

## Особенности методики исследования многолетнемерзлых пород электромагнитными методами на полуострове Ямал

В.А. Селяев<sup>1</sup>, И.В. Буддо<sup>1,2</sup>, Н.В. Мисюркеева<sup>1,2</sup>, М.В. Шарлов<sup>1</sup>, Ю.А. Агафонов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ООО «СИГМА-ГЕО», г. Иркутск, Россия, [sva@sigma-geo.ru](mailto:sva@sigma-geo.ru)

<sup>2</sup>Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

### АННОТАЦИЯ

Для изучения строения криолитозоны полуострова Ямал проведены исследования методом зондирования становлением поля в ближней зоне (малоглубинная модификация). Объем исследований составил более 4000 км<sup>2</sup> по высокоплотной сети наблюдений – 19.8 ф.т./км<sup>2</sup>. Для реализации столь масштабного проекта в сложных климатических условиях была разработана высокопроизводительная методика работ с использованием современного цифрового программно-измерительного комплекса FastSnap. По результатам исследований изучено распределение геоэлектрических параметров до глубины 500 м. Закартированы участки развития многолетнемерзлых пород, области развития таликов и криопэгов.

**Ключевые слова:** зондирование становлением поля, многолетнемерзлые породы, криолитозона, удельное электрическое сопротивление, геоэлектрический разрез.

### ВВЕДЕНИЕ

Полуостров Ямал, относящийся к Ямало-Ненецкому автономному округу (ЯНАО) – один из основных поставщиков природного газа в России. Стратегия развития газовой промышленности ЯНАО предусматривает непрерывный ввод в разработку новых месторождений на территории полуострова.

Одними из ключевых сложностей в освоении региона являются суровые климатические условия и расположение полуострова в зоне вечной мерзлоты (ММП), осложняющими и процесс геологоразведочных работ (ГРП).

В связи со сложными геологическими, климатическими и логистическими условиями, при освоении и разработке месторождений углеводородов полуострова Ямал требуется применение высокотехнологичных решений.

### МЕТОДИКА И АППАРАТУРА

Зондирование становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) является одним из наиболее распространенных электроразведочных методов геофизики при решении геологических и инженерных задач.

ЗСБ – индукционное зондирование, не требующее гальванического заземления, что упрощает полевые работы в районах с круглогодичным распространением толщ многолетнемерзлых пород. К преимуществам метода относятся низкая стоимость и высокая результативность, простота производства (как следствие, мобильность полевого отряда), а

также экологическая безопасность.

Перед коллективом ООО «СИГМА-ГЕО» стояла задача выполнить масштабные исследования (более 4000 км<sup>2</sup>) на территории полуострова Ямал по плотной сети наблюдений – 19.8 ф.т./км<sup>2</sup> с высокой производительностью и высоким качеством получаемых электромагнитных данных для обеспечения своевременного и достоверного геологического результата. Для успешного решения поставленной задачи необходимо было соблюсти четыре условия: современная аппаратура, оптимальная система наблюдений, высокопроизводительная методика работ и высокое качество полевого материала.

Наблюдения выполнялись с использованием современного цифрового программно-измерительного комплекса FastSnap (Рисунок 1) [Sharlov et. al, 2017].



**Рисунок 1.** Аппаратура мЗСБ FastSnap: слева – измеритель, справа – коммутатор тока.

Измерители и коммутатор тока подключаются к компьютеру через адаптер линии связи (АЛС), синхронизация работы коммутатора и измерителей осуществляется на основе системы GPS с точностью синхронизации  $\pm 90$  нс. Производилась работа одновременно с 3 приемными каналами, в генераторную петлю подавался ток силой от 0.5 А и до 30 А.

На участке исследований была применена комбинированная соосно-разнесенная установка с разносами 0 и 100 м. Шаг по профилю между приёмниками составлял 100 и 300 м, расстояние между источниками – 500 м и расстояние между профилями – 300 м.

Одновременная регистрация соосной и разнесённой приёмной установки позволяет выявлять такие эффекты, как индукционно-вызванная поляризация и магнитная вязкость, и учитывать их на этапе интерпретации, а также обеспечивать высокую производительность работ (Рисунок 2).

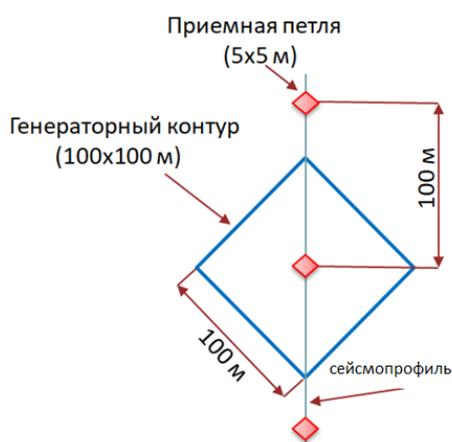


Рисунок 2. Установка мЗСБ.

Эффективности производства работ было уделено особое внимание. Организация работ методом мЗСБ в 2 смены позволила круглосуточно получать электромагнитные данные (ЭМ). Всего в состав партии входило 6 отрядов по 6 человек и 3 единицы техники марки ТРЭКОЛ. Также в партию входил 1 специалист по качеству получаемых ЭМ данных, который ежедневно оценивал качество получаемых данных с помощью специализированного программного обеспечения для оценки качества ЭМ данных – EMQC, входящего в программный комплекс SGS-TEM [Гусейнов и др., 2015].

Оптимизированный граф регистрации и современное оборудование позволили затрачивать на запись одной установки в среднем не более 10 мин. Затраты времени на переезд и раскладку также составляли в

среднем 10 минут, а суточное выполнение партии доходило до 465 ф.н.

### Предпосылки применения метода мЗСБ в условиях Западной Сибири

В географическом отношении площадь исследования находится на северо-востоке п-ва Ямал. Регион характеризуется повсеместным развитием вечной мерзлоты. На фоне высокопроводящего мезо-кайнозойского осадочного чехла Западной Сибири мерзлые породы характеризуются резким увеличением величины удельного электрического сопротивления (УЭС) по сравнению с вмещающими толщами.

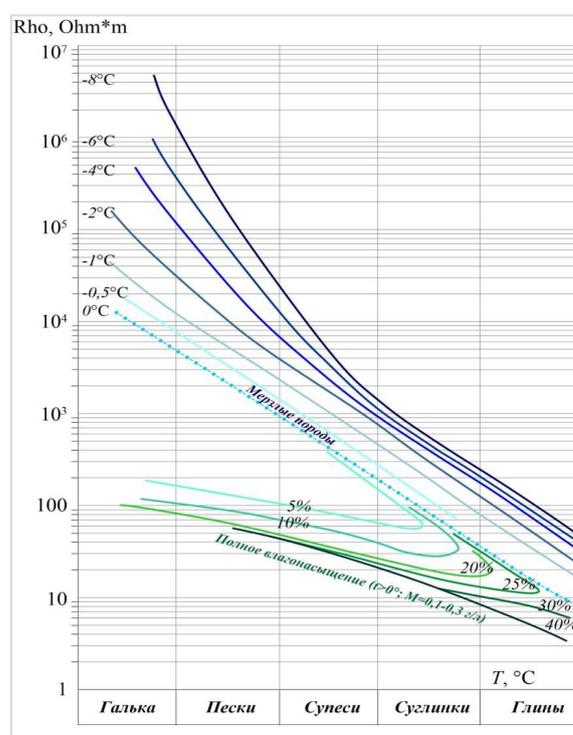


Рисунок 3. Приближенная зависимость УЭС мерзлых рыхлых пород с массивной криогенной текстурой от состава и температуры (по А.Н. Боголюбову) и УЭС талых пород от состава и влажности (по Н.Н. Шаропанову и др.).

При отрицательных температурах свободная вода переходит в лед, и прохождение тока через мерзлую породу осуществляется по пленкам незамерзшей, главным образом, связанной воды, окружающим зерна минерального скелета и льда. Присутствие льда как порообразующего минерала уже само по себе меняет электрические свойства пород, присущие им в талом состоянии, а многообразие взаимодействия незамерзшей воды с минеральным скелетом и льдом делает очень широким диапазон изменения

электрических свойств в зависимости от состава, структуры и типа криогенной текстуры (Рисунок 3) [Баулин Ю.И и др., 1984].

### РЕЗУЛЬТАТЫ

По результатам проведенных исследований изучено распределение геоэлектрических параметров верхней части разреза п-ва Ямал до глубины 500 м [Misurkeeva et. al, 2020].

На геоэлектрических разрезах с поверхности и до глубины около 250 выделяется мощный слой с сопротивлением 100 – 500 Ом·м, связанный с распространением высокольдистых многолетнемерзлых пород (Рисунок 4, 5, 6).

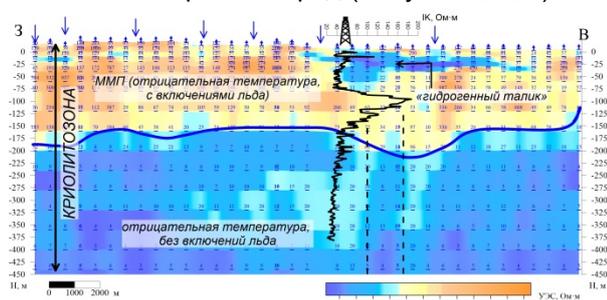


Рисунок 4. Геоэлектрический разрез.

Ниже по разрезу сопротивление значительно снижается и ассоциируется здесь с развитием охлажденных пород без включений льда.

Внутреннее строение многолетнемерзлых пород неоднородно по геоэлектрическим характеристикам как по латерали, так и по вертикали. Картируются участки области развития таликов различного типа и криопэггов (Рисунок 4, 5, 6).

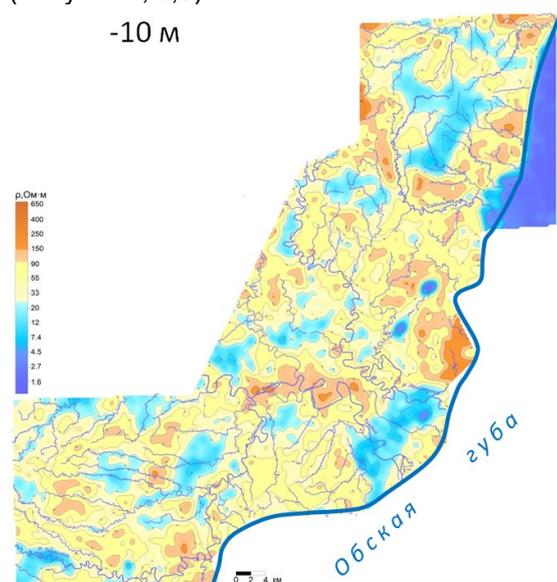


Рисунок 5. Карта–срез продольного сопротивления отражающая развитие и строение многолетнемерзлых пород на глубине -10 м.

На рисунке 5 показано распределение геоэлектрических характеристик многолетнемерзлых пород на глубине – 10 м.

Высокие значения сопротивления отражают породы с высокой льдистостью и низкими температурами. Участки понижения сопротивления отражают области развития таликов, чаще всего приуроченных к рекам и озерам (гидрогенные талики).

В северной части площади, в области Обской губы отмечается отсутствие многолетнемерзлых пород, связанное с оттепляющим воздействием водоема.

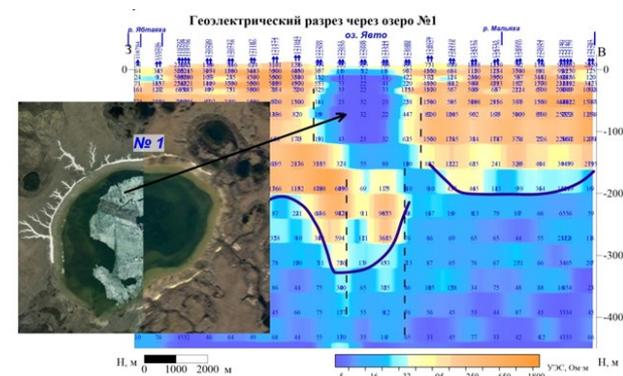


Рисунок 6. Геоэлектрический разрез через озеро п-ва Ямал.

### Выводы

На территории п-ва Ямал выполнены масштабные исследования методом мЗСБ в объеме более 4000 км<sup>2</sup> с применением современного цифрового программно-измерительного комплекса FastSnap. Полученные ЭМ данные характеризуются высоким качеством.

Разработана эффективная методика производства работ методом мЗСБ в условиях севера Западной Сибири.

По данным электроразведочных работ мЗСБ изучено строение криолитозоны полуострова Ямал.

В разрезе выявлены области развития многолетнемерзлых и охлажденных пород. Закартированы многочисленные талики различного типа и генезиса.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании объектов инфраструктуры месторождений, мониторинга за состоянием многолетнемерзлых пород, а также на разных этапах ГРП.

### Список литературы

1. Баулин Ю.И., Боголюбов А.Н и др. Рекомендации по применению геофизических методов для определения инженерно-геологических характеристик мерзлых дисперсных грунтов. Москва, Стройиздат, 1984.

2. Гусейнов Р.Г., Петров А.В., Агафонов Ю.А., Шарлов М.В., Буддо И.В., Гомульский В.В. Система оценки качества сигналов нестационарных электромагнитных зондирований. Вестник ИрГТУ № 5. Иркутск, ИрГТУ. 2015. С. 53 – 60.
3. M.V. Sharlov, I.V. Buddo, N.V. Misyurkeeva, I.A. Shelokhov and Yu.A. Agafonov. Transient electromagnetic surveys for high resolution near-surface exploration: basics and case studies. First break. Vol 35, No 9, September 2017 pp. 63 – 71. <https://doi.org/0.3997/1365-2397.35.9.90112>.
4. N.V. Misurkeeva, I.V. Buddo, A.S. Smirnov and I.A. Shelokhov. Shallow Transient Electromagnetic Method Application to Study the Yamal Peninsula Permafrost Zone. Conference Proceedings, Geomodel 2020, Sep 2020, Volume 2020, p.1 – 6. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202050105>