УДК 550.837.31

А.В.ПОЛИЦИНА, *начальник отдела обработки*, *policina@yandex.ru*,
И.С.КОТИН, *ведущий геофизик*, *kotinis@gmail.com*,
Д.В.СТЕПАНОВ, *геофизик*, *ker0@yandex.ru*,
М.П.КАШКЕВИЧ, *канд. геол.-минерал. наук*, *главный геофизик*, *kashmar1972@mail.ru*,
ООО «ГеофизПоиск», *Санкт-Петербург*
А.В.ГАЛЫШЕВА, *магистрант*, *galyshann@gmail.com,*
Санкт-Петербургский государственный университет

A.V.POLICINA, *chief of processing department*, *policina@yandex.ru*,
I.S.KOTIN, *leading geophysicist*, *kotinis@gmail.com*,
D.V.STEPANOV, *geophysicist*, *ker0@yandex.ru*,
M.P.KASHKEVICH, *PhD in geol. & min. sc.*, *chief geophysicist*, *kashmar1972@mail.ru*,
Ltd «GeophysPoisk», *Saint Petersburg*
A.V.GALYSHEVA, *student*, *galyshann@gmail.com*,
Saint Petersburg State University

НАЗЕМНАЯ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИЯ ПРИ ОКОНТУРИВАНИИ ТАЛИКОВЫХ ЗОН (п-ов ТАЙМЫР)

Изложена технология и результаты электроразведочных работ методом сопротивления в томографическом варианте в условиях распространения многолетней мерзлоты на п-ове Таймыр. По значениям удельного электрического сопротивления выявлены и оконтурены зоны многолетнемерзлых пород, «вялой» мерзлоты и талых грунтов. Предложена методика интерпретации с использованием пространственного градиента удельного электрического сопротивления для расчленения разреза по литологическому составу. Установлено, что зоны высокого градиента удельного электрического сопротивления соответствуют суглинкам разной степени мерзлости, а положение областей низкого градиента коррелируют с распространением песков, от многолетнемерзлых до талых.

***Ключевые слова*:** инженерная геофизика, многолетнемерзлые породы, талые грунты, электротомография, пространственный градиент.

SURFACE ELECTRICAL TOMOGRAPHY FOR TALIKS MAPPING (TAIMYR PENINSULA)

The technique and results of electrical explorations using electrical tomography procedure in permafrost on the Taimyr Peninsula are presented. The zones of permafrost, «sluggish» frozen zones and thawed soils (talik) are revealed and identified based on the values of resistivity. The authors suggest the method of interpretation with the help of the electrical resistivity spatial gradient for the identification of sediments in the cross-section. It was found that the areas with high-gradient of resistivity correspond to the frozen loam, and the areas of low gradient coincide with the sand layers in the permafrost.

***Key words*:** engineering geophysics, permafrost, thawed soils, method of electrical tomography, the spatial gradient.

Горные породы, длительное время (от нескольких лет до многих тысячелетий) находящиеся при температуре ниже 0° С и сцементированные замерзшей в них влагой, получили название многолетней мерзлоты. Область распространения многолетней мерзлоты в России около 11 млн км^2, что составляет почти 65 % территории.

Скопления воды в многолетнемерзлых породах образуют линзы, клинья, прослои и прожилки льда. Содержание льда в многолетнемерзлых породах может быть различным: от нескольких процентов до 90 % общего объема породы. Особенно много ледяных включений содержится в песчано-глинистых отложениях крайних северных районов Средней и Северо-Восточной Сибири (в среднем от 40-50 до 60-70 %), отличающихся наиболее низкой постоянной температурой грунта. По характеру распространения выделяется три типа мерзлоты: 1) сплошная; 2) с островами талых грунтов; 3) островная. Протаивание ледяных образований, заключенных в толщах пород, обычно приводит к просадкам, возникновению воронок, округлых впадин и подобным формам земной поверхности (термокарст) [1].

Изучение специфики многолетней мерзлоты имеет большое практическое значение в строительстве, различных отраслях промышленности и народного хозяйства. При строительстве инженерных сооружений, железных и шоссейных дорог, прокладке трубопроводов и т.п. необходимо учитывать возможность пучения и просадок грунтов, сползания оттаивающих грунтов на склонах (солифлюкция) и образования наледей на дорогах [4].

Наличие мерзлых пород в геологическом разрезе и большая изменчивость их свойств затрудненяет выполнение геофизических работ (специфические условия заземления электродов, экранирующее влияние и т.п.), особенно при интерпретации данных таких геофизических методов, как сейсморазведка, электроразведка. Физические свойства мерзлых пород весьма специфичны и зависят от большого количества факторов: температуры промерзания, влагонасыщенности, процентного соотношения минеральной и ледяной матрицы, количества незамерзшей воды и т.д. Наиболее сложные криогенные преобразования имеют место в песчано-глинистых промерзающих и оттаивающих породах, причем установлено, что самыми «чувствительными» к криогенным превращениям являются электрические и упругие свойства мерзлых пород.

Рассмотрим некоторые особенности электроразведочных работ в условиях распространения многолетней мерзлоты на конкретном примере. На п-ове Таймыр на линии пересечения газопровода «Пеляткинское газоконденсатное месторождение – г. Дудинка» с р.Большая Хета в период с 5 сентября по 15 октября 2010 г. инженерно-геофизическим предприятием ООО «ГеофизПоиск» были выполнены полевые геофизические исследования. Основной целью этих работ являлось выявление зон образования таликов и определение их геометрии по линиям геофизических профилей до глубины 14 м с учетом данных бурения, а также уточнение литологических границ песчано-глинистых отложений. Для решения поставленных задач был выбран один из методов наземной электроразведки – метод электротомографии. Применялась трехэлектродная электроразведочная установка с выносом одного из питающих электродов на «бесконечность».

Для выполнения работ методом электротомографии использовалась серийная цифровая электроразведочная аппаратура «АСТРА – МЭРИ-24» с коммутатором электродов приемной линии COM-64 (НПП «Северо-Запад», г. Москва). Применялась 16-электродная герметичная электроразведочная коса, позволяющая при незначительных изменениях методики выполнять работы как на воде, так и на поверхности земли (ООО «ГеофизПоиск», г. Санкт-Петербург). Для обработки и интерпретации данных электротомографии использовался пакет компьютерных программ ZondProtocol и ZondRes2D [5].

В результате совместной интерпретации полученных электроразведочных данных и данных бурения были построены геоэлектрические разрезы с границами пород разной степени мерзлости (рис.1).

На фоне мерзлых пород, характеризующихся удельным электрическим сопротивлением (УЭС) от 400 Ом·м и выше, уверенно выделяются: а) таликовые зоны (УЭС < 100 Ом·м); б) зоны «вялой» мерзлоты (УЭС < 350 Ом·м), а также области локальных образований мерзлых грунтов в талых и пластично-мерзлых грунтах.

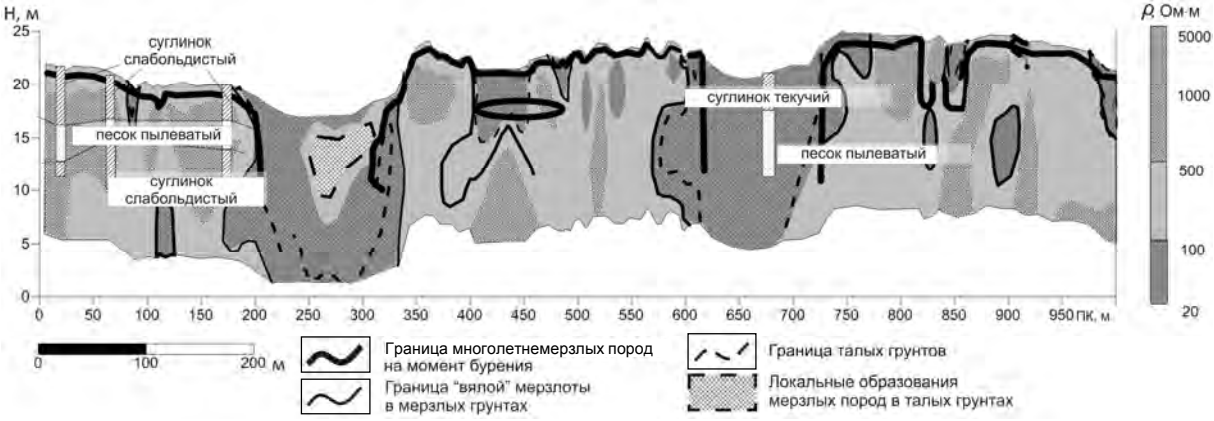


Рис.1. Геоэлектрический разрез с границами пород разной степени мерзлости

В результате сопоставления данных бурения о составе пород с геоэлектрическим разрезом (рис.1) становится понятно, что, основываясь только на распределении удельных электрических сопротивлений грунтов, провести детальное разделение толщи терригенных осадков по литологическому составу весьма затруднительно. Это объясняется тем, что на электрические свойства пород в условиях многолетней мерзлоты влияет, прежде всего, соотношение жидкой и кристаллической фаз воды в минеральной матрице. Свойства самой минеральной матрицы – состав и размер зерен, отходят на второй план.

Исходя из опыта решения подобных инженерно-геологических задач в малоглубинной сейсморазведке, мы решили по аналогии рассчитать и проанализировать пространственный градиент УЭС в пределах изучаемого разреза. При построении геоэлектрического разреза инверсия выполнялась по сетке $dx = 2{,}5$ м, $dy = 0{,}8$ м для первого слоя, вертикальный размер ячейки с глубиной последовательно увеличивался до $dy = 3$ м для последнего 14-го слоя. Далее полученный массив данных (распределение УЭС с глубиной) пересчитывался триангуляционно с линейной интерполяцией в сетку с размером ячейки 1×1 м (рис.2). Именно ячейка такого размера использовалась при расчете градиента, выполненного по формуле

$$\left|\rho_{\text{grad}}\right| = \sqrt{\left(\frac{\lg\rho_{x_2} - \lg\rho_{x_1}}{2\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{\lg\rho_{y_2} - \lg\rho_{y_1}}{2\Delta y}\right)^2},$$

где $(\lg\rho_{x_2} - \lg\rho_{x_1})$ – разница значений логарифма сопротивления по горизонтали в точках x_2 и x_1, $(\lg\rho_{y_2} - \lg\rho_{y_1})$ – разница значений логарифма сопротивления по вертикали в точках y_2 и y_1; Δx и Δy – расстояние между центрами элементарных ячеек.

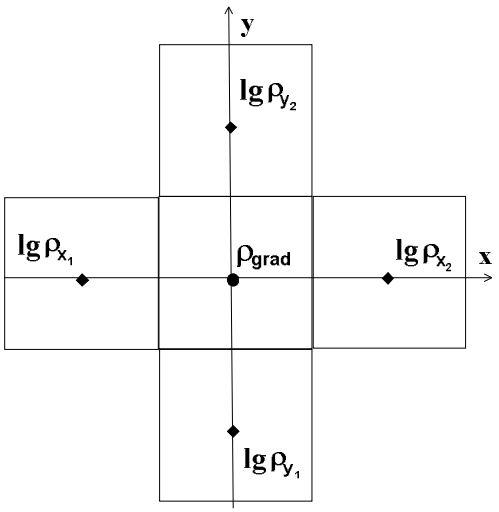


Рис.2. К расчету пространственного градиента УЭС

На разрезе отчетливо выделились области высоких и низких значений градиента (рис.3).

В результате совместной интерпретации данных бурения и данных о распределении градиента УЭС стало очевидно, что высокоградиентные зоны соответствуют мерзлым суглинистым отложениям, а низкоградиентные, в свою очередь, – песчанистым. Разная степень гетерогенности электрических свойств в суглинках и песках может быть связана с целым рядом причин:

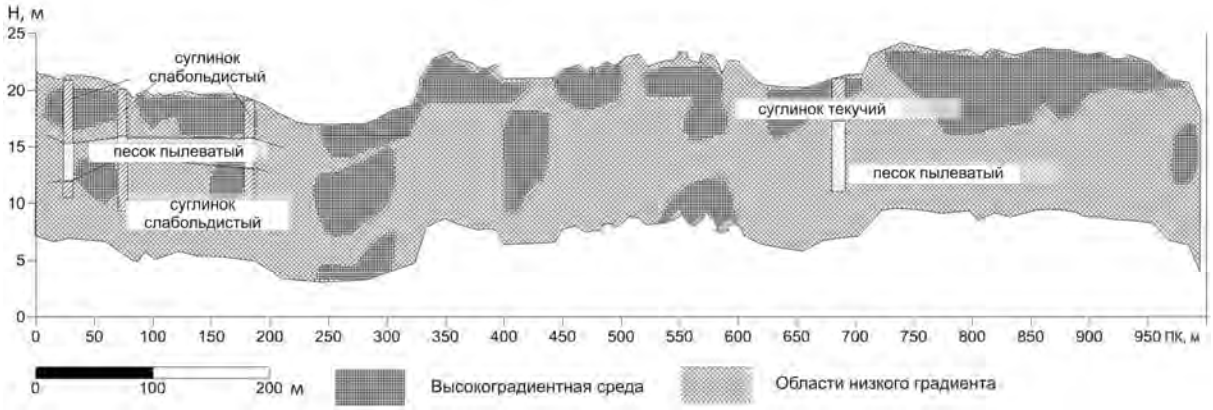


Рис.3. Разрез градиента УЭС

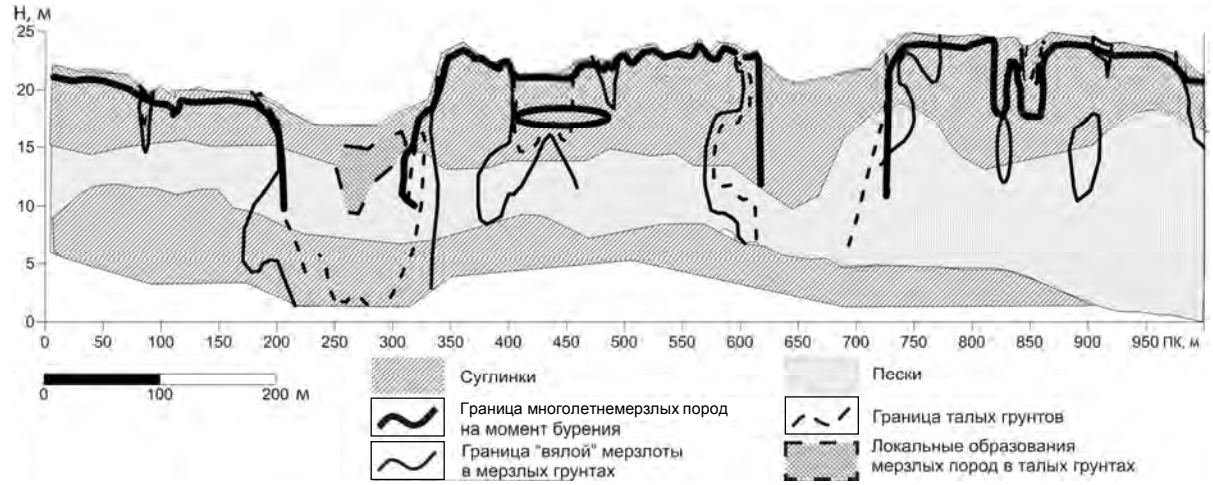


Рис.4. Сводный геолого-геофизический разрез с уточненными литологическими границами

различия во влагонасыщенности песков и суглинков, различие в температурах промерзания, структурно-текстурные особенности песков и суглинков. Так, при промерзании водонасыщенных песков возникает массивная криогенная текстура, лед распределен в объеме грунта равномерно, ледяные шлиры отсутствуют, льдовыделение реализуется обычно в виде порового льда-цемента. Незамерзшая поровая вода также распределена равномерно [2, 3]. Слоистая криоструктура более характерна для глинистых отложений, в результате чего возникают ледяные шлиры в виде параллельных слоев и линз.

Таким образом, изменения электрических свойств мерзлых грунтов в первую очередь зависят от степени дисперсности частиц минеральной матрицы, что позволяет использовать градиент УЭС для выделения типов пространственных криогенных структур – с однородным распределением ледяной матрицы и анизотропным. Первый, на наш взгляд, характерен для песчаных отложений, второй – для суглинков и глин.

Следует обратить внимание, что методика разделения пород по составу с использованием градиента УЭС применима именно для мерзлых пород, так как в зонах оттайки суглинки не демонстрируют резких изменений сопротивлений в пределах пласта, и интерпретацию здесь надо проводить по обычной схеме, опираясь на разницу в значениях самих удельных сопротивлений для песков и суглинков.

В результате комплексной интерпретации был построен геолого-геофизический разрез с уточненными литологическими границами и нанесенными границами таликовых зон и зон распространения «вялой» мерзлоты (рис.4).

Выводы. На примере работ на п-ове Таймыр показана эффективность электроразведки методом сопротивления в модификации электротомографии для решения инженерно-геологических задач. Полученное распределение значений УЭС позволило определить границы талых грунтов и «вялой» мерзлоты внутри многолетнемерзлых пород. Опробована методика интерпретации данных с использованием пространственного градиента УЭС с целью расчленения разреза по литологическому составу. Показано, что мерзлые пески, представляющие собой сплошную гетерогенную поликристаллическую среду, отражаются на разрезах в виде зон низкого градиента УЭС, в то время как анизотропия пространственной криогенной структуры мерзлых суглинков и глин приводит к резким изменениям электрических свойств в пределах слоя и, следовательно, к появлению на разрезе зон высокого градиента значений удельного электрического сопротивления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Геокриология СССР. Европейская территория СССР / Под ред. Э.Д. Ершова. М., 1980. 357 с.

2. *Федюкин И.В.* Параметры распространения электромагнитных волн в мерзлых грунтах / И.В.Федюкин, А.Д.Фролов // Геофизические исследования криолитозоны. 1995. Вып. 1. С. 95-111.

3. *Фролов А.Д.* О влиянии фазового состава на электрические и механические свойства льдов из растворов // Геофизические исследования криолитозоны. 2000. Вып. 3. С. 47-51.

4. *Фролов А.Д.* Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов. Пущино, 1998. 546 с.

5. *Dahlin T.* 2D resistivity surveying for environmental and engineering applications // First Break. 1996. 14. P. 275-284.

REFERENCES

1. Permafrost study of the USSR. European territory of the USSR / Editor E.D. Ershov. Moscow, 1980. 357 p.

2. *Fedukin I.V.*, *Frolov A.D.* The parameters of electromagnetic wave propagation in frozen soil // Geophysical investigations of permafrost. 2000. Iss 1. P. 95-111.

3. *Frolov A.D.* Influence of phase composition on the electrical and mechanical properties of ice from solutions / Geophysical investigations of permafrost. 2000. Iss.3. P. 47-51.

4. *Frolov A.D.* Electric and Elastic Properties of Frozen Earth Materials. Pushchino, 1998. 546 p.

5. *Dahlin T.* 2D resistivity surveying for environmental and engineering applications // First Break. 1996. 14. P. 275-284.