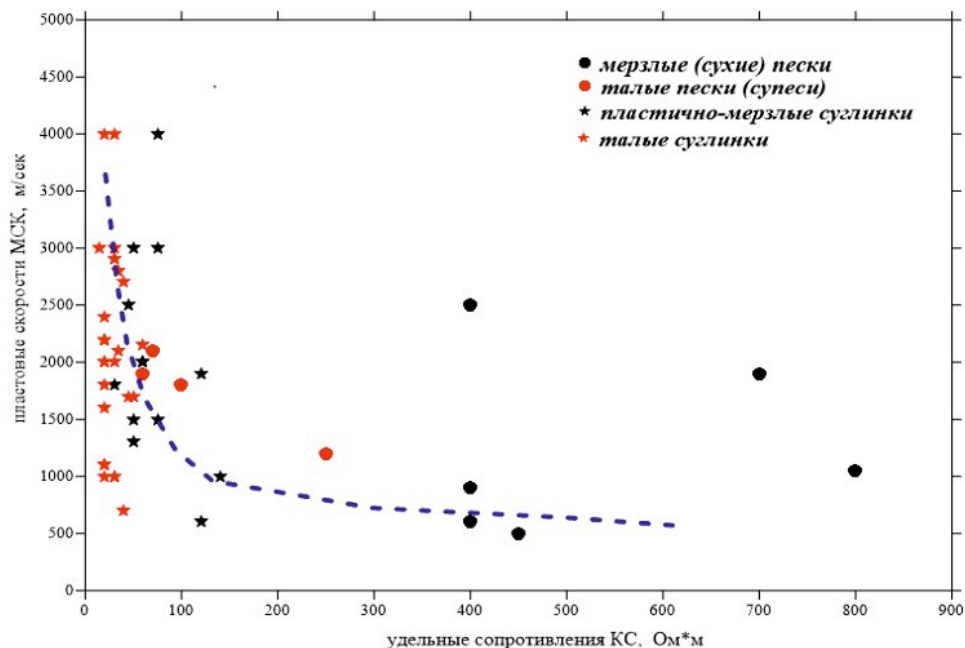


▲ Рис. 14. Пример отсутствия скоростной дифференциации слоёв по данным МСК, хотя по данным электрокаротажа разрез слоистый.

в разрезе ВЧР, что при бурении контролировать практически невозможно;

2. В области значений удельных сопротивлений ВЧР, характерной для сухомёрзлых и сухих песчаных отложений, нельзя рассчитывать на получение высоких амплитуд сейсмического сигнала. При ограниченной мощности таких

► Рис. 15. Корреляционная связь электрических и сейсмических характеристик ВЧР по данным КС и МСК в 18 скважинах на участке ОМР (N=43).



слоёв в пределах рабочего диапазона глубин бурения заряд лучше размещать под их подошвой;

3. При наиболее благоприятном глинистом составе ВЧР для получения максимальных амплитуд сейсмического сигнала следует ориентироваться на наиболее глинистые разности, которые отражаются в геоэлектрическом разрезе наиболее низкими удельными сопротивлениями. Можно даже уменьшать глубину бурения скважин до 10-12 м, если наиболее глинистые разности залегают в этом интервале глубин;

4. В твердомерзлом песчаном разрезе ВЧР следует ожидать увеличения амплитуды сигнала МОГТ в зависимости от льдистости песков и количества суглинистого заполнителя.

Результаты ЭМС

Съёмка ЭМС выполнялась методом непрерывного сканирования по профилям ПВ и на участках их сноса.

Приёмно-измерительная система буксировалась с помощью гусеничного вездехода типа ГАЗ. Скорость съёмки составляла от 2 км/ч до 15 км/ч в зависимости от условий местности и качества

подготовки профилей. Производительность работ составляла от 10 км до 45 км в смену.

Качество съёмки ЭМС оценивалось на основании сопоставлений с КС и анализом расхождений основного и контрольного измерений отдельных участков профилей. Результаты сопоставлений с КС показали, что погрешность определения мощности основных пластов в среднем не превышает 5-10%. При контрольных измерениях отдельных участков профилей (5% от общего объёма работ) погрешность измерений не превысила 3%. Фактическая глубинность исследований составила не менее 40 м.

На рис. 16 представлены данные сопоставления ЭМС и МСК в 60 скважинах МСК.

Результаты ЭМС представлены в виде геоэлектрических разрезов по профилям ПВ.

На геоэлектрические разрезы дополнительно вынесены данные МСК и КС. Для удобства чтения разрезов на геоэлектрических разрезах показаны изолинии рельефа на глубинах 10 м, 15 м, 17,5 м и 20 м от дневной поверхности (интервалы проектного размещения зарядов согласно ТЗ).

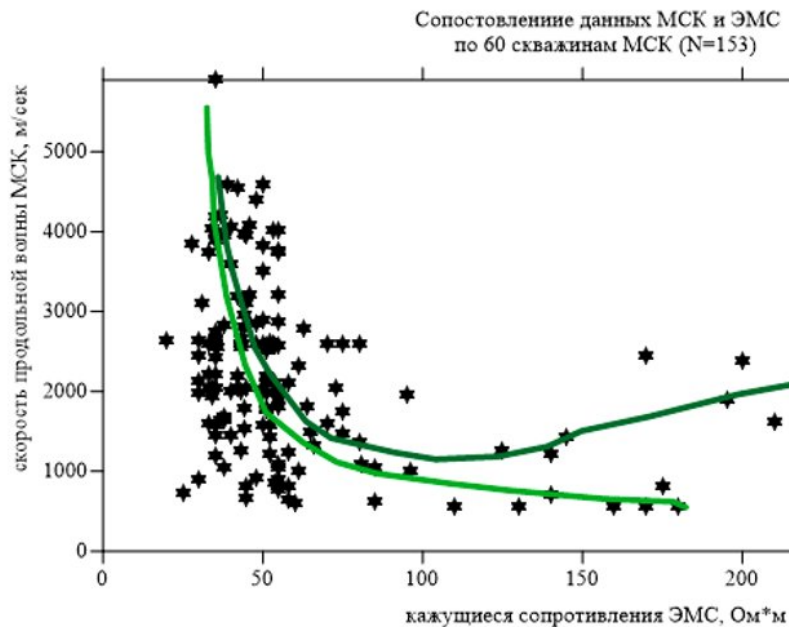


Рис. 16. Сопоставления ЭМС и МСК по 60 скважинам МСК.

По результатам комплексной интерпретации материалов МСК, КС и ЭМС на геоэлектрические разрезы также вынесены проектные и рекомендуемые по результатам ЭМС глубины скважин на каждом ПВ.

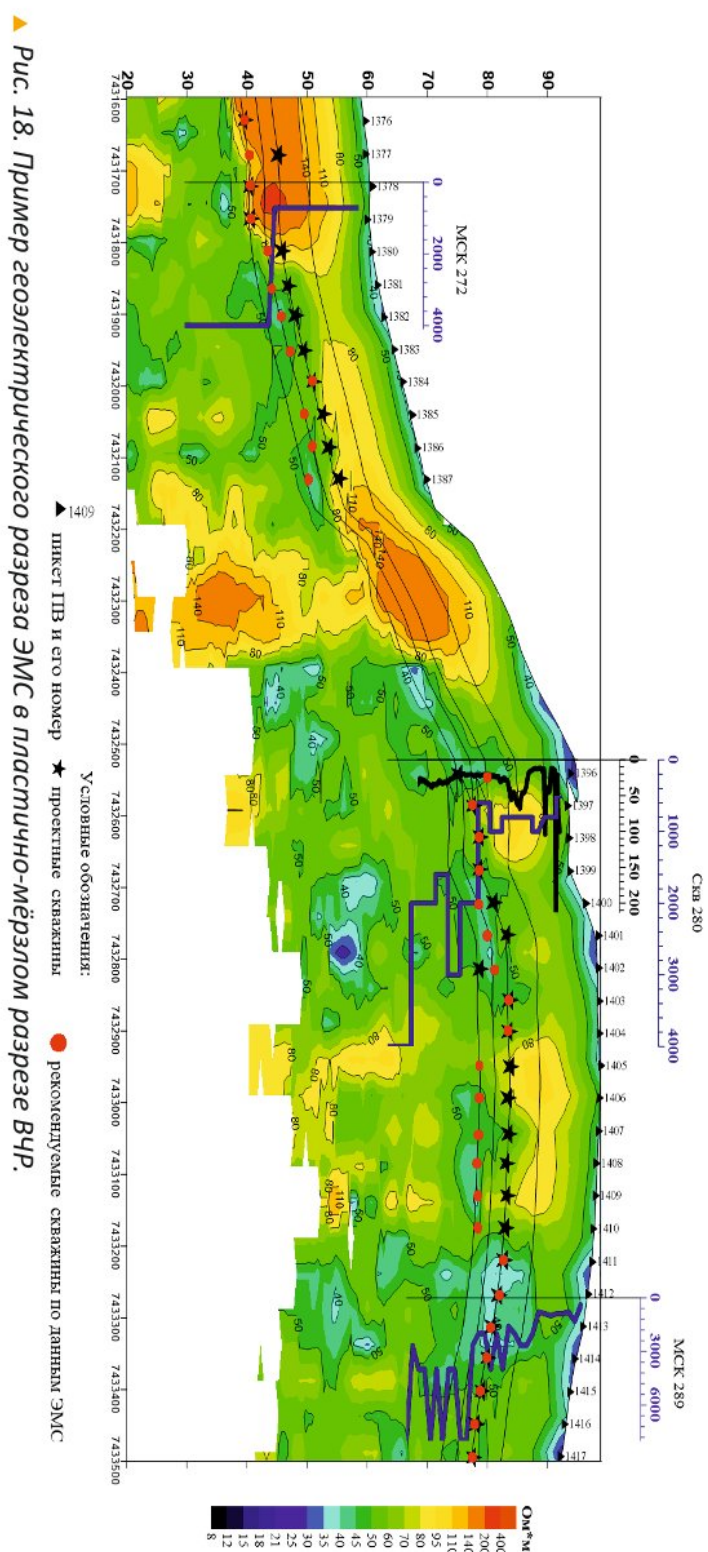
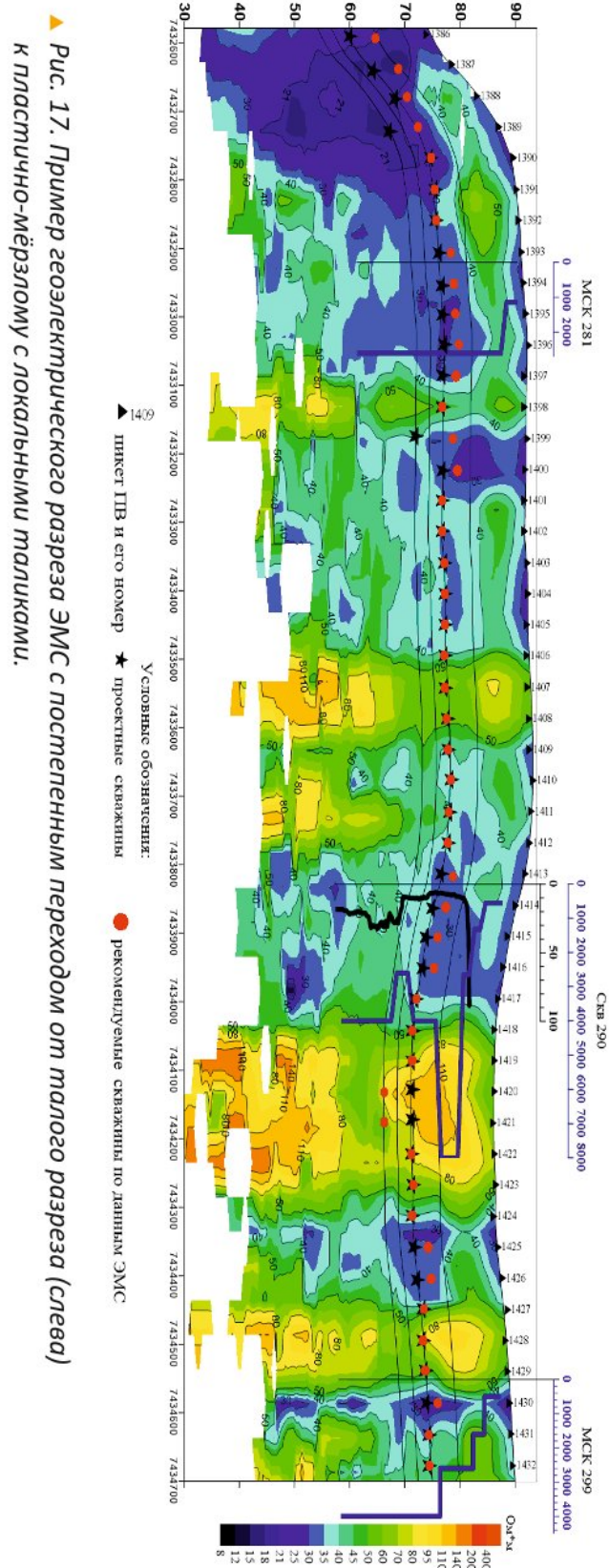
На рис. 17 представлен талый разрез (в начале профиля) постепенно переходящий в пластично-мерзлый с локальными таликами. Границы талых зон контрастные и субвертикальные. Подтверждением такого характера строения ВЧР (кроме известных фактов, заверенных термометрическими измерениями [3, 8]) является одна из точек КС+МСК, которая показала, что на расстоянии 2,5 м разрез кардинально меняется: в скважине МСК встречены водонасыщенные пески, а в скважине КС-мерзлые супеси. Такая структура строения ВЧР характерна для переходной зоны от мерзлых к талым и для участков пластично-мерзлых пород. На интервалах влияния постоянно действующих водотоков граница «талые-мерзлые» размазывается в сторону водотоков.

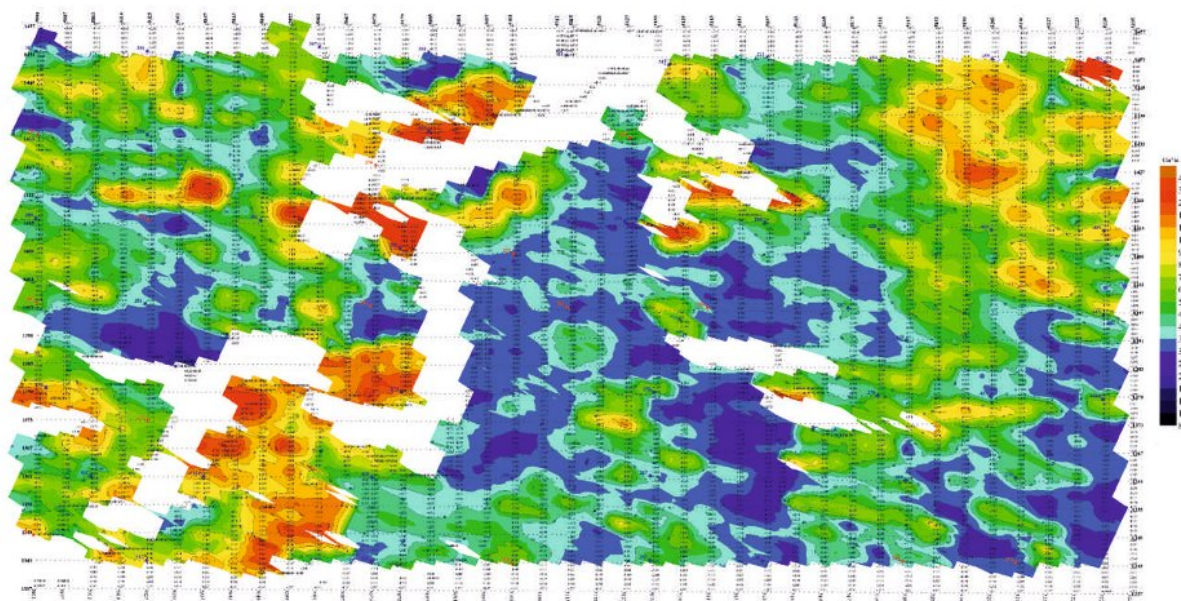
Рис. 18 иллюстрирует типичный разрез пластично-мерзлых суглинков-глин с линзами мерзлых супесей и песков.

Анализ геоэлектрических разрезов по

всей площади ОМР показывает, что выбранная по результатам опытных работ глубина погружения заряда 15 м является вполне оптимальной. В интервале глубин 12-16 м для данной территории уверенно прослеживается зона, которая характеризуется снижением удельного сопротивления и соответствующая повышенной пластичности пород (зона вариации отрицательных температур по Цитовичу [4]). Верхняя граница этой зоны, особенно в таликах, нередко поднимается почти к дневной поверхности, что позволяет на некоторых участках ожидать получение хороших характеристик сейсмического сигнала при меньших, чем проектные, глубинах бурения (12 м и даже 10 м).

Наименее благоприятными для заложения заряда являются зоны с повышенными сопротивлениями, соответствующие сухим и сухо-мерзлым пескам и супесям. Распространение таких зон локальное, спорадическое и не может контролироваться единичными МСК. Кроме того, интервалы опесчаненных горизонтов нередко перекрыты суглинками и глинами, что создаёт при бурении иллюзию благоприятного разреза.





▲ Рис. 19. Карта распределения удельных сопротивлений на глубине 15 м от дневной поверхности.

На рис. 19 приведен план распределения удельных сопротивлений на глубине 15 м от дневной поверхности по площади ОМР. Такие данные, полученные до начала БВР, позволяют заранее районировать всю площадь работ по условиям глубин заложения заряда.

Обобщение результатов работ

Подтверждена принципиальная возможность решения поставленной задачи предложенным комплексом геофизических методов, позволяющим последовательно решать следующие задачи:

- определение по данным КС электрических параметров слоёв (пластов) ВЧР, в пределах которых по данным МСК отмечаются наилучшие характеристики сейсмического сигнала;
- обоснование по опорным данным КС процедур обработки материалов наземной электроразведки ЭМС и контроль её качества;
- прогноз по данным ЭМС распростра-

нения по площади исследований (и по глубине) зон, возбуждение упругих колебаний в которых по данным МСК даёт оптимальное соотношение частотно-динамических характеристик регистрируемых сейсмических данных.

Сопоставление результатов МСК, КС и геологического описания шлама подтверждает наличие зависимости электрических параметров от литологии ВЧР, что позволяет провести устойчивую корреляцию сейсмических и электрических параметров. При этом детальность результатов КС превосходит детальность результатов МСК.

Использование результатов КС в качестве опорных данных для интерпретации результатов ЭМС, в свою очередь, позволяет распространить на всю площадь сейсмической съёмки данные об оптимальной (с точки зрения амплитудно-частотных характеристик сейсмической записи) глубине заложения заряда, полученные по результатам МСК с выдачей рекомендаций по каждому ПВ. При

этом горизонтальный масштаб результатов материалов ЭМС совпадает с масштабом сейсмической съёмки, а вертикальный масштаб полностью соответствует применяемой технологии БВР, что обеспечивает высокую кондицию данных ЭМС.

Впервые реально и масштабно продемонстрирована высокая степень сложности геологического строения ВЧР северной части ТПП, обусловленная повсеместным распространением ММП и происходящими в них процессами. Полученные данные позволяют говорить о несостоятельности традиционных гипотетических представлений и, зачастую, субъективных принципов определения оптимальной глубины заложения заряда, основанных на данных изучения ВЧР более простого строения в районах полного отсутствия или островного распространения ММП. В частности, крайне высокая латеральная неоднородность строения ВЧР не позволяет объективно прогнозировать глубины заложения зарядов по данным МСК при общепринятых плотностях исследований.

Продemonстрирована высокая степень подтверждения прогнозных данных ЭМС, причём на основании количественных, а не качественных показателей. Так, по результатам отстрела 60 скважин-дублёров, глубина заложения заряда в которых была рекомендована по результатам ЭМС, лишь в 6 случаях было зафиксировано ухудшение A_s/A_m сейсмического сигнала по сравнению со взрывами из скважин с проектной глубиной заложения, что соответствует подтверждению прогноза по этому параметру - 90%. Подтверждение прогноза по доминан-

тной частоте ещё выше – 91-92%.

Очевидно, что по метрологическим и производственным параметрам ЭМС полностью соответствует задачам оперативного планирования оптимальной глубины заложения заряда непосредственно в ходе полевых исследований без ущерба для сроков и помехи производства основных видов сейсморазведочных работ.

Показана возможность опережающего получения прогноза строения ВЧР с помощью ЭМС на всю площадь съёмки, что позволило бы оптимизировать БВР уже на стадии планирования работ.

Учитывая несопоставимо более высокую информативность и однозначность результатов исследований по сравнению с традиционно используемыми методиками, комплекс ЭМС+МСК можно рекомендовать к включению в стандартный комплекс полевых сейсморазведочных работ с использованием буровзрывного источника упругих колебаний для изучения строения ВЧР с целью оптимизации глубин заложения зарядов в районах повсеместного распространения ММП.

Литература

1. Дмитриев Ю.Ю., Тригубович Г.М., Тарасова Ю. П., Закариев Ю.Ш., Рябошапко С.М., Цыпышев Н.Н. «Прогнозирование оптимальных условий размещения заряда при сейсморазведочных работах в Западной Сибири с использованием электромагнитного сканирования во временной области»./Приборы и системы разведочной геофизики. №4, 2014г/
2. Тригубович Г.М., Каменецкий

Ф.М., Стеттлер Е.Х. «Геофизические исследования неустановившегося электромагнитного поля», /Мюнхен, 2010/.

3. Дмитриев Ю.Ю., Тригубович Г.М «Современные методы электрометрии для исследования верхней части разреза при решении инженерно-геологических задач в топливно-энергетическом комплексе», /Инженерные изыскания, №7, Москва, 2010/.

4. Н.А. Цытович. Механика мерзлых грунтов, /Высшая школа, Москва. 1973г./

5. . Ф.Н. Лещиков. Мерзлые породы Приангарья и Прибайкалья. /Сибирское отделение издательства «Наука», Новосибирск, 1978г./

6. ГОСТ 9.602-2005. СООРУЖЕНИЯ ПОДЗЕМНЫЕ. Приложение А. Определение удельного сопротивления грунта.

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2011611248 EM-DataProcessor. Правообладатель: ЗАО "Аэрогеофизическая разведка". Авторы: Тригубович Г.М., Чернышев А.В., Гнусин Я.А., Сверкунов А.С. (RU). Зарегистрировано 7 февраля 2011 года.

8. Дмитриев Ю.Ю. «Новая технология геофизических исследований криолито-зоны в инженерных изысканиях». /ГеоИнжиниринг, №1(3), 2007/

9. Дмитриев Ю.Ю., Глазунов В.В., Гоц И.А., Логовской В.И., Цыбин В.Ф., Ефимова Н.Н. «Комплексное применение методов импульсной электроразведки в составе сейсморазведочных работ МОГТ-3D для прогнозирования глубины скважин ПВ в условиях сложного строения ВЧР». /Приборы и системы разведочной геофизики. №4, 2016г/