

# Исследование гидрогенных таликов методами электроразведки

Н.Ю. Бобров

Санкт-Петербургский государственный университет  
n.bobrov@spbu.ru

- Талики, или талые (таликовые) зоны - толщи талых или немерзлых горных пород, которые развиты ниже слоя сезонного промерзания и существуют непрерывно более года
- Гидрогенные (подводно-тепловые) талики формируются в результате отепляющего воздействия водоемов и водотоков на температурный режим донных слоев горных пород

(Романовский, 1972)

В районах распространения многолетнемерзлых пород талики практически всегда присутствуют под озерами и водотоками, которые зимой не промерзают до дна

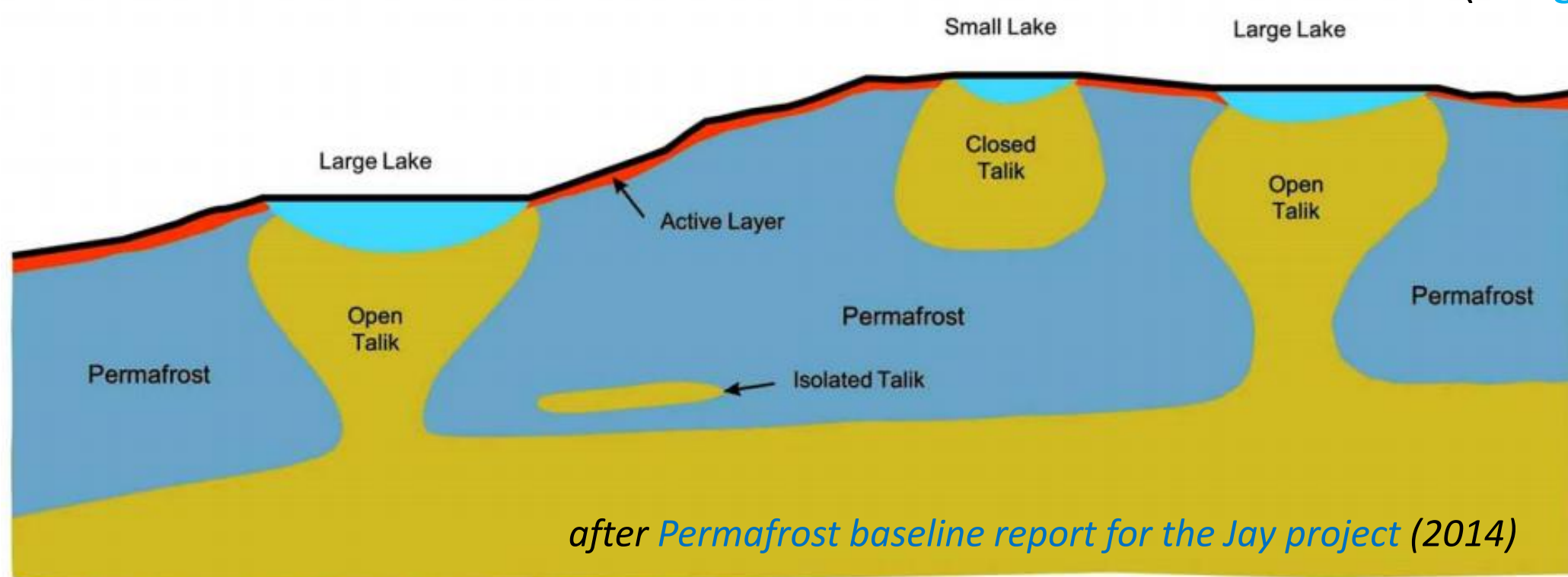
## Значение таликов:

- Индикаторы климатических изменений в Арктике
- Потенциальные источники водоснабжения промышленных объектов и поселений

## Проблемы:

“...Despite the importance of sublake permafrost to landscape carbon cycling, [there is a recognized gap in our knowledge of talik formation, size, shape, type \(open or closed\), growth rate, and persistence](#) that exists. Since lake taliks can extend to many tens of meters or more beneath the lake bottoms, direct measurements of lake talik geometries and properties can be costly and difficult”

(Creighton et al, 2018)



- Талики относительно плохо изучены
- Как правило, отсутствует информация даже об их размерах и форме
- Очень мало данных бурения

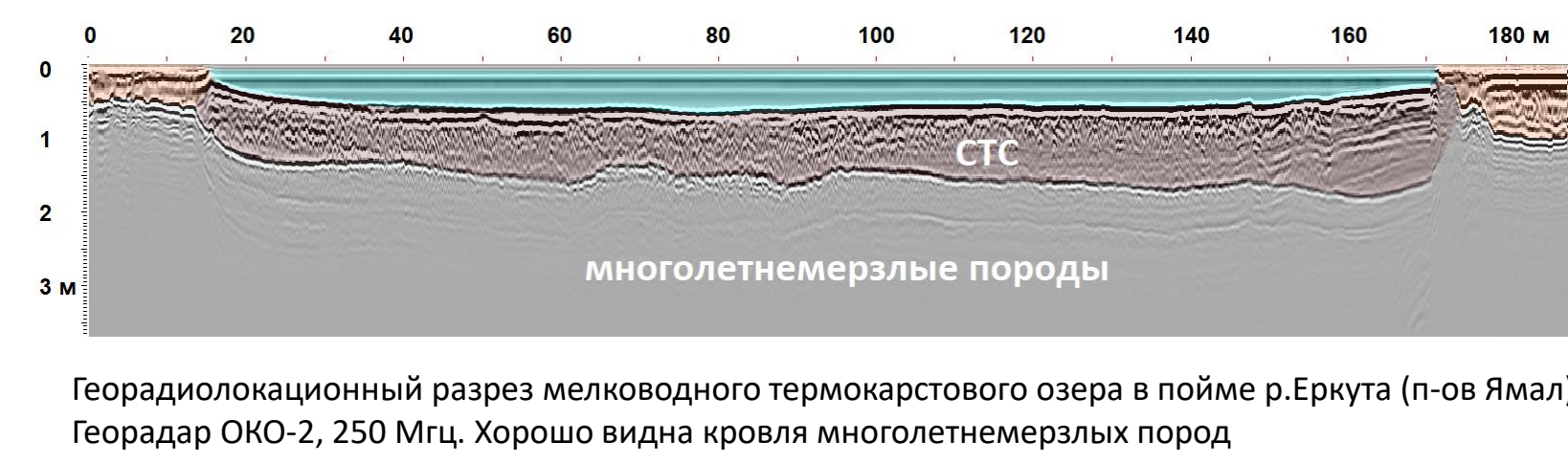
## Геофизика? Электроразведка!

Большой контраст электрических свойств талых и мерзлых пород благоприятен для изучения таликов электрическими и электромагнитными методами

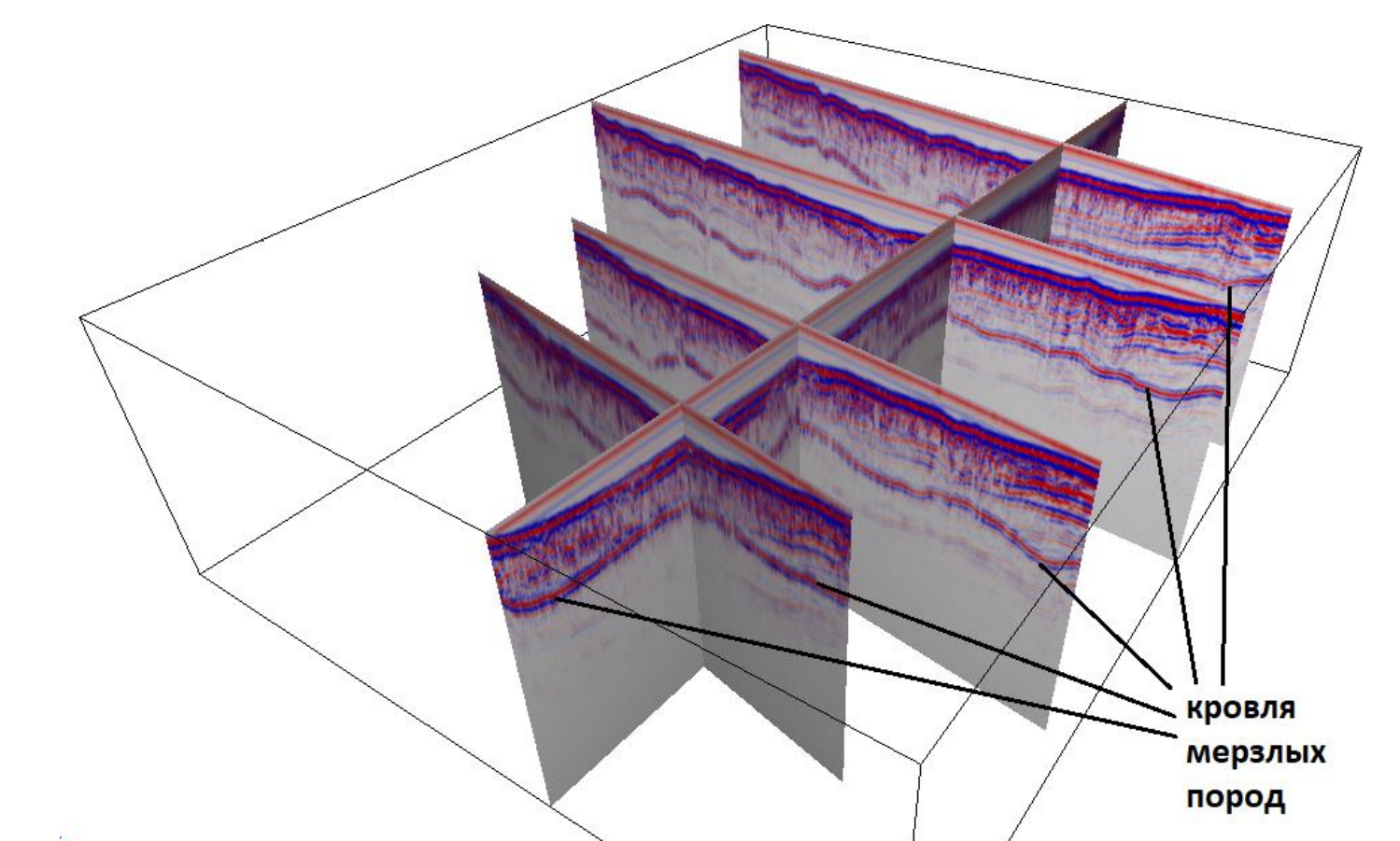
### Георадиолокация (GPR)

**Плюсы** – высокая разрешающая способность, возможность работ в зимний период, высокая производительность

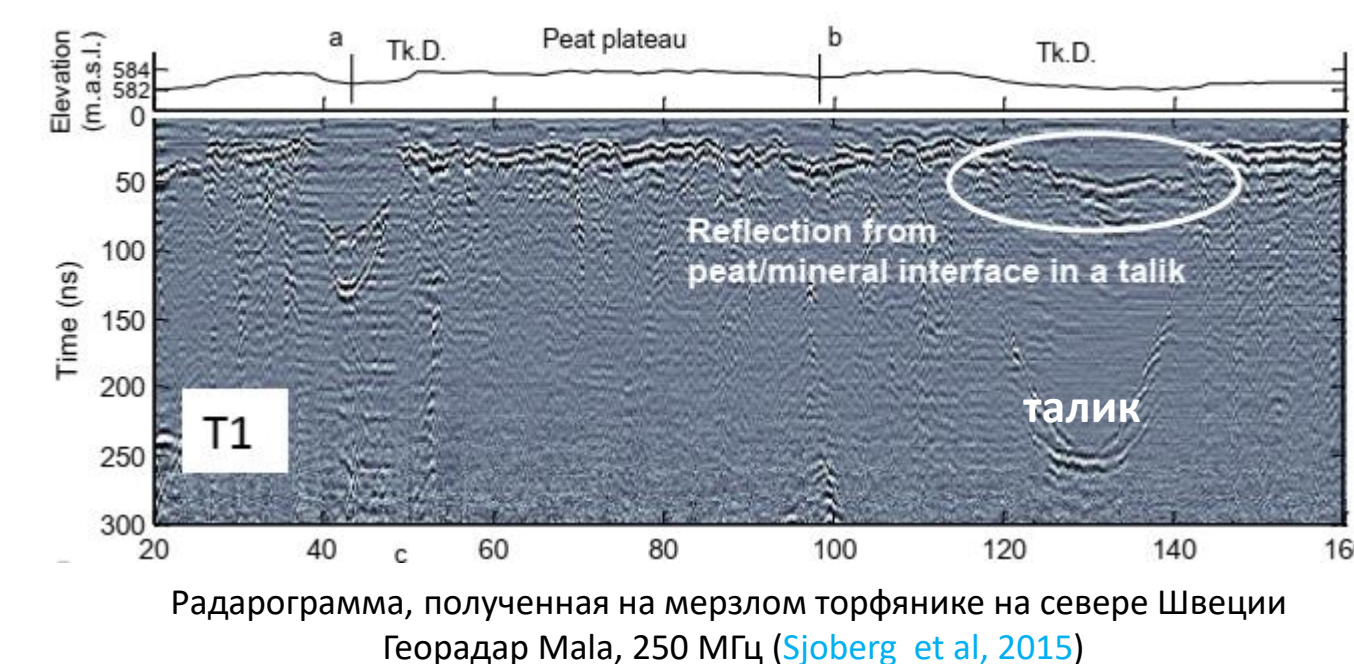
**Минусы** – малая глубинность, особенно при низких сопротивлениях пород



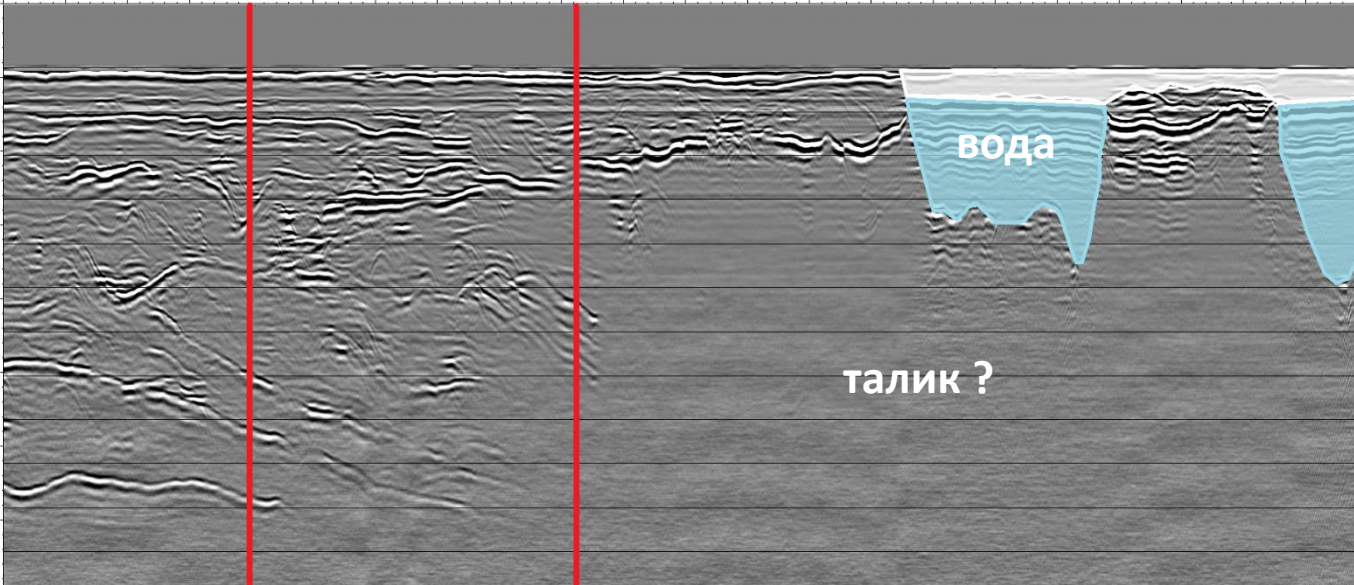
Георадиолокационный разрез мелководного термокарстового озера в пойме р.Еркута (п-ов Ямал)  
Георадар ОКО-2, 250 МГц. Хорошо видна кровля многолетнемерзлых пород



Псевдо-3D визуализация результатов георадиолокационной съемки на пойменном озере



Радарограмма, полученная на мерзлом торфянике на севере Швеции  
Георадар Mala, 250 МГц (Sjöberg et al, 2015)

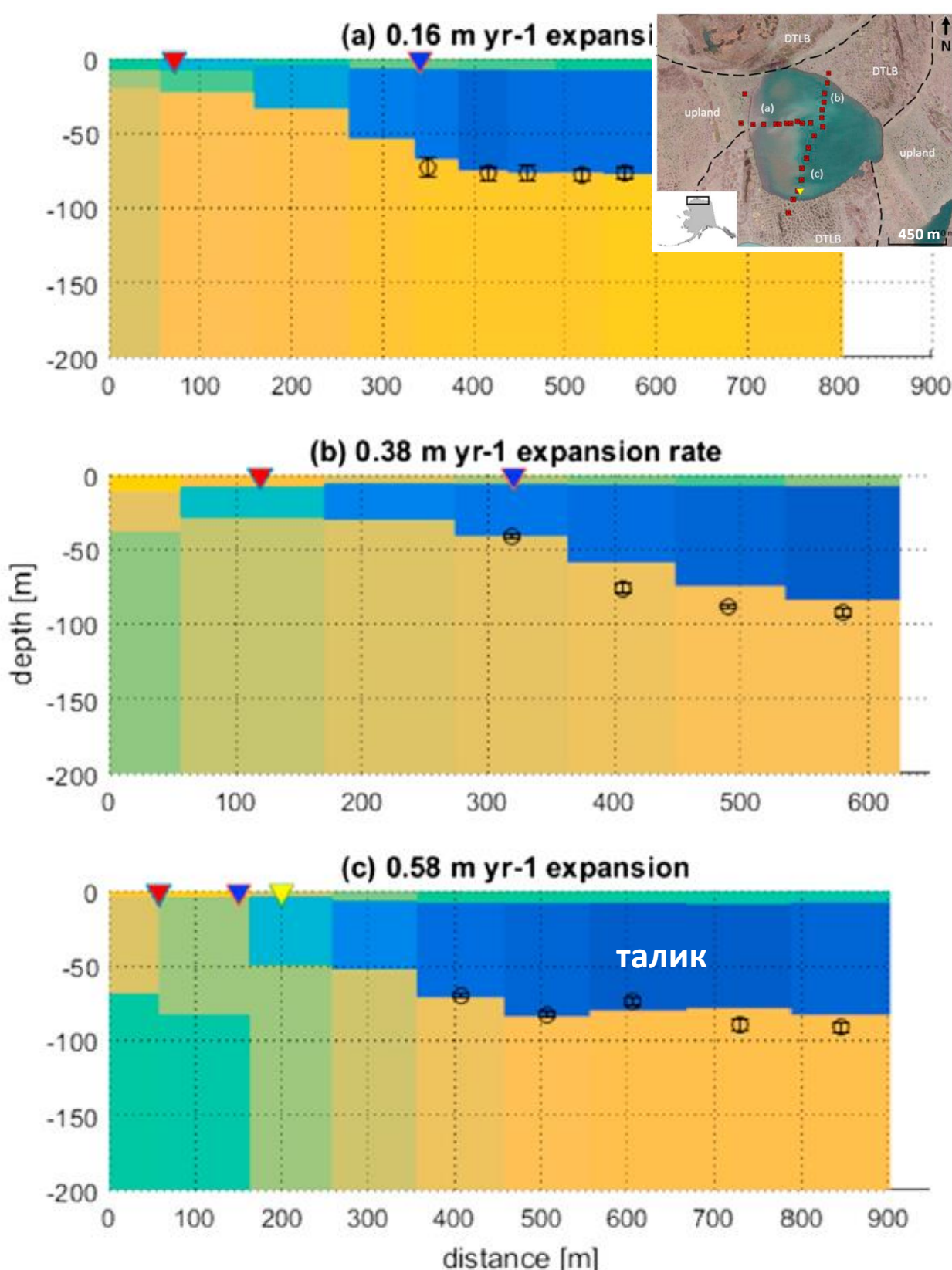


Радарограмма, полученная в береговой зоне Б.Туматской протоки (дельта р.Лена)  
Георадар GSSI, 300 МГц. Пропадание отражений в правой части радарограммы, вероятно, связано с тем, что породы находятся в талом состоянии

### Зондирование становлением поля (TEM)

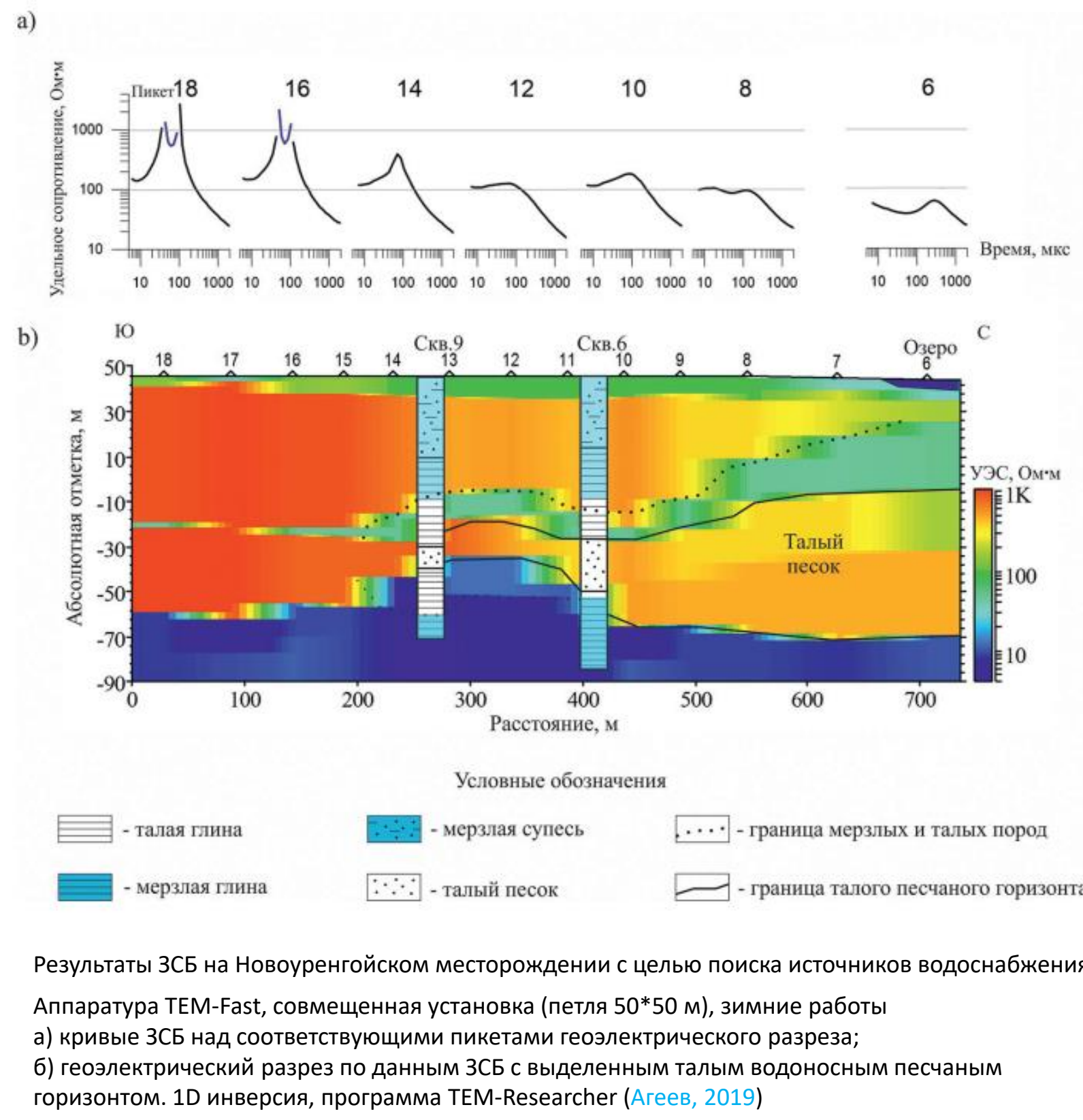
**Плюсы** – большая глубинность, возможность работ в зимний период, высокая производительность, отсутствие заземлений

**Минусы** – проблемы в разрешении верхней части разреза, на ранних временах; возможное влияние быстрой вызванной поляризации (но может быть источником дополнительной информации!); интерпретация, как правило, 1D



Геоэлектрические разрезы по результатам интерпретации TEM зондирований большого термокарстового озера на Аляске

Аппаратура ABEM WalkTEM, зондирования со льда, генераторная петля 40\*40 м, соосная установка  
Квази-2D (laterally constrained 1D) инверсия, программа AarhusInv (Creighton et al, 2018)



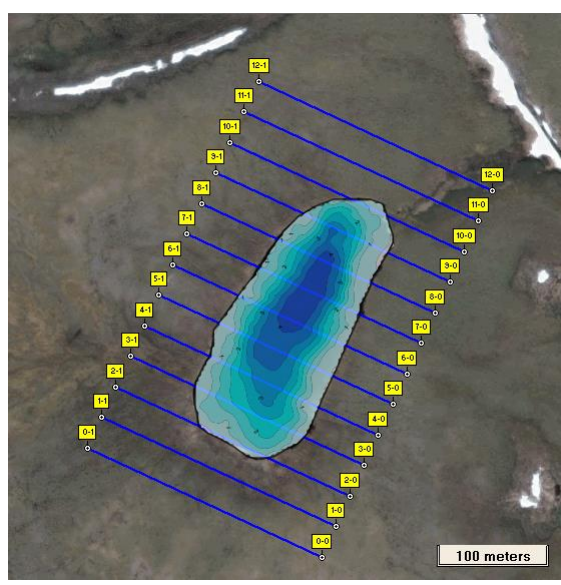
Результаты ЗСБ на Новоуренгойском месторождении с целью поиска источников водоснабжения

Аппаратура TEM-Fast, совмещенная установка (петля 50\*50 м), зимние работы  
а) кривые ЗСБ над соответствующими пикетами геоэлектрического разреза;  
б) геоэлектрический разрез по данным ЗСБ с выделенным талым водоносным песчаным горизонтом. 1D инверсия, программа TEM-Researcher (Ареев, 2019)

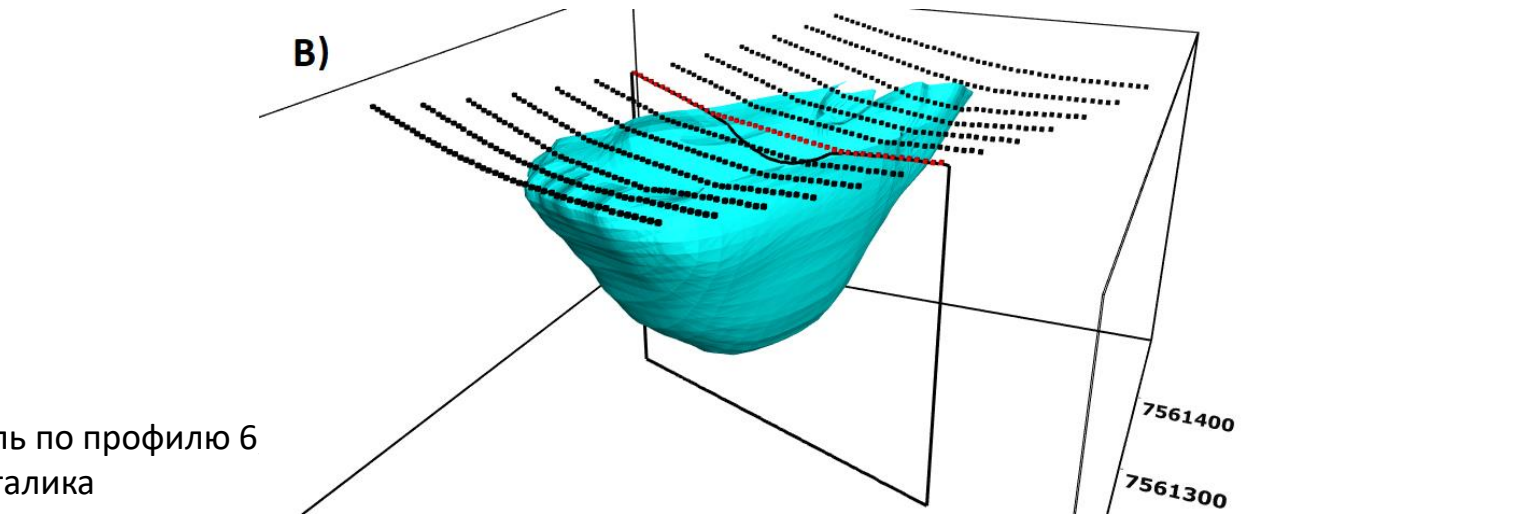
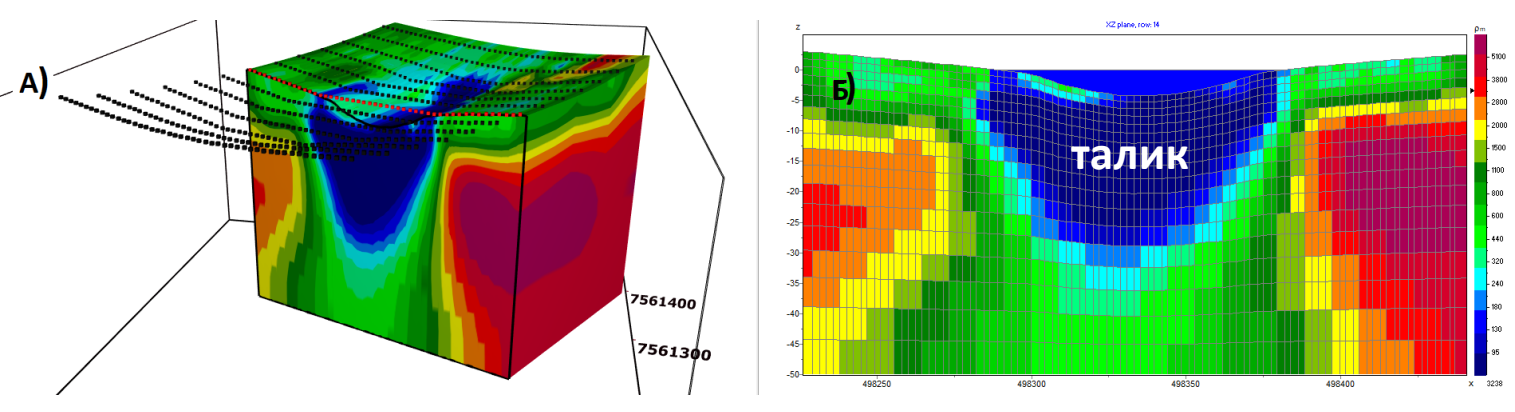
### Электрическая томография (ERT)

**Плюсы** – хорошая разрешающая способность, развитый аппарат 2D и 3D интерпретации

**Минусы** – невысокая производительность, сложность работ в зимний период (бесконтактный вариант – малая глубинность)



Электротомография с поверхности озера  
Аппаратура располагается в надувной лодке



Расположение профилей электротомографии для 2.5D съемки на термокарстовом озере (п/о Ямал)

Результаты 3D инверсии данных ERT по термокарстовому озеру (п/о Ямал):  
Аппаратура Syscal Pro, установка Шлюмберге, программа ZondRes3D  
А) трехмерная геоэлектрическая модель – срез по профилю 6; Б) геоэлектрическая модель по профилю 6  
В) изоповерхность УЭС, соответствующая 290 Ом – приближение формы подошвенного талика  
Важный вывод – УЭС талых пород оказывается меньше УЭС воды в водоеме!



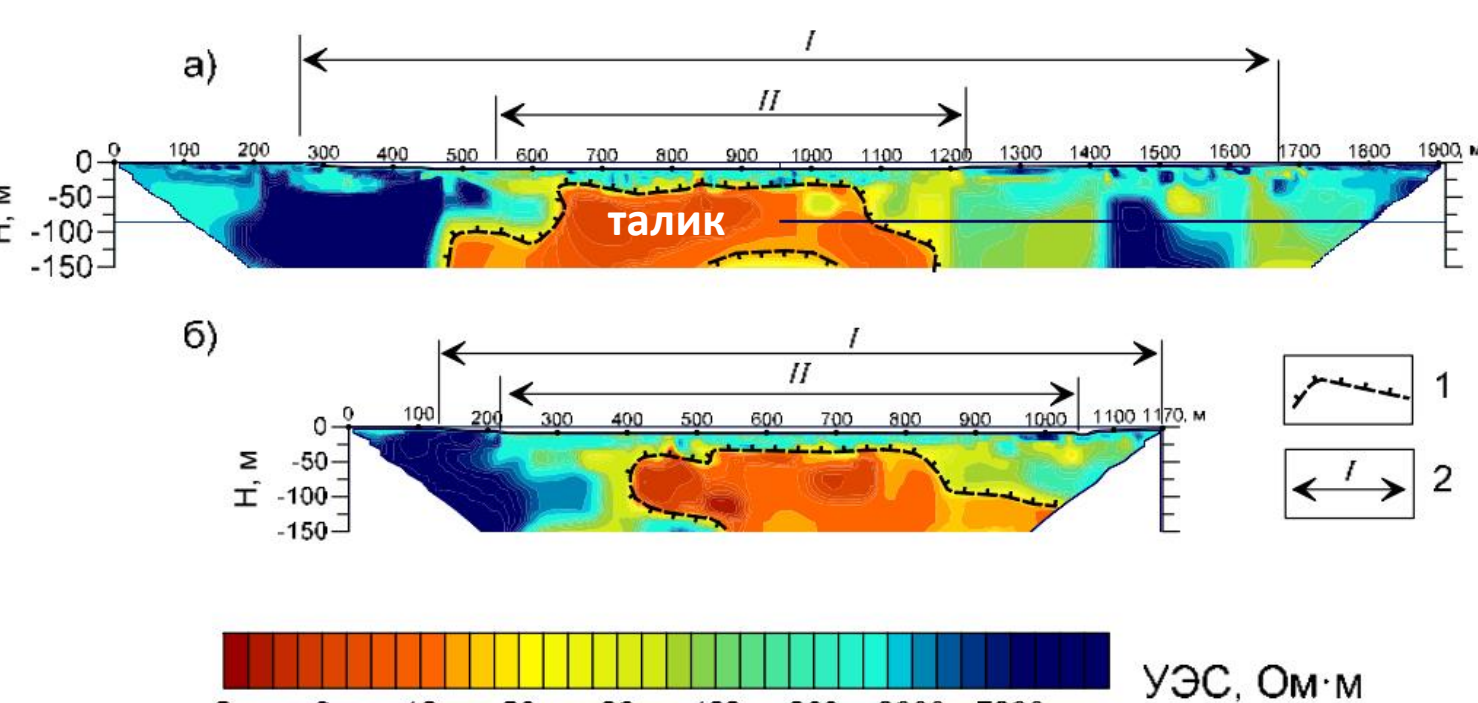
Электротомография на акватории в движении (continuous resistivity profiling, CRP)



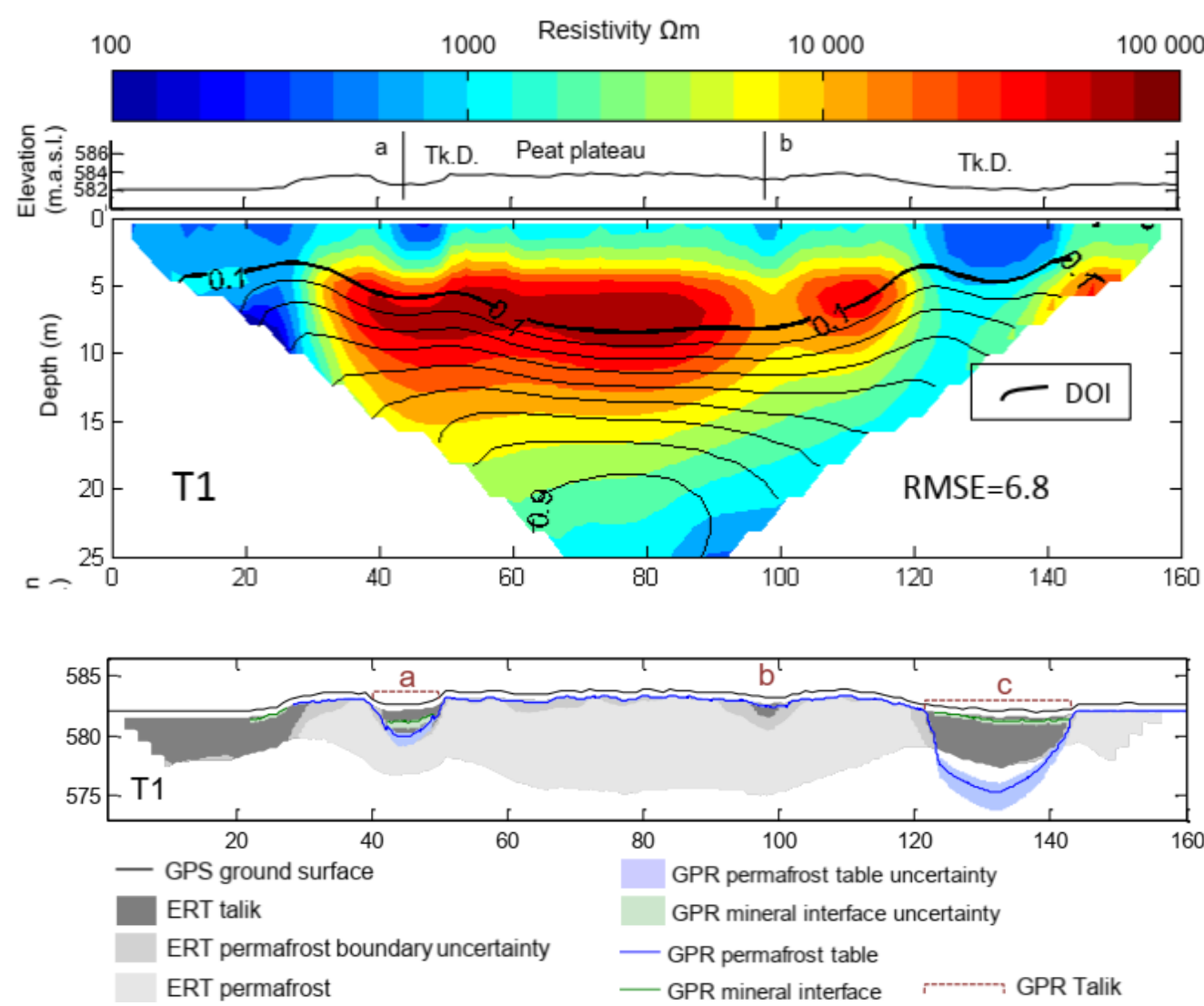
Схема работ методом CRP на Б.Туматской протоке (дельта р.Лена)  
Цифрами обозначены номера профилей



Стационарные береговые зондирования  
Аппаратура размещается на урзе воды, линия прокладывается ортогонально берегу



Результаты работ методом ERT на спущенном термокарстовом озере (хасырее) на п-ове Гыдан  
Аппаратура Скала-48, трехэлектродная установка, 2D инверсия, программа Res2DInv  
а) профиль 1; б) профиль 2; 1 - предполагаемая граница ММП; 2 - размеры палеозоёв  
Хорошо видна низкоомная таликовая зона, промерзающая сверху (Шени и др., 2019)

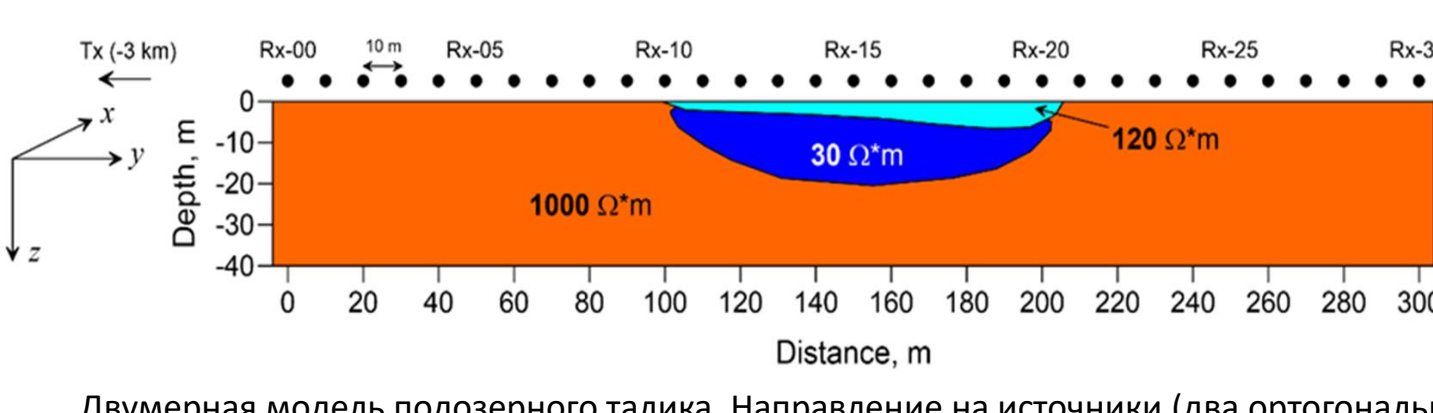


Вверху – электротомографический разрез мерзлого торфяника на севере Швеции  
Аппаратура ABEM Terrameter, установка Веннера, программа Res2DInv  
Внизу – интерпретация мерзлотного разреза по профилю на основе данных ERT и GPR  
< (рисунк слева). Мощность талика под термокарстовыми депрессиями (Tk.D.) – до 7 м (Sjöberg et al, 2015)

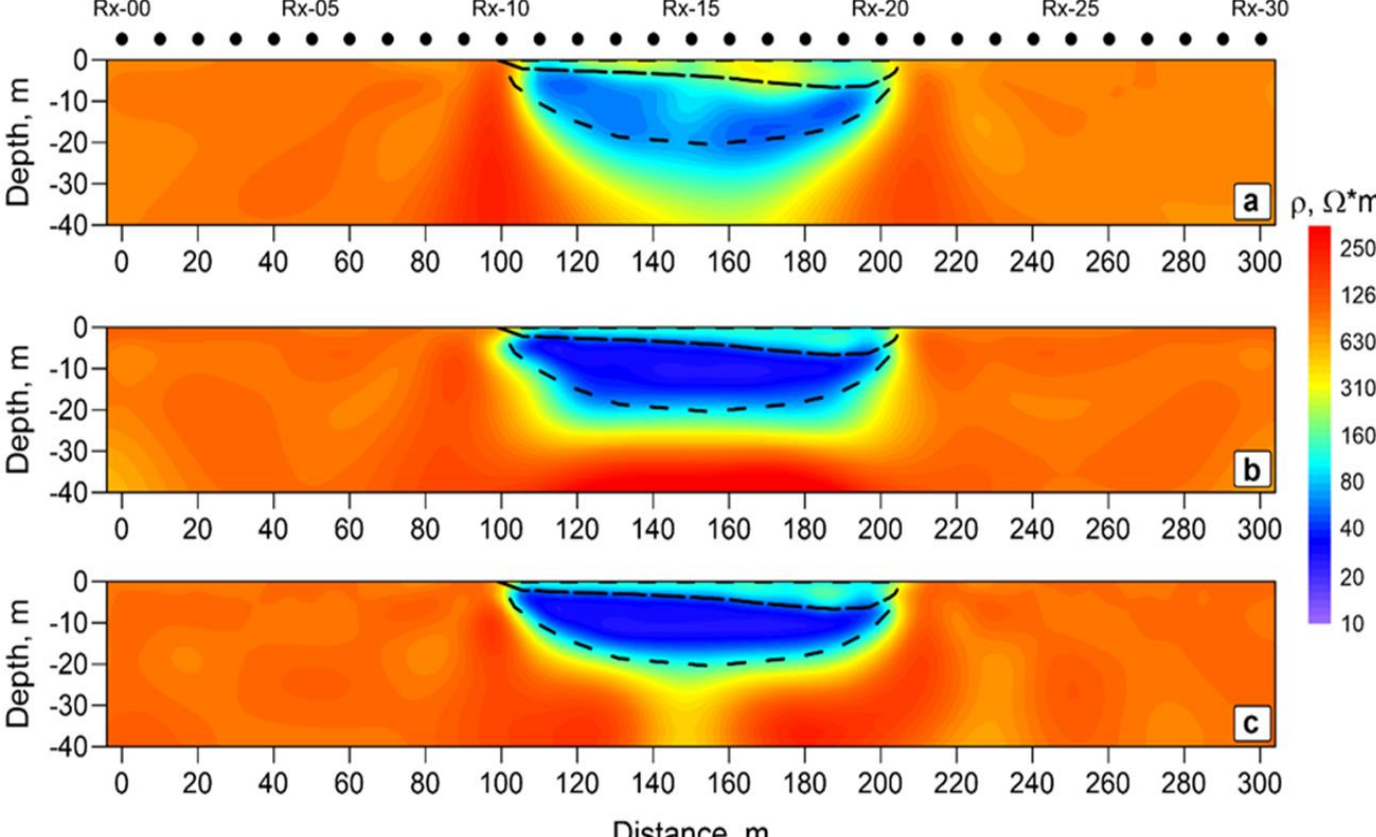
### Радиоманнителлурическое зондирование с контролируемым источником (CSMT)

**Плюсы** – большая глубинность и хорошее разрешение верхней части разреза, возможность работ в зимний период, высокая производительность

**Минусы** – необходимость (в стандартной модификации) организации заземленного источника, возможное влияние быстрой вызванной поляризации (но может быть источником дополнительной информации!); сложность интерпретации данных в промежуточной зоне



Двумерная модель подошвенного талика. Направление на источники (два ортогональных ГЭД) показано стрелкой в левом верхнем углу



Результаты 2D инверсии синтетических данных метода PMT-K (прямая задача – программа MARE2DEM) в приближении плоской волны (программа ZondMT2D)  
а – инверсия для TM моды, б – инверсия для TE моды, в – бимодальная инверсия. Черный пунктир показывает контуры талика и водной массы в исходной модели.  
(Сараев и др., 2021)

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №21-47-04401

## Литература:

- Агеев, Д.В., 2019. Применение зондирования становлением поля для решения гидрогеологических задач в условиях криолитозоны на примере Новоуренгойского месторождения. *Инженерные изыскания*, 13(3), с.40-49.
- Романовский, Н.Н., 1972. Талики в области многолетнемерзлых пород и схема их подразделения. *Вестник Московского университета. Серия геол.*, (1), с.23-34.
- Сараев, А. К., Шляков, А. А., Бобров, Н. Ю., Тезкан, Б., 2021. Опыт применения и перспективы метода радиоманнителлурических зондирований с контролируемым источником при изучении криолитозоны Арктики. In *Conference Proceedings, Engineering and Mining Geophysics 2021, Gelendjik*, Apr 2021, Volume 2021, p.1 - 10 (pp. 1-9).
- Шени, А.Н., Оленченко, В.В., Камнев, Я.К., Синицкий, А.И., 2019. Структура промерзающего подошвенного талика на стационаре Парисенто (п-ов Гыдан) по данным электротомографии. *Интерэкспо Гео-Сибирь*, 2, с.103-110.
- Angelopoulos, M., Westermann, S., Overduin, P., Faguet, A., Olenchenko, V., Grosse, G. and Grigoriev, M.N., 2019. Heat and salt flow in subsea permafrost modeled with CryoGRID2. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 124(4), pp.920-937.
- Creighton, A.L., Parsekian, A.D., Angelopoulos, M., Jones, B.M., Bondurant, A., Ingram, M., Lenz, J., Overduin, P.P., Grosse, G., Babcock, E. and Arp, C.D., 2018. Transient electromagnetic surveys for the determination of talik depth and geometry beneath thermokarst lakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(11), pp.9310-9323.
- Fedorova I., Bobrov N., Pankova D., Konosavskiy P., Alekseeva N., 2019. Modeling of thermic process of the Arctic ecosystems. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM: Surveying Geology & Mining Ecology Management*, v.19, Book 3.1, pp.401-410.
- Sjöberg, Y., Marklund, P., Pettersson, R. and Lyon, S.W., 2015. Geophysical mapping of palsa peatland permafrost. *The Cryosphere*, 9(2), pp.465-478.



VIII Всероссийская школа-семинар по электромагнитным зондированиям Земли имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна (ЭМЗ-2021), Москва, 4 – 9 октября 2021 г.