

Сверхплотная 3-D съемка методом ЗСБ со льда на арктическом шельфе с целью изучения строения толщи многолетнемерзлых пород

А.В. Соловьева (ООО «Северо-Запад»), С.А. Аношина (ООО «Северо-Запад»), В.В. Агеев (ИФЗ РАН), М.О. Щербатых (ООО «Северо-Запад»), А.Э. Губина (ООО «Северо-Запад»), М.Ю. Масло (ФГБУ «ВИМС»), Д.В. Яковлев (ООО «Северо-Запад»)

Введение

В рамках инженерно-геологических изысканий на участке площадью около 100 км² было выполнено около 40 000 измерений методом ЗСБ (зондирования становлением поля в ближней зоне) по плотной сети наблюдений. Основной задачей инженерно-геофизических работ являлось оконтуривание границ распространения многолетнемерзлых пород (ММП), картирование их кровли и подошвы и определение мощности. Участок работ расположен в акватории одного из заливов арктических морей с глубиной моря 2-4 м. Измерения выполнялись в зимний период с поверхности припайного льда.

Методические особенности ЗСБ на арктическом шельфе

Объем работ с установкой 25×25 м составил 31 200 точек ЗСБ, с установкой 100×100 м – 7800 точек. Измерения методом ЗСБ выполнялись в течение трех месяцев.

Для проведения работ методом ЗСБ использовалось два вида аппаратуры. Работы однопетлевой установкой 25×25 м проводились с использованием аппаратуры «ТЕМ-FAST 48», наблюдения с совмещенными генераторной и приемной петлями 100×100 проводились с использованием комплекса «ЦИКЛ-8».

По результатам обработки данных ЗСБ построены карты кажущегося сопротивления на различных временах задержки. На картах кажущегося сопротивления, рассчитанного для установки 25×25 м, выявлены профильные аномалии, имеющие определенную зональность (рисунок 1). Причина возникновения подобных аномалий – это изменение минерализации морской воды и толщины льда в ходе полевого сезона.

В прибрежной зоне участка лед залегает непосредственно на грунте. В этой зоне наблюдались стабильные условия во время проведения работ. При удалении от берега глубина моря возрастает до 3 м. По данным измерений солености морской воды во время проведения геофизических работ она составляла 13-14 ‰. По данным из исследований, проводимых в навигационный период, наблюдается значительное изменение солености и уровня моря (общий размах колебаний уровня до 0.7 м). В основном изменения происходят за счет сгонно-нагонных процессов, вызывающих понижения уровня вод в заливе и, как следствие, приводящие к компенсационному подтоку соленых вод с внешней стороны залива. По результатам исследований, проведенных в зимний период, установлено, что зимой периодические приливные изменения практически не заметны, а преобладают сгоны, достигающие 0.5 м.

Таким образом, при малых глубинах моря до 3 м можно ожидать изменения мощности водного слоя во время проведения работ в пределах 10-15% и заметного изменения солености воды в зависимости от метеорологических условий. Учитывая существенный вклад этого проводящего слоя в формирование измеряемого сигнала становления поля, мы можем наблюдать заметное расхождение полевых кривых ЗСБ, измеренных в одном и том же месте и существенно разнесённые во времени (с разницей в недели – месяцы). Для конечного результата построения геоэлектрического разреза это не критично, так как отразится только в

некотором изменении подобранных параметров верхнего слоя лед-снег с водой и слоя морской воды, которые для решаемых задач не были важны.

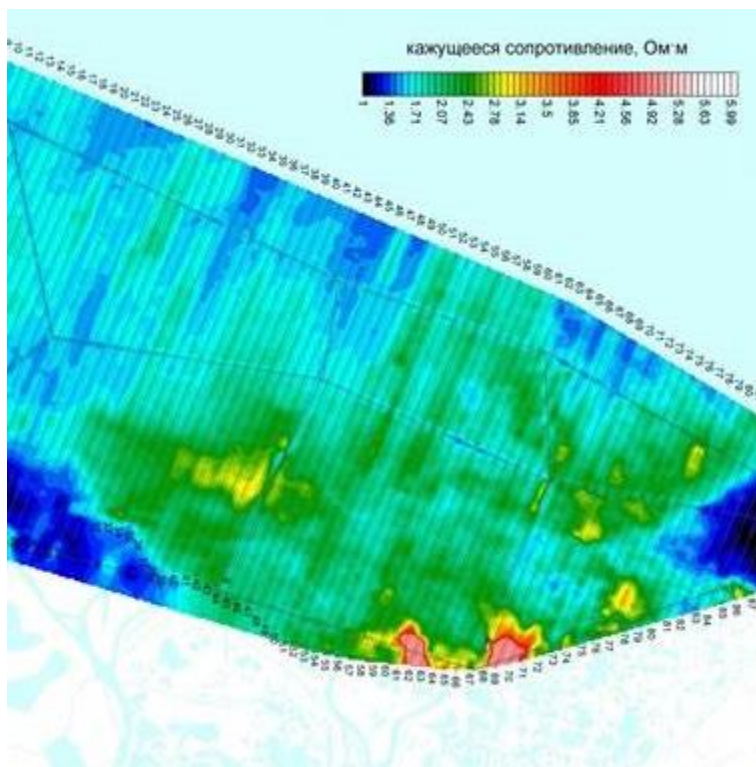


Рисунок 1.

Помимо профильных аномалий, связанных с изменением минерализации морской воды и мощности ледового покрова, на данных ЗСБ, полученных с установкой 25×25 м, отмечались расхождения кривых на поздних временах становления, которые на первый взгляд можно принять за систематические (рисунок 2).

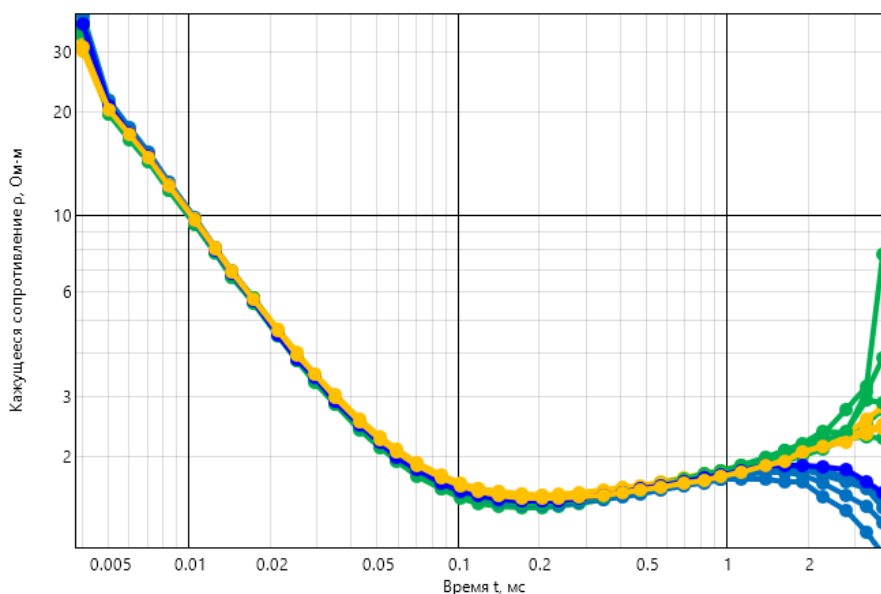


Рисунок 2. Кривые кажущегося сопротивления на соседних профилях ЗСБ (одинаковым цветом показаны кривые, наблюдаемые на одном профиле).

При детальном рассмотрении кривых кажущегося сопротивления на аномальном профиле (синие кривые) и двух соседних профилях (зеленые и желтые кривые) становится очевидным тот факт, что кривые в целом конформны и схожи по уровню на ранних и средних временах задержки, а расхождение наблюдается лишь на поздних временах (более 1.3 мс). При этом на некоторых пикетах аномального участка угол наклона нисходящей ветви в конце кривой превышает 63° , что теоретически может указывать на наличие трехмерных проводящих неоднородностей в разрезе. В рамках электроразведочных работ ЗСБ прошлых лет подобные проводящие аномалии трактовались как подземные рассолы отрицательной температуры (криопэги). Однако локализация проводника на небольших участках вдоль отдельно взятых профилей и его несогласованность с соседними профилями ставят под сомнение геологическую природу таких аномалий. На кривых, полученных с установкой 100×100 м в тех же местах, никаких изменений не наблюдается. Ввиду вышеизложенных доводов подобные локальные профильные аномалии были отнесены к недостоверным и устранены на стадии обработки данных.

Результаты работ

На первом этапе интерпретации была проведена независимая автоматическая инверсия данных ЗСБ от стартовой модели «однородное полупространство». На втором этапе проведено сопоставление геоэлектрических моделей с инженерно-геологическими колонками по одиннадцати современным скважинам, пробуренным ранее в прибрежной части площади. Определен пороговый уровень удельного электрического сопротивления, служащий критерием для выделения зон распространения многолетнемерзлых пород.

На рисунке 3 показан фрагмент геоэлектрического разреза по одному из профилей ЗСБ. На разрез нанесены упрощенные инженерно-геологические колонки по четырем скважинам: красным цветом обозначены породы в мерзлом состоянии, фиолетовым – охлажденные породы.

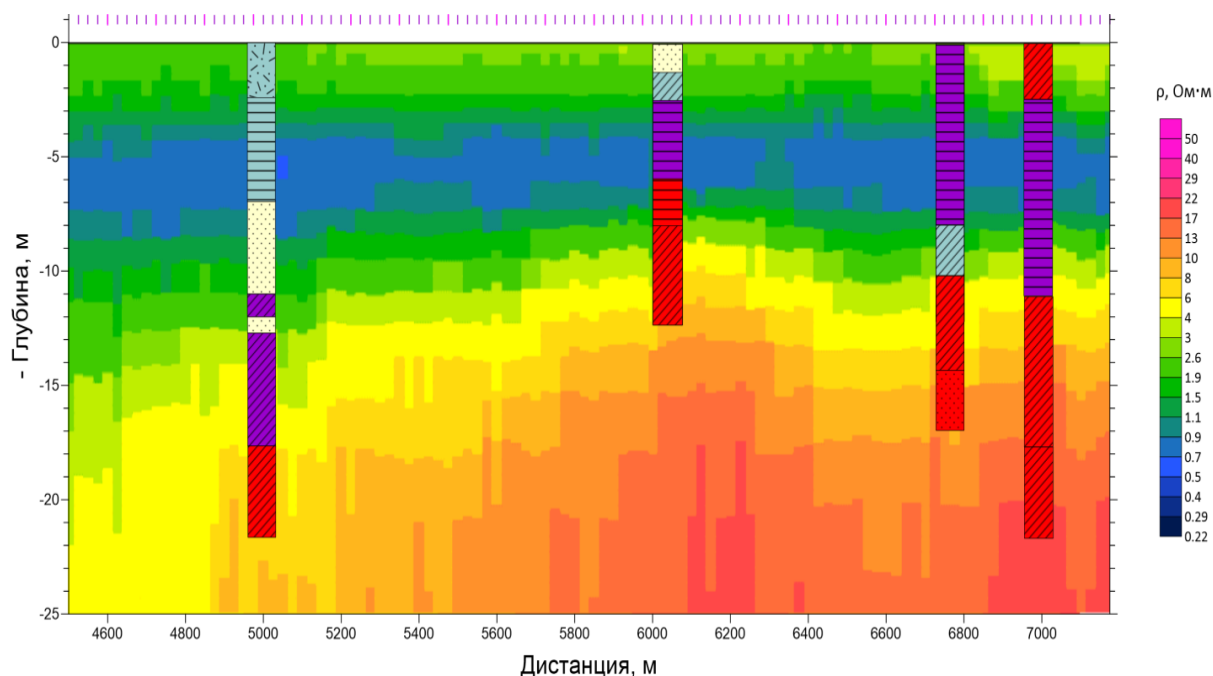


Рисунок 3. Фрагмент геоэлектрического разреза по профилю, проходящему через четыре скважины, пробуренные в прибрежной части исследуемой площади. Разрез построен по результатам независимой автоматической инверсии данных ЗСБ.

Сопоставление колонок по скважинам и геоэлектрической модели демонстрирует согласованность результатов бурения и геофизических работ методом ЗСБ. Наблюдается

корреляция между удельным электрическим сопротивлением и кровлей мерзлых грунтов. Граница между мерзлыми и талыми/охлажденными породами во всех скважинах соответствует уровню УЭС около 4 Ом·м. Аналогичная ситуация наблюдается и на других профилях, вблизи которых пробурены скважины. При этом талые и охлажденные породы соответствуют более проводящим зонам на геоэлектрической модели, характеризуются сопротивлениями от 0.7 до 3 Ом·м, а уровень их проводимости зависит от водонасыщенности и литологического состава.

Выбранный критерий выявления ММП, а также достоверность полученных геолого-геофизических разрезов подтверждаются результатами бурения прошлых лет – двумя архивными скважинами, расположенными в центральной части изучаемой площади.

На основании выбранного критерия оконтурены границы распространения многолетнемерзлых пород, определено положение их кровли и подошвы. По данным ЗСБ прослежены изменения, происходящие с толщей ММП при удалении от суши к центру залива, в том числе понижение удельного сопротивления мерзлых пород и деградация мерзлоты вплоть до ее полного исчезновения (рисунок 4).

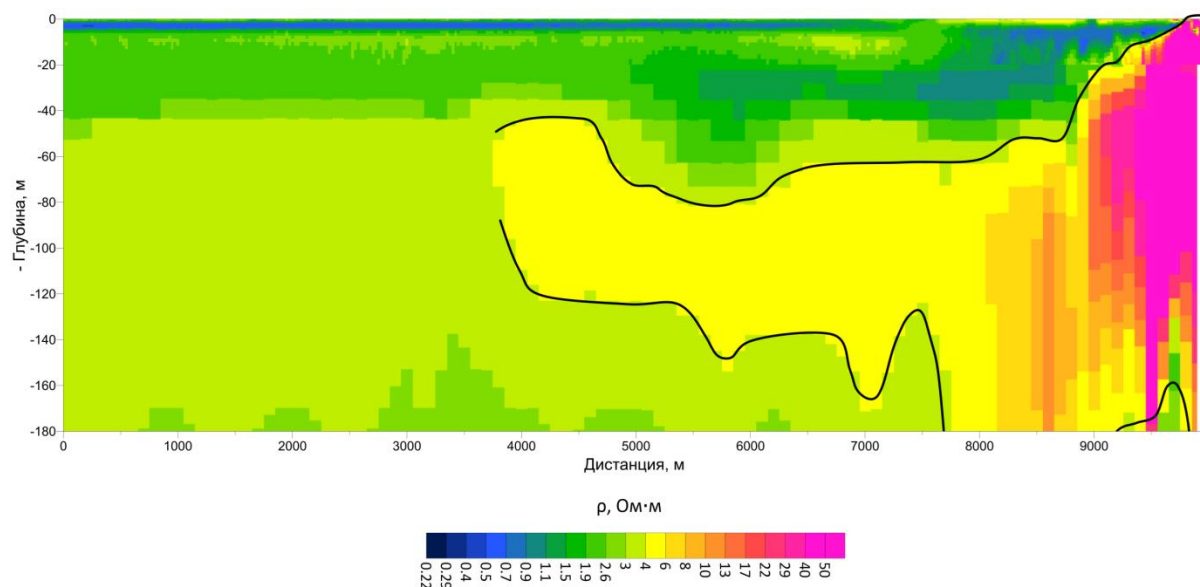


Рисунок 4. Разрез удельного электрического сопротивления, демонстрирующий погружение кровли и уменьшение мощности ММП при удалении от береговой линии (правая часть разреза) к центру залива (левая часть разреза).

Выводы

Выполненные в прибрежной части арктического шельфа инженерно-геофизические работы методом ЗСБ показали свою информативность при оконтуривании границ распространения многолетнемерзлых пород и определении параметров их залегания. Результаты работ заверены бурением.