

# ВОЗМОЖНОСТИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ И ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ **ДЛЯ РЕШЕНИЯ** **ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ**

## АНИКЕЕВ СЕРГЕЙ НИКОЛАЕВИЧ

Ведущий геофизик АО «Группа компаний ШАНЭКО»  
(АО «ГК ШАНЭКО»), г. Москва, Россия  
shaneco.group@shaneco.ru

## АННОТАЦИЯ

Специалисты АО «ГК ШАНЭКО» имеют опыт картирования многолетнемерзлых грунтов и таликов в мерзлых грунтах, зон трещиноватости и дробления, тектонических зон, а также выявления иных локальных неоднородностей в инженерно-геологических разрезах. Они также имеют опыт исследований загрязнения территорий в результате разлива нефтепродуктов, выявления рудных объектов и выделения рудовмещающих и рудоконтролирующих структур. В представленной статье ведущий геофизик этой компании Сергей Аникеев кратко изложил возможности применения электроразведочных работ методами вертикального электрического зондирования и электротомографии при решении инженерно-геологических задач (главным образом для построения инженерно-геологических моделей на основе полученных геоэлектрических разрезов) и привел примеры выполнения электротомографических исследований для уточнения распространения многолетнемерзлых пород.

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

электроразведка; вертикальное электрическое зондирование; электротомография; геоэлектрический разрез; многолетнемерзлые грунты.

## ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Аникеев С.Н. Возможности вертикального электрического зондирования и электротомографии для решения инженерно-геологических задач // Геоинфо. 2023. № 6. С. 40–44 DOI:10.58339/2949-0677-2023-5-6-40-44

# CAPABILITIES OF VERTICAL ELECTRICAL SOUNDING AND ELECTRICAL TOMOGRAPHY FOR SOLVING ENGINEERING-GEOLOGICAL PROBLEMS

**ANIKEEV SERGEY N.**

Leading geophysicist at AO "GK SHANEKO" [JSC "SHANEKO Group of Companies"], Moscow, Russia  
shaneco.group@shaneco.ru

## ABSTRACT

Specialists of AO "GK SHANEKO" [JSC "SHANEKO Group of Companies"] have experience in mapping permafrost soils and taliks in frozen soils, zones of fracturing and crushing, tectonic zones, as well as in identifying other local heterogeneities in engineering-geological sections. They also have experience in studying the contamination of territories as a result of oil spills, identifying ore objects, and identifying ore-bearing and ore-controlling structures. In the presented paper, the leading geophysicist of this company, Sergey Anikeev, briefly outlined the capabilities of using electrical prospecting by vertical electrical sounding and electrical tomography methods for solving engineering-geological problems (mainly for constructing engineering-geological models based on the obtained geoelectric sections). He also gave examples of performing electrical tomographic studies to clarify distribution of permafrost soils.

## KEYWORDS:

electrical prospecting; vertical electrical sounding; electrical tomography; geoelectric section; permafrost soils.

## FOR CITATION:

Anikeev S.N. *Vozможnosti vertikal'nogo ehlektricheskogo zondirovaniya i ehlektrotomografii dlya resheniya inzhenerno-geologicheskikh zadach* [Capabilities of vertical electrical sounding and electrical tomography for solving engineering-geological problems] // *GeoInfo*. 2023. № 6. S. 40–44 doi:10.58339/2949-0677-2023-5-6-40-44 (in Rus.).

## Вместо введения. О необходимости и сути электроразведки ►

Одним из основных видов разведочной геофизики является электроразведка. В современных геологоразведочных работах геофизика в целом и электроразведка в частности занимают важное место, так как способствуют решению различных геологических задач и позволяют сократить затраты на бурение, которое является самой дорогой составляющей всего геологоразведочного процесса.

По своей физической сути электроразведка заключается в изучении зависимости естественного или искусственного электромагнитного поля от электрических (а иногда и от магнитных) свойств среды, на которую это поле действует.

По условиям проведения выделяют наземную, морскую, скважинную, шахтную и аэроэлектроразведку. По целевому объекту – рудную, инженерно-геологическую и для поисков углеводородов.

Применение геофизических методов в целом и электроразведки в частности возможно потому, что геологические разрезы сложены грунтами (и иногда антропогенными телами) с разными физическими свойствами, причем зачастую с контрастными границами.

Одной из основных электрических характеристик среды является удельное электрическое сопротивление ( $\rho$ ) – главный информационный параметр для большинства методов электроразведки.

*Геоэлектрический разрез* отражает совокупность электрических и геометрических характеристик грунтов, слагающих исследуемую территорию. На таком разрезе обозначаются основные границы между грунтами, различающимися по своим электрическим свойствам [1–3].

## О методе вертикального электрического зондирования ►

Одним из основных электроразведочных методов для получения геоэлектрических разрезов является метод вер-

тикального электрического зондирования (ВЭЗ).

Теория этого метода разработана для распространения электрического поля в горизонтально-слоистом полупространстве. Ее использование дает хорошие результаты для горизонтально-слоистых геологических разрезов, удовлетворительные – для наклонно-слоистых, но имеет сложности при исследовании геологических разрезов, имеющих крутопадающие и/или резко изменчивые параметры слоев по простиранию [4, 5].

На рисунке 1 показан пример построения геоэлектрического разреза на основе результатов полевых измерений методом ВЭЗ, которые были обработаны с помощью прикладной программы IPI2WIN. На рисунке отражена трансформация полученного изображения электрического поля в псевдо-геоэлектрический разрез (разрез кажущихся удельных электрических сопротивлений) и затем – в геоэлектрический разрез с подобранными характеристиками.



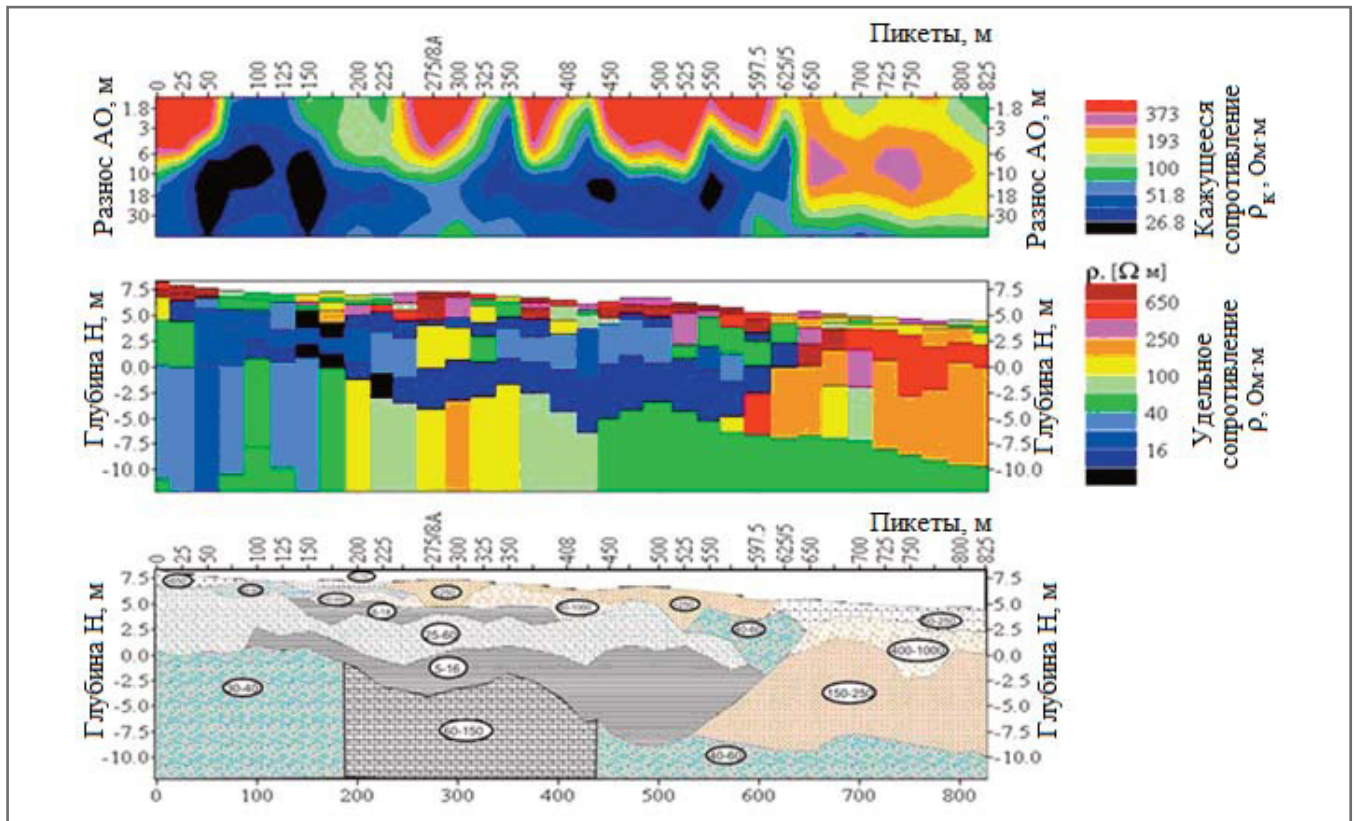


Рис. 1. Получение геоэлектрического разреза на основе полевых измерений методом ВЭЗ

### О методе электротомографии ►

Для получения более качественных геоэлектрических разрезов, особенно при неблагоприятных геологических особенностях, было разработано такое направление, как электрическая томография (электротомография), которое в настоящее время широко применяется в инженерной геофизике.

Электротомография является современным направлением методов сопротивлений и вызванной поляризации в разведочной геофизике, предназначенным для получения двумерных геоэлектрических разрезов и соответствующих трехмерных картин на основе измерений, выполненных с поверхности земли или из скважин. Это не один отдельный метод электроразведки, а комбинация методов электрического зондирования и профилирования.

Причем в отличие от традиционных вертикальных электрических зондирований при электротомографии используются более плотные системы наблюдений с постоянным расстоянием между электродами. Суть данной методики измерений заключается в многократных повторных измерениях сигналов в приемных линиях при различных положениях питающей линии. Таким способом реализуется своеобразная «подсветка» геологического разреза с разных позиций источника тока и измере-

ние измененных геологическими объектами сигналов на приемных линиях.

Благодаря использованию указанного принципа и современных алгоритмов инверсии электротомография позволяет изучать сложные среды в двумерном и трехмерном вариантах, что существенно расширяет круг решаемых электроразведочных задач. Полученное в результате электротомографии изображение электрического поля является наиболее приближенным к геоэлектрическому разрезу.

Основной параметр, измеряемый при электротомографии – удельное электрическое сопротивление грунтов, определенное в некотором объеме (точке) исследуемого пространства либо в некоторой ячейке (точке) в двумерном варианте. Отсюда следует ряд закономерностей.

Размер и положение ячейки на разрезе зависит от взаимного расположения пар приемных и генерирующих электродов. Плотность расположения ячеек на разрезе неравномерна, причем в значительной части они частично перекрывают друг друга. Чем выше эта плотность, тем детальнее получается геоэлектрический разрез. В срединной части электротомографического разреза она максимальна и убывает с глубиной и с расстоянием в стороны краевых областей электротомографи-

ческой установки (косы), то есть совокупности подводящих проводов и электродов с установленным расстоянием между ними.

При исследованиях протяженного профиля наблюдений требуется перекрытие между измерениями с помощью различных кос, а для достижения больших глубин измерений необходимо увеличить саму электротомографическую установку [6].

Все эти закономерности учитываются при обработке результатов полевых наблюдений с помощью специализированных геофизических программ – X2IPI, RES2DINV и др.

Спектр задач, которые можно решить с помощью электротомографии, достаточно широк. Кратко рассмотрим его.

1. Изучение положений геологических границ в плане и в разрезе, а именно:

- определение рельефа кровли скальных и мощности перекрывающих их не-скальных грунтов и коры выветривания;
- расчленение разреза скальных и дисперсных грунтов на слои различного литологического состава;
- определение глубины залегания подземных вод и мощности водоносных горизонтов;
- определение глубины залегания водоупоров и их целостности.

2. Изучение локальных геологических неоднородностей, а именно:

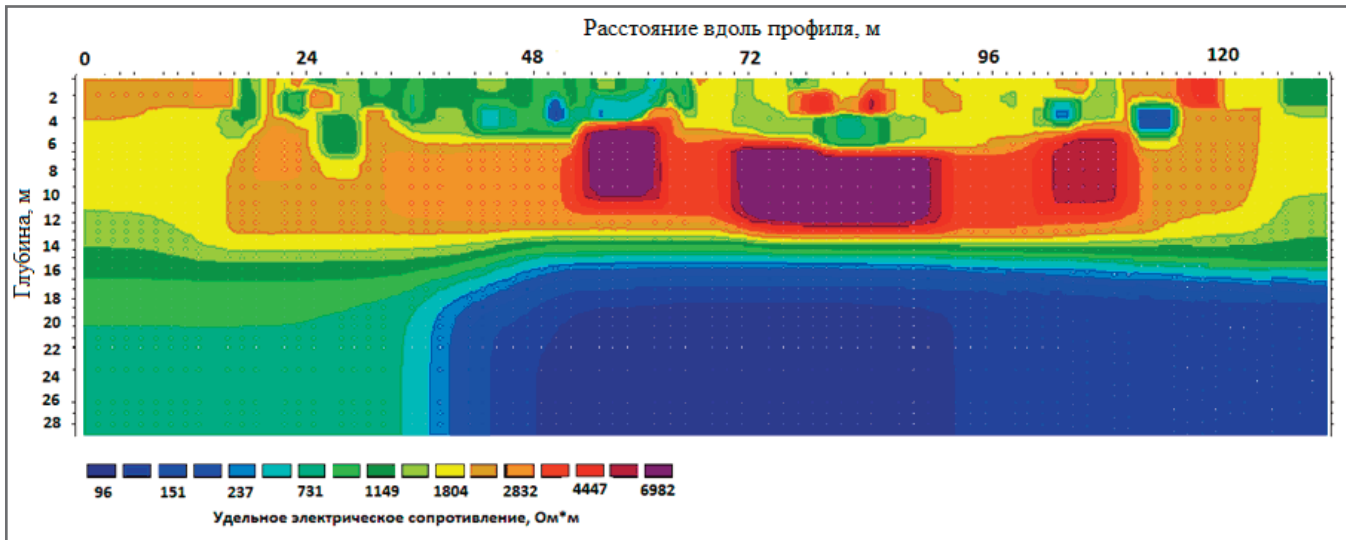


Рис. 2. Пример псевдо-геоэлектрического разреза с выявлением маломощного горизонта многолетнемерзлых грунтов

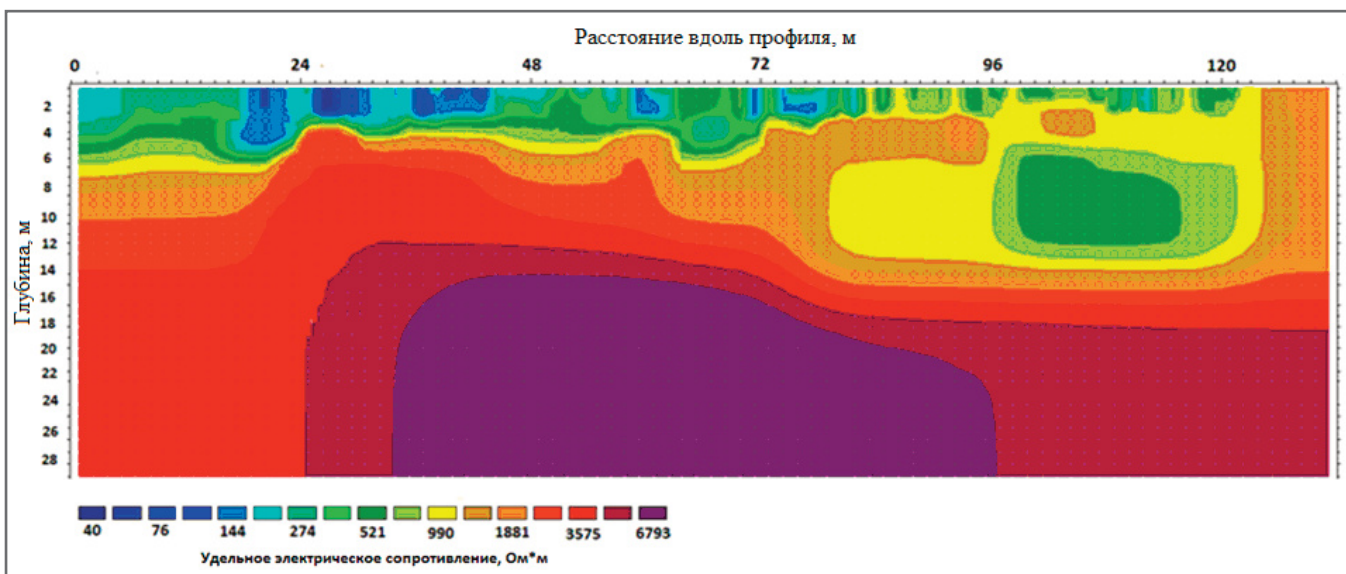


Рис. 3. Пример псевдо-геоэлектрического разреза с выявлением кровли толщи многолетнемерзлых грунтов

- обнаружение и оконтуривание зон повышенной трещиноватости и тектонических нарушений;
- обнаружение и оконтуривание карстовых полостей;
- обнаружение и оконтуривание погребенных останцев скальных пород и переруглублений в скальном основании;
- обнаружение и оконтуривание таликов, перелетков и мерзлых грунтов среди талых, а также отдельных ледяных тел и зон повышенной льдистости.

### Практические примеры использования электротомографических исследований ►

На рисунках 2–4 показаны результаты использования электротомографии, полученные специалистами АО «ГК ШАНЭКО» при изучении распространения многолетнемерзлых грунтов и выявле-

нии тектонических особенностей на некоторых объектах Восточной Сибири.

На рисунке 2 видно, что многолетнемерзлые грунты слагают сравнительно маломощный горизонт в интервале глубины 6–12 м. Ниже этого горизонта находятся грунты в талом состоянии, причем на псевдо-геоэлектрическом разрезе хорошо прослеживается граница между суглинками и супесями в районе пикета ПК 36 (36 м). Полученные геофизические данные дали основание довести часть разведочных скважин с проектных глубин 7–10 м до входа их забоев в талые грунты.

На рисунке 3 видно, что грунты при поверхностной части разреза испытывают сезонное промерзание-оттаивание. Залегающие под ними многолетнемерзлые грунты распространены до глубины 28 м (но задача оценки распространения многолетнемерзлых грунтов на

больших глубинах в данном случае не ставилась). Кровля грунтов в мерзлом состоянии изменчива при средней глубине 2–4 м, причем в районе пикетов ПК 100–120 (100–120 м) фиксируется зона оттаивания грунтов до глубины 10–12 м, что было подтверждено бурением разведочных скважин.

В практике строительства фундаментов зданий и сооружений в условиях многолетнемерзлых грунтов широко применяется устройство буронабивных свай, опирающихся своим нижним концом о мерзлые грунты. В выявленной зоне оттаивания (см. рис. 3) нижние концы буронабивных свай должны достигать глубины более 10–12 м. Однако наличие столь глубокой зоны сезонного оттаивания сделало возможным заменить буронабивные сваи на другие проектные решения по созданию фундаментов в пределах этой зоны.

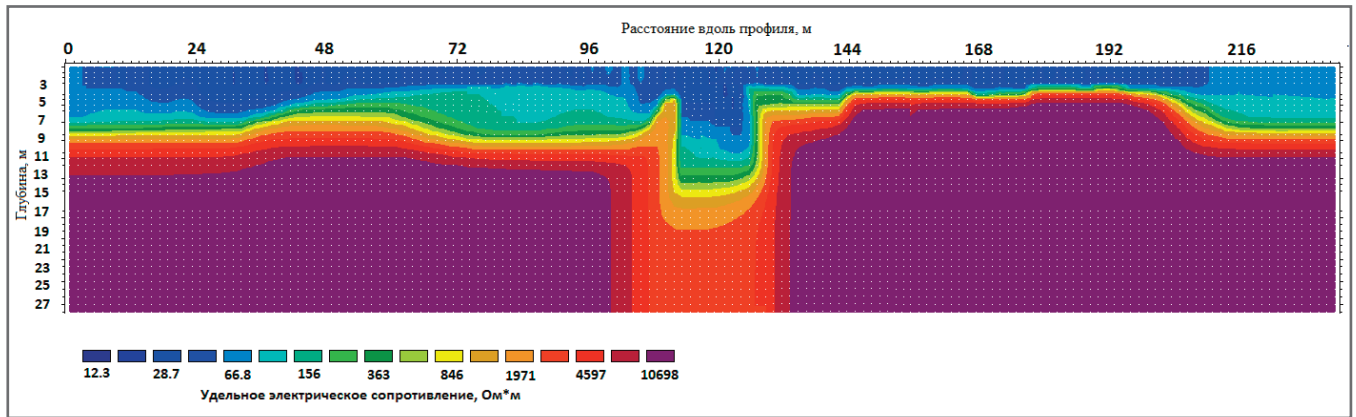


Рис. 4. Пример псевдо-геоэлектрического разреза с выявлением тектонической зоны

На рисунке 4 видно, что кровля скальных грунтов на глубине 5–9 м перекрыта глинистыми грунтами. В районе пикета ПК 120 (120 м) ярко выражен карман глинистых грунтов, достигающий глубины 12 м. Соответствующая вертикальная структура, расположенная в скальных породах под указанным карманом, связана с зоной повышенной трещиноватости и дробления (что было подтверждено буровыми работами), что, в свою очередь,

связано с проявлениями тектонических процессов. Выявление этой тектонической зоны послужило основанием для переноса строительства проектируемых зданий и сооружений за ее пределы.

#### Заключение ►

Автор надеется, что лишний раз привлеч внимание инженеров-геологов, занимающихся инженерными изысканиями для строительства на территориях

распространения многолетнемерзлых грунтов, к важности и полезности использования вертикального электрического зондирования и электротомографии для получения геоэлектрических разрезов, на основе которых (при подтверждении данными бурения в спорных местах) легко получить достаточно достоверные двумерные инженерно-геологические разрезы в пределах таких территорий, а также соответствующие объемные картины. **и**

#### Список литературы ►

1. Иванов А.А., Новиков П.В., Новиков К.В. Электроразведка. М.: Изд-во РГГУ, 2019.
2. Электроразведка. М.: Изд-во МГУ, 2013.
3. Зыков Ю.Д. Геофизические методы исследования криолитозоны. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2007, 272 с.
4. Макулов В.Б. Вертикальное электрическое зондирование при решении геологических задач // Символ науки. 2016. № 8.
5. Марченко М.Н. Вертикальное электрическое зондирование. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2013.
6. Балков Е. В., Панин Г. Л., Манштейн Ю. А., Манштейн А. К., Белобородов В. А. Электротомография: аппаратура, методика и опыт применения // Геофизика. 2012. № 6. С. 54–63.

#### References ►

1. Ivanov A.A., Novikov P.V., Novikov K.V. Elektrorazvedka [Electrical Prospecting]. M.: Izd-vo RGGU, 2019 (in Rus.).
2. Elektrorazvedka [Electrical Prospecting]. M.: Izd-vo Mosk. un-ta, 2013 (in Rus.).
3. Zykov Yu.D. Geofizicheskiye metody issledovaniya kriolitozony [Geophysical methods for studying permafrost zone]. M.: Izd-vo Mosk. un-ta, 2007, 272 s. (in Rus.).
4. Makulov V.B. Vertikal'noye ehlektricheskoye zondirovaniye pri reshenii geologicheskikh zadach [Vertical electrical sounding for solving geological problems] // Simvol nauki. 2016. № 8 (in Rus.).
5. Marchenko M.N. Vertikal'noye ehlektricheskoye zondirovaniye [Vertical Electrical Sounding]. M.: Izd-vo Mosk. un-ta, 2013 (in Rus.).
6. Balkov E.V., Panin G.L., Manshtein Yu.A., Manshtein A.K., Beloborodov V.A. Elektrotomografiya: apparatura, metodika i opyt primeneniya [Electrical tomography: equipment, methods and application experience] // Geofizika. 2012. № 6. S. 54–63 (in Rus.).