

# КОМПЛЕКСНЫЕ МАЛОГЛУБИННЫЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ДЕЛЬТЕ Р. ЛЕНА

Ельцов И.Н., Каширцев В.А., Фаге А.Н., Цибизов Л.В., Аюнов Д.Е., Фадеев Д.И.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт  
нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука Сибирского отделения  
Российской академии наук (ИНГГ СО РАН)*

[YeltsovIN@ipgg.sbras.ru](mailto:YeltsovIN@ipgg.sbras.ru); [KashircevVA@ipgg.sbras.ru](mailto:KashircevVA@ipgg.sbras.ru); [FaguetAN@ipgg.sbras.ru](mailto:FaguetAN@ipgg.sbras.ru);  
[TsibizovLV@ipgg.sbras.ru](mailto:TsibizovLV@ipgg.sbras.ru); [AyunovDE@ipgg.sbras.ru](mailto:AyunovDE@ipgg.sbras.ru); [FadeevDI@ipgg.sbras.ru](mailto:FadeevDI@ipgg.sbras.ru);

Крайний Север – регион, в котором до настоящего момента использовались в основном глубинные геофизические методы, в первую очередь для разведки углеводородов. Это означает работу с большими глубинами и малой чувствительностью в верхней (первые десятки метров) части разреза. В то же самое время современная геофизика значительно продвинулась в вопросах изучения именно этих глубин: появились приборы для электроразведки на постоянном токе с высоким разрешением, высокочастотные прецизионные магнитометры и высокоточные датчики температур. Использование этих новых методик позволяет получить большой объем информации о строении верхней части разреза в Арктических регионах, тем самым давая ответы на многие вопросы, связанные с геокриологией и экологией Арктики, а также с геологическим строением разреза.

## INTEGRATED SUBSURFACE GEOPHYSICAL STUDIES IN LENA RIVER DELTA

Yeltsov I.N., Kashirtsev V.A., Fague A.N., Tsibizov L.V., Ayunov D.E., Fadeev D.I.

Until now Russian Far North has been extensively studied by means of deep geophysics aimed at hydrocarbons prospecting. These methods mean deep surveys which lack subsurface sensitivity. In the meantime it is the subsurface studies that were considerably improved in modern geophysics: new devices for direct current electrical sounding, precision magnetic surveys and accurate temperature measurements were developed. Applying these new methods helps to collect significant amount of data on the Arctic region subsurface layer constitution, answering many questions about geocryology, Arctic ecology and geological section.

*Permafrost, electrical resistivity tomography, magnetic survey, temperature logging, resistivity imaging, Arctic Region, Lena river.*

Цели, поставленные в рамках работ:

1. изучение принципиальной возможности использования метода электротомографии в условиях высоких (до нескольких сотен кОм•м) значений удельного электрического сопротивления (УЭС) среды;
2. классификация геоэлектрического разреза по восстановленным значениям УЭС — определение таликов, начальное разделение вечной мерзлоты по

температурным параметрам, а также физическим свойствам (твердомерзлые, пластично-мерзлые и сыпучемерзлые грунты);

3. решение инженерных задач, связанных с дальнейшим обустройством и эксплуатацией НИС о. Самойловский;
4. изучение возможности применения магнитной съемки с целью уточнения плохо различимых на геоэлектрических разрезах объектов, таких как разломы, заполненные вечномерзлыми породами;
5. исследование состояния многолетнемерзлых пород под воздействием процессов берегового разрушения мерзлоты с помощью станций термического мониторинга.

Работы производились в августе 2014 г. с использованием аппаратного комплекса СКАЛА-48 [1], электромагнитного сканера ЭМС, и автономной станции температурного мониторинга (АСТМ), разработанных в ИНГГ СО РАН и магнитометра ММРОС-2. Рис.1

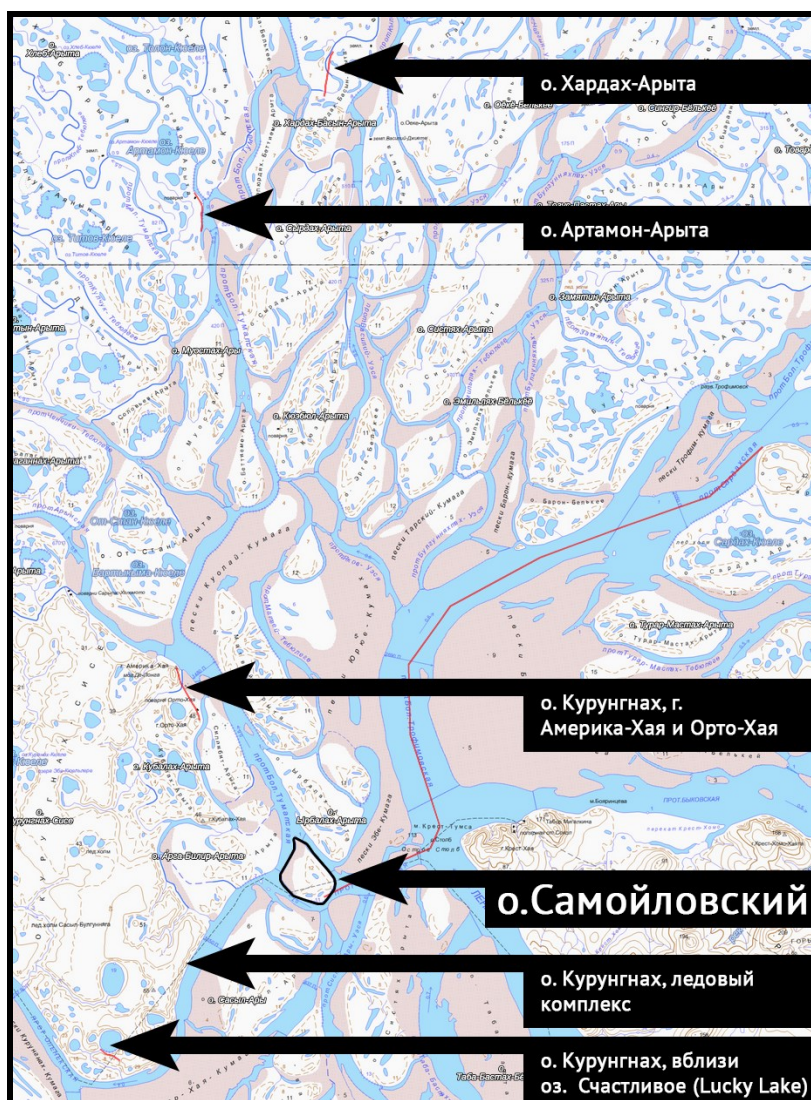
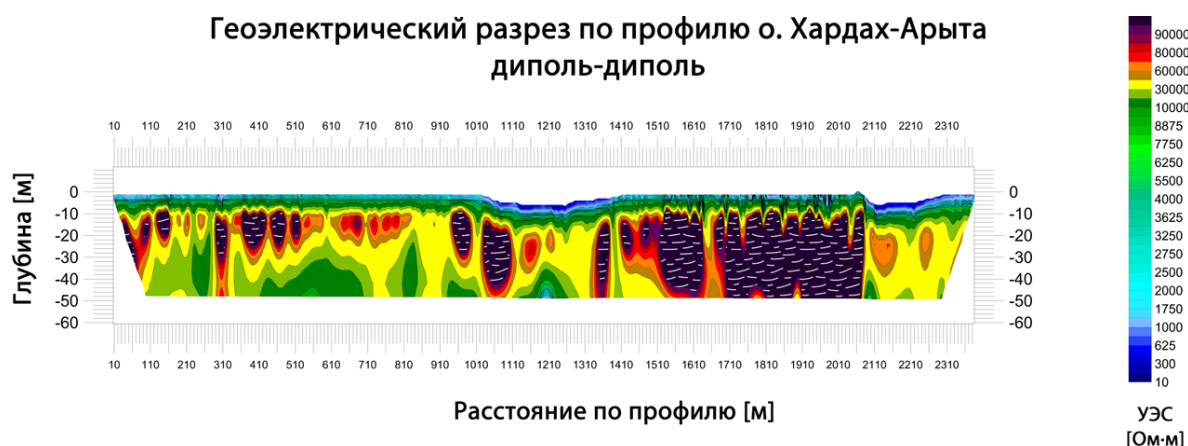


Рис.1 Карта района работ.

Первоначальный план работ предполагал длинный профиль с юга на север — от горы Америка-Хая до центра гравитационной аномалии, находящейся в 40 км от НИС о. Самойловский. Целью планируемых работ было картирование коренных пород, находящихся на небольшой глубине под четвертичными отложениями. По прибытии на о. Самойловский планы были скорректированы: были сделаны несколько профилей по берегу проток в направлении с севера на юг (0), первый профиль находился на минимальном (с учетом условий) расстоянии от гравитационной аномалии, последующие приближались к горе Америка-Хая. Первый профиль на острове Хардах-Арыта начинался в 10 км от центра гравитационной аномалии, поскольку непосредственно к центру на лодках пройти не удалось — р. Лена слишком сильно обмелела.

При выполнении работ с использованием метода электротомографии применялась следующая геометрическая конфигурация установки Шлюмберже и диполь-диполь: две косы по 24 электрода на каждой с расстоянием между ними 5 м для получения разреза на глубину до 40 м. Интерпретация данных производилась совместно по двум методам: Шлюмберже и диполь-диполь, при этом использовалась программа Res2dInv.

Первый профиль на острове Хардах-Арыта был интересен тем, что проходил через основные геоморфологические объекты, распространенные в дельте р. Лена: полигональная, заболоченная тундра; сухая тундра (высокие берега проток); обмелевшие протоки. Данные, полученные по этому профилю, представлены на 0

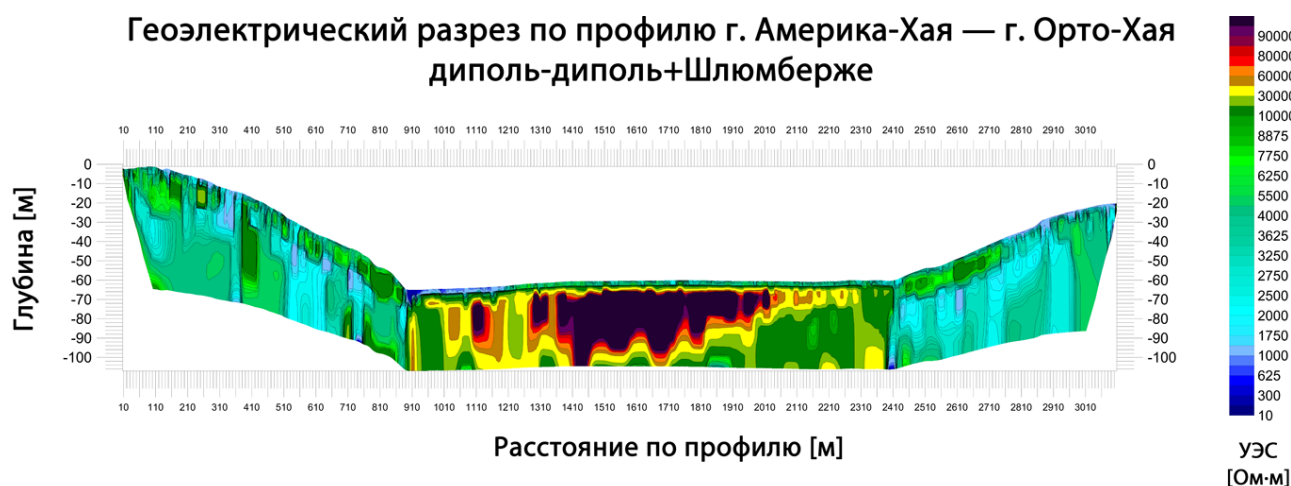


**Рис.2** Геоэлектрический разрез по профилю Хардах-Арыта. Ось X сжата относительно оси Y в 6 раз.

В интервале 0-1030 м разрез контрастный, хорошо видны отдельные зоны высоких УЭС (100 кОм и выше), которые, вероятно, приурочены к ледовым жилам. Дневная поверхность представлена сухой тундрой, находящейся на высоком берегу протоки, полигональные структуры отсутствуют. В интервалах 1030-1410 и 2070-2380 м дневная поверхность представлена обмелевшими протоками и их заливными берегами; значения УЭС основной части разреза находятся в пределах 10-40 кОм, с отдельными зонами порядка 100 кОм и относительно проводящей (значения УЭС до 1 кОм) верхней частью (глубина 0-10 м). Особый интерес представляет область низких сопротивлений относительно большой мощности, которая может объясняться влиянием протоки — в течение лета и осени относительно теплые воды растапливают вечную мерзлоту на глубины до 10 м, что значительно превосходит обычные значения (3-4 м). В интервале 1410-2070, начиная с глубины 8 м, преобладают зоны высоких УЭС (100

кОм и выше), которые, вероятно, приурочены к древней вечной мерзлоте. Дневная поверхность представлена заболоченной полигональной тундрой; значения УЭС основной части разреза превышают 100 кОм. Мощность верхней, относительно проводящей (значения УЭС до 1 кОм) области, фактически, не превосходит 1 м, а чаще – первых десятков сантиметров (электроды длиной 20 см периодически доставали до льда).

Второй профиль, который заслуживает упоминания, соединял вершину горы Америка-Хая с вершиной горы Орто-Хая. При этом профиль пересекал участок тундры, которая была представлена как заливными лугами, так и относительно сухими участками. Главный интерес представляла область контакта коренных пород и четвертичных отложений. Данные, полученные по этому профилю, представлены на 0.

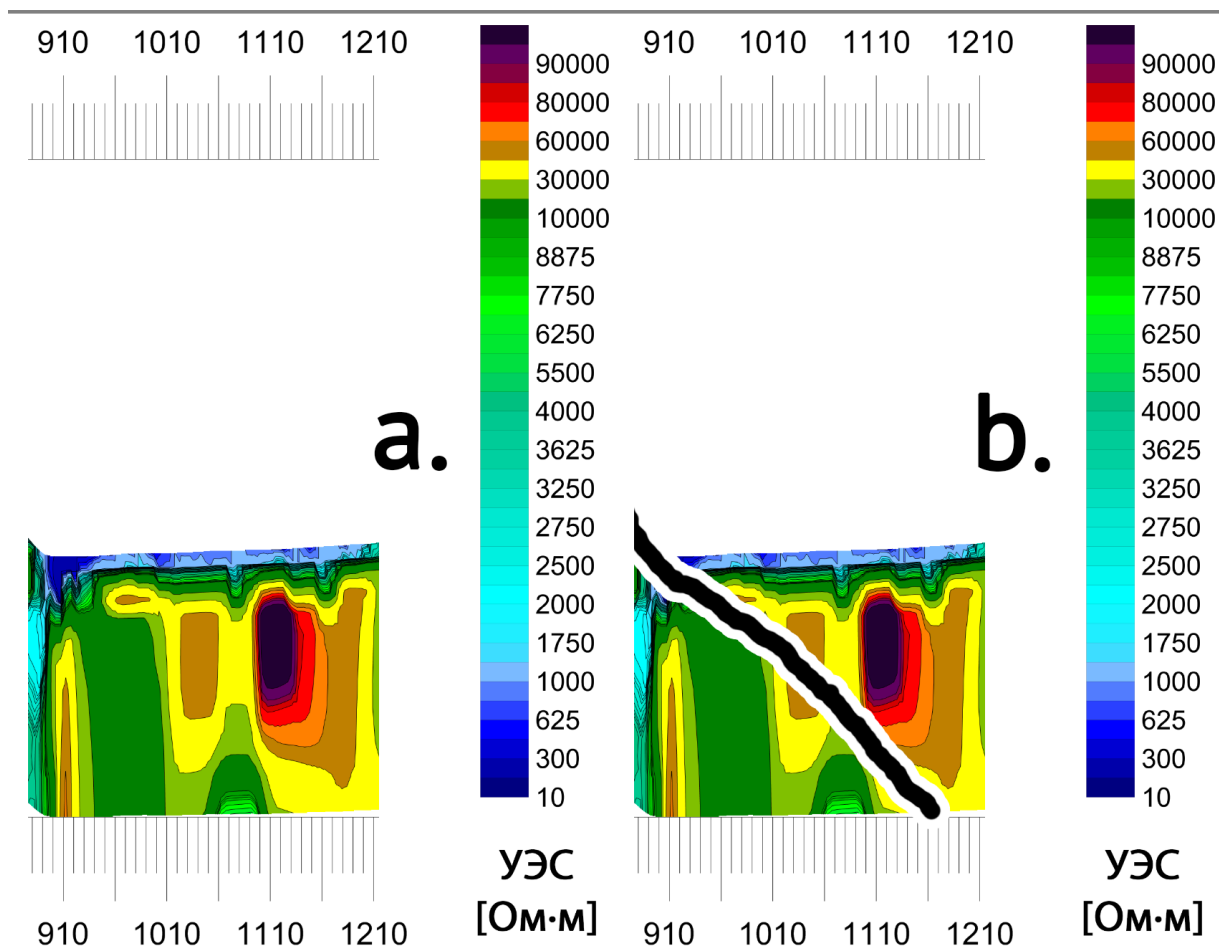


**Рис. 3** Геоэлектрический разрез по профилю г. Америка-Хая — г. Орто-Хая. Ось Х сжата относительно оси Y в 6 раз.

В интервале 0-880 и 2420-3110 м разрез относительно слабоконтрастный, представлен коренными породами различного состава, значения УЭС, в целом, не превосходят 10 кОм. Отдельные зоны (от 2 кОм до 10 кОм), которые выделяются на разрезе, вероятно, объясняются разным состоянием пород (трещиноватость, обводненность). В интервале 880-1210 м разрез контрастный, появляются отдельные зоны высоких УЭС (100 кОм и выше), которые, вероятно, приурочены к ледовым жилам. Верхняя часть (первые метры) разреза – хорошо проводящая (значения УЭС менее 1 кОм), что соответствует представлению о сезонном затоплении данного участка паводковыми водами. В верхней части разреза, в интервале 880-920 м хорошо проявляется ручей (проводящая область, значения УЭС порядка 0,2 кОм). Обращает на себя внимание нижняя часть разреза, которую условно можно разделить на две части: зона значений УЭС в пределах 10 кОм и зона значений УЭС более 30 кОм (на **Ошибка! Источник ссылки не найден.** а. - зеленые и желтые области соответственно). Если провести линию, разграничивающую эти две области, то она с достаточно высокой степенью точности совпадет с линией дневной поверхности склона г. Америка-Хая. Таким образом, можно предположить, что зеленая зона соответствует погребенным под кайнозойскими осадками коренным породам (ниже черной линии на **Ошибка! Источник ссылки не найден.** б.), а желто-красная зона соответствует четвертичным отложениям – вечномёрзлым грунтам (выше черной линии на **Ошибка! Источник ссылки не найден.** б.).

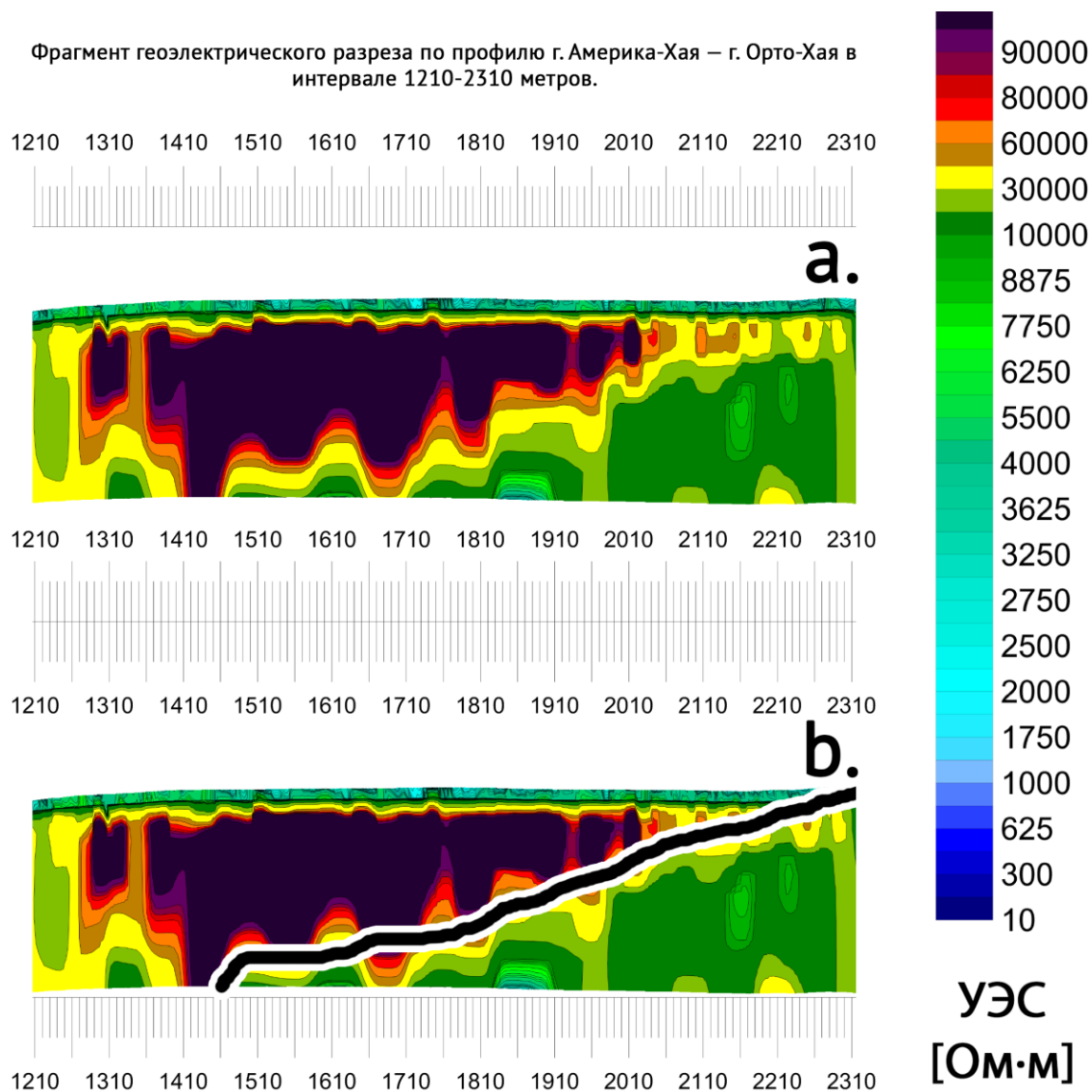


**Фрагмент геоэлектрического разреза по профилю г. Америка-Хая – г. Орто-Хая в интервале 880-1210 метров.**



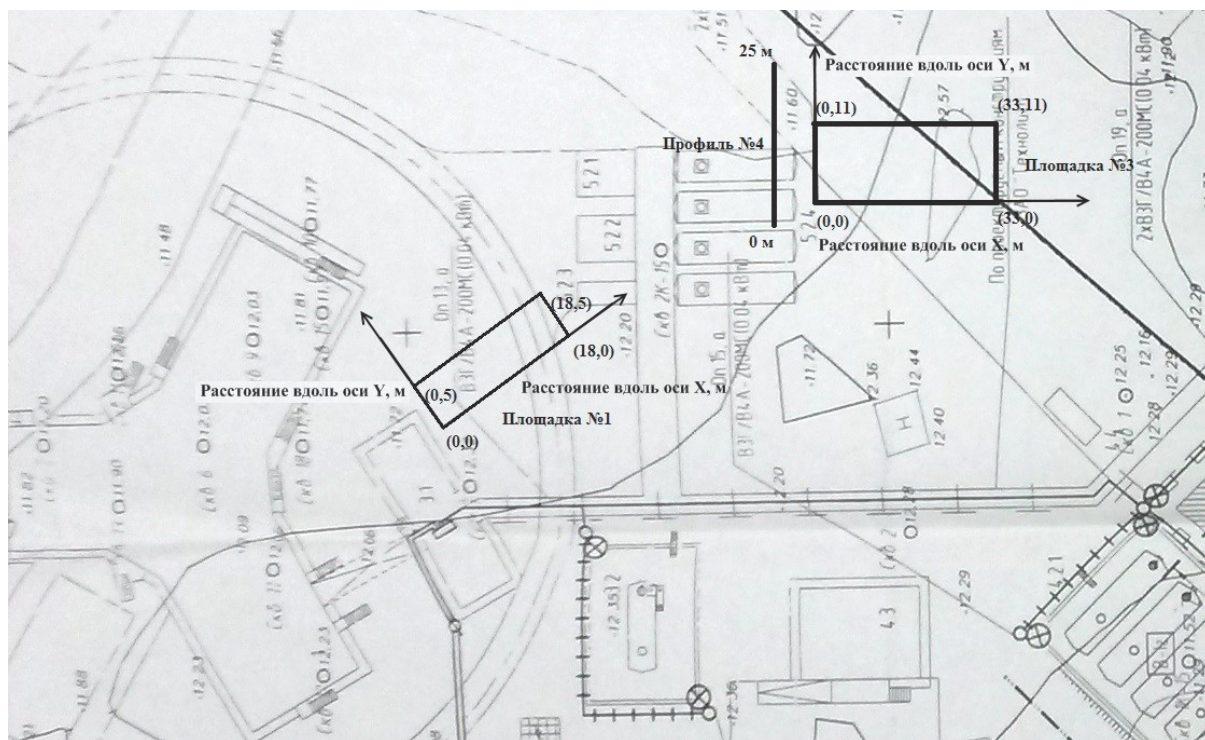
**Рис.4** Фрагмент геоэлектрического разреза в интервале 880-1210 метров. На рисунке а. хорошо видны зеленые области (значения УЭС до 10 кОм) и желто-красные области (значения УЭС от 30 до 100 кОм и выше). На рисунке б. проведена условная линия, разграничивающая две области

В интервале 1210-2310 метров верхняя часть (первые метры) разреза – относительно проводящая (значения УЭС менее 10 кОм). Аналогично предыдущему интервалу нижнюю часть разреза можно условно разделить на две части: зона значений УЭС в пределах 10 кОм и зона значений УЭС более 30 кОм (на 0 а. - зеленые и желто-фиолетовые области соответственно).



**Рис.5** Фрагмент геоэлектрического разреза в интервале 1210-2310 метров. На рисунке а. хорошо видны зеленые области (значения УЭС до 10 кОм) и желто-красные области (значения УЭС от 30 до 100 кОм и выше). На рисунке б. проведена условная линия, разграничивающая две области.

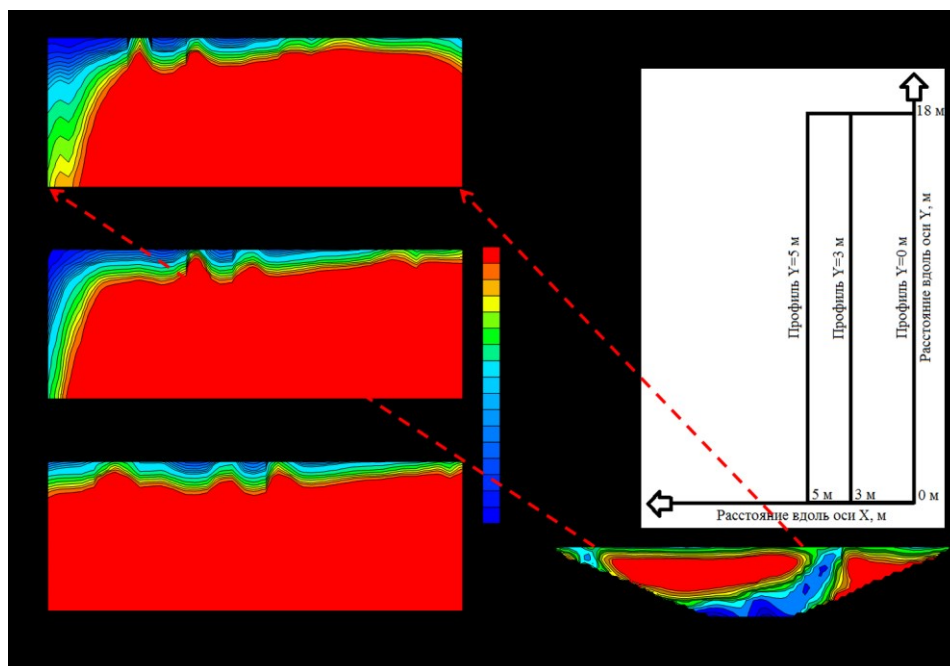
Работы методом частотного зондирования и профилирования были проведены на о. Самойловском с 07 по 09 августа 2014 года. Также были проведены повторные измерения 28 августа 2014. Работы выполнялись на 4 объектах. На 0 представлены два из них (прямоугольник Площадка №1 – первый объект, Площадка №3 - третий), находящиеся в непосредственной близости от построек станции. Объектом №2 является площадка находящаяся на удалении более чем 1 км от сооружений и представляет собой не подверженную влиянию (референтную) область тундры. Объект №4 - площадка, расположенная на северо-востоке от Площадки №3 (0). В непосредственной близости от нее находится озеро, а также техническое сооружения подведения воды к станции.



**Рис.6** Расположение изучаемых объектов на техническом плане станции Самойловский. Прямоугольниками обозначены Объекты №1 и 3, Профиль №4 является тестовым для аппаратуры ЭМС. Расстояние в метрах.

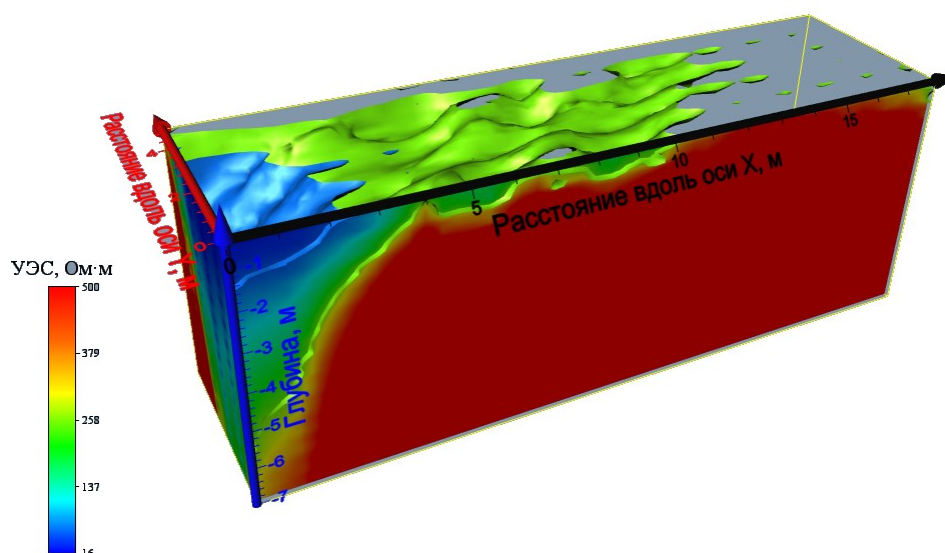
Разрезы частотного зондирования гораздо более информативны по сравнению с методом электротомографии при изучении строения первых метров разреза. На всех разрезах присутствуют приповерхностные аномалии пониженного сопротивления, которые можно рассматривать как характеристику формы мерзлых пород. Аномалии протаивания расположенные на разрезах на 5, 8 и 12 метрах по профилю, на поверхности выражаются в наличии растительности, что может быть свидетельством увеличения мощности оттаявшего слоя, что ярко проявляется на разрезах ЧЗ (0).

Вариации в структуре более глубоких горизонтов мерзлых пород с низкой проводимостью не могут быть достоверно подтверждены из-за очень низкого уровня вклада в сигнал нижних непроводящих слоев. Говорить об особенностях строения мерзлых пород на глубинах более 3 метров, по данным ЧЗ, не представляется возможным.



**Рис. 7** Результаты трансформации данных частотного зондирования (07 августа), а также имеющийся разрез электротомографии на Объекте №1.

Было получено трехмерное распределение кажущегося УЭС (**Ошибка! Источник ссылки не найден.**). На рисунке проведены поверхности равного удельного электрического сопротивления: синяя – 50 Ом•м которая относится к границе зоны влияния опорного столба, и зеленая - 500 Ом•м дающая представление о структурных особенностях подошвы зоны протайки.



**Рис.8.** Трехмерное представление результатов трансформации данных частотного зондирования на Объекте №1. Выделены поверхности равного удельного электрического сопротивления – 50 Ом•м, приуроченные к зоне влияния опорного столба, и 500 Ом•м - граница под зоной протайки



На данном объекте 28 августа были проведены повторные измерения на той же площадке (0). Для получения информации об изменениях среды под воздействием технических построек, а также деятельности человека, был проведен количественный анализ результатов. Установлено, что наблюдаемые изменения в верхней части разреза выражаются в измеряемом сигнале в отклонениях порядка 1 микровольта, что сопоставимо с погрешностью измерения прибора. Тем самым, говорить об изменениях за прошедший 21 день между измерениями не представляется возможным. Для фиксирования отклонений в таком высокоомном разрезе необходимы более длительные наблюдения, а также увеличение мощности и точности прибора.

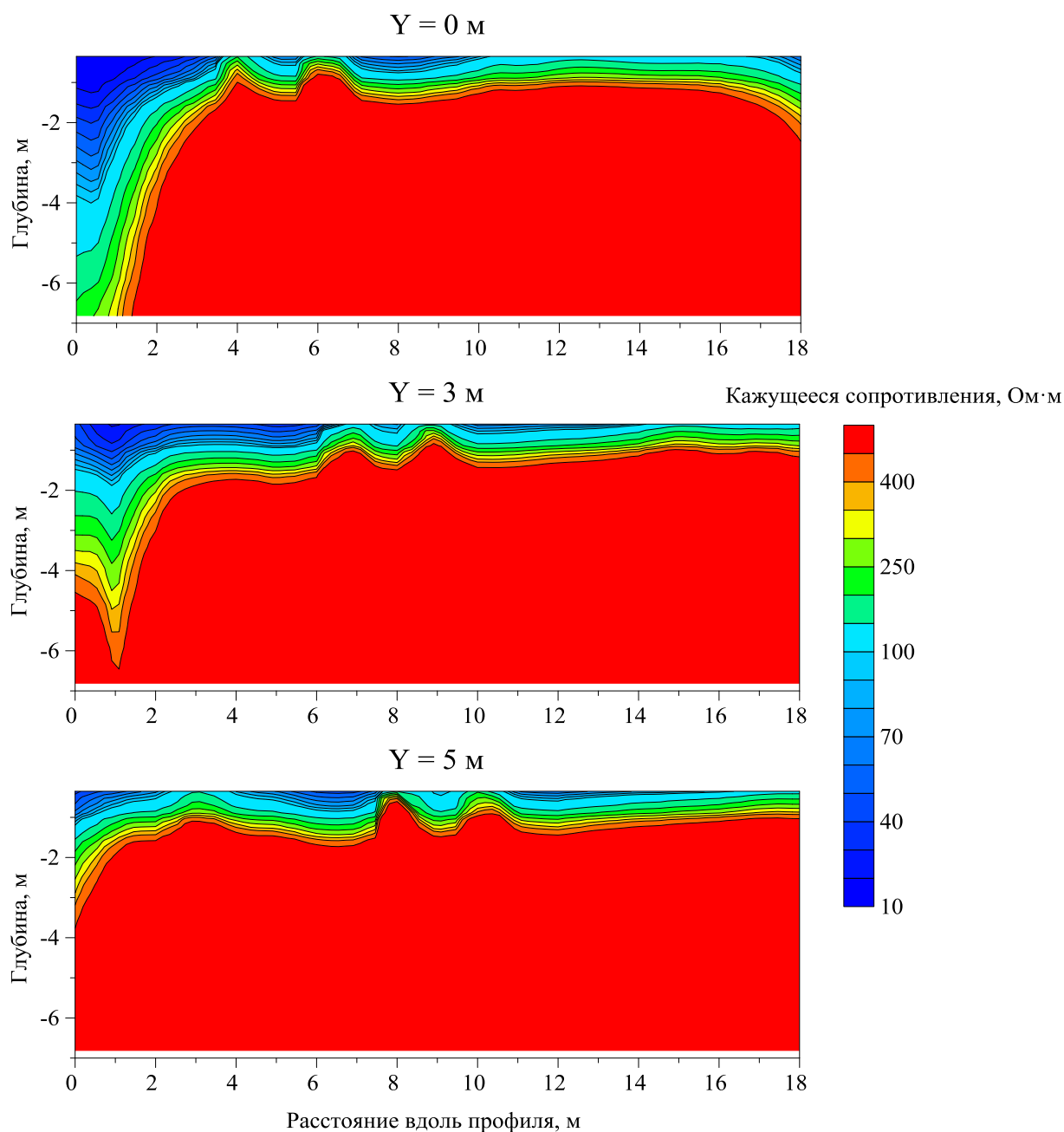
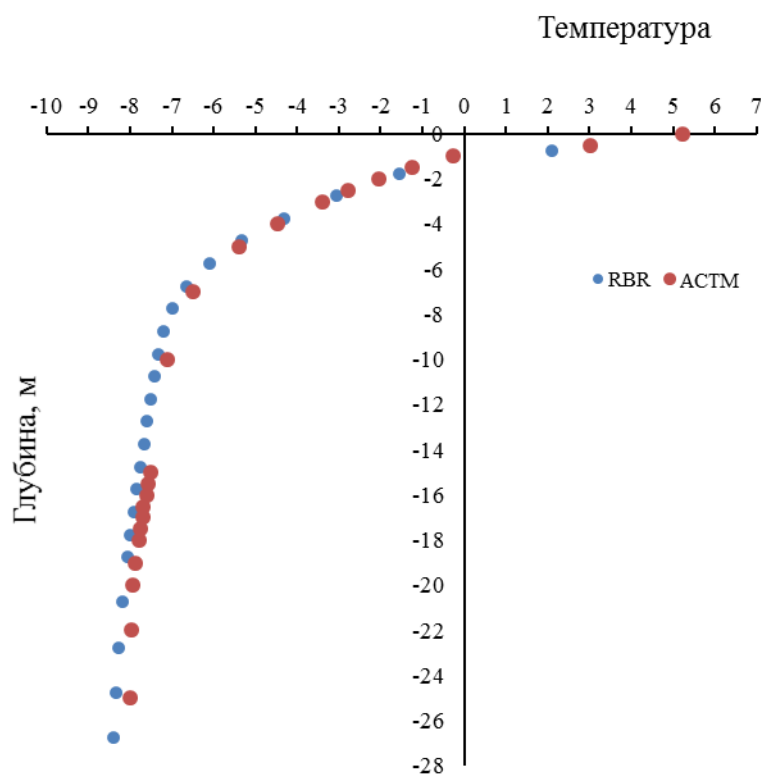


Рис. 9 Результаты трансформации данных частотного зондирования проведенных 28 августа на Объекте №1 (контрольное измерение).

Данные термометрии были получены в скважине, где помимо нашей аппаратуры стояли измерительные устройства коллег из ФРГ [2] (0) и они демонстрируют хорошую корреляцию.

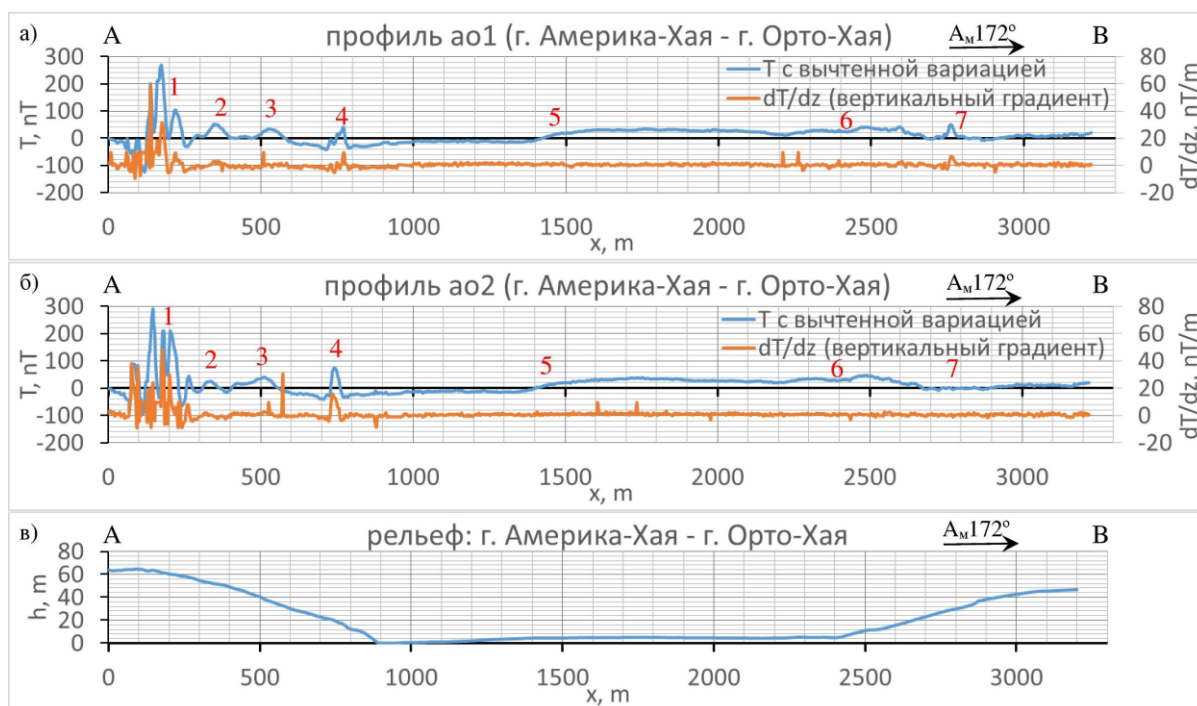


**Рис.10.** Температуры в скв. 22 августа по данным температурных станций RBS (AWI) и ACTM (ИНГГ СО РАН).

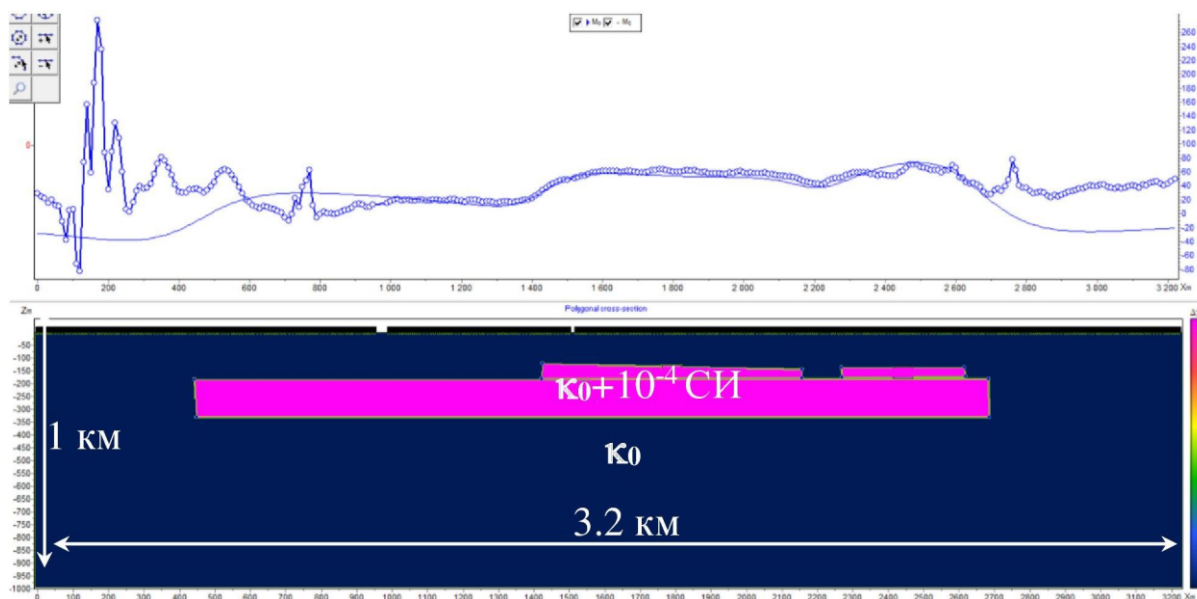
На данный момент собрано достаточно данных по термометрии, чтобы делать выводы о начале температурного мониторинга. Установленная аппаратура будет работать круглогодично и к началу следующего полевого сезона в нашем распоряжении будет обширный материал для анализа.

Данные магнитометрии показали возможность обнаружения объектов недоступных для электротомографии. Так, по профилю г. Америка-Хая—г. Орто-Хая была выполнена магнитная съемка (0).

Видимая часть г. Америка-Хая сложена, в основном, базальтами в которых встречаются прослойки известняков и песчаников. Породы скальных выходов на г. Америка-Хая сильно дифференцированы по магнитной восприимчивости от  $10^{-4}$  до  $10^{-3}$  единиц СИ, восприимчивость одного из образцов почти достигает  $10^{-2}$  единиц СИ. Аномально высокие значения магнитной восприимчивости связаны, предположительно с высоким содержанием магнетита в базальтовых дайках, более поздних по отношению к основной массе базальтов [3].



**Рис. 11** Параллельные профили ао1 и ао2 (г. Америка-Хая – г. Орто-Хая): (а, б) - модуль вектора магнитной индукции ( $T$ ) и его вертикальный градиент ( $dT/dZ$ ), (в) – рельеф; цифрами отмечены вышеописанные аномалии.



**Рис. 12** Модель источников аномалий центральной части профиля ао1 (г. Америка-Хая – г. Орто-Хая) [тестовая версия программного пакета ZondGM2d].

На отметке 1500 метров на 0 хорошо заметно изменение модуля вектора магнитной индукции, при этом градиент не меняется. Такая аномалия обычно соответствует разлому. Это предположение хорошо сочетается с данными, полученными с использованием электротомографии, а также с геологическими наблюдениями. Кроме того, подтверждается данными моделирования (0).

По результатам выполненных работ можно сделать следующие выводы:

1. Метод электротомографии имеет высокий потенциал в условиях Крайнего Севера. Согласно полученным данным, он позволяет различать отдельные типы вечномёрзлых грунтов, а также зоны оттаивания и коренные породы.
2. Для уверенной интерпретации данных, особенно в сложных случаях, когда основная, слабо проводящая часть разреза (мерзлые грунты и коренные породы) контрастирует с сильно проводящими приповерхностными аномалиями (болотистая тундра, озера и протоки), необходимо численное моделирование и проверка бурением с извлечением керна.
3. Метод частотного зондирования способен давать более детальную картину по сравнению с методом электротомографии и эффективнее расчленять первые метры разреза мерзлых пород. Следует отметить, что при дальнейших исследованиях следует более детально подходить к выбору и настройке прибора, модификации его для работы в области малых сигналов. Кроме того, необходима калибровка прибора непосредственно на изучаемой территории над неизменённой средой
4. Установлены две Автономные станции температурного мониторинга в скважине глубиной 27 м на о. Самойловский. Период измерений 1 час.
5. Отобраны образцы коренных пород (Америка-Хая, Орто-Хая) и проведены измерения теплопроводности.
6. Магнитная съёмка показала свою информативность в вопросах определения особенностей строения перекрытых четвертичными отложениями коренных пород, недоступных для исследования методом электротомографии.
7. С немецкими коллегами намечены направления совместных работ.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Булгаков А.Ю., Манштейн А.К. Геофизический прибор для автоматизации многоэлектродной электроразведки // Приборы и техника эксперимента. 2006. № 4. С. 123–125.
2. Boike, J.; Kattenstroth, B.; Abramova, K.; Bornemann, N.; Chetverova, A. ; Fedorova, I; Fröb, K.; Grigoriev, M; Grüber, M.; Kutzbach, L.; Langer, M; Minke, M.; Muster, S.; Piel, K.; Pfeiffer, E.M.; Stoof, G.; Westermann, Sebastian; Wischnewski, K.; Wille, C. & Hubberten, H.-W. (2013). Baseline characteristics of climate , permafrost and land cover from a new permafrost observatory in the Lena River Delta , Siberia (1998-2011). Biogeosciences. ISSN 1726-4170. 10(3), s 2105- 2128 . doi: 10.5194/bg-10-2105-2013
3. Каширцев А.С., Каширцев В.А. Верхнепермский разрез нижней Лены // Тр. IX науч. Конф. Якут. ун-та (тез. докл.). Якутск, 1966.