

УДК 631.48

**ВЕРТИКАЛЬНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ПОЧВ И  
МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД ВОСТОЧНОГО МАКРОСКЛОНА ПОЛЯРНОГО  
УРАЛА И ПОЧВ ОКРЕСТНОСТЕЙ РЕКИ ЕРКУТА****И. И. Алексеев, Е. В. Абакумов, Г. А. Шамилишвили***Санкт-Петербургский государственный университет**199178, Санкт-Петербург, 16-я линия ВО, 29**E-mail: alekseevivan95@gmail.com**Поступила в редакцию 08 августа 2016 г., принята к публикации 31 августа 2016 г.*

В ходе исследований было проведено вертикальное электрофизическое зондирование почвенно-мерзлотной толщи севера в пределах ключевых участков на Полярном Урале, в предгорьях Полярного Урала и в окрестностях реки Еркута (полуостров Ямал). Вертикальное электрофизическое зондирование почвенно-мерзлотных толщ проводилось с помощью портативного прибора LandMapper. Величины кажущегося электрического сопротивления на границе деятельного слоя и слоя многолетнемерзлых пород, как правило, резко изменяются. В пределах ключевых участков исследования были обнаружены глееземы, торфяно-глееземы, стратоземы, альфегумусовые почвы. Было выявлено несколько тенденций в вертикальном ходе изменения величин удельного электрического сопротивления в почвенных профилях. Основная тенденция заключается в монотонном нарастании величины  $R_a$  с глубиной. При этом на контакте многолетнемерзлых пород и деятельного слоя происходит резкое повышение величин кажущегося сопротивления с сотен до тысяч и десятков тысяч Ом\*м. При этом было установлено, что мощность деятельного слоя в почвах на разных участках исследования является различной. Также было определено, что слой многолетнемерзлых пород характеризуется более высокими по сравнению с почвенной толщей значениями электрического сопротивления. Методы вертикального электрического зондирования позволили установить электрофизические свойства почвенно-мерзлотных толщ без механического нарушения почвенного покрова. Данные вертикального электрофизического профилирования сравнивались с данными о мощности активного слоя, полученными в ходе использования стального щупа в полевых условиях. Полученные результаты хорошо совпадают с полевыми результатами определения границы деятельного слоя и многолетнемерзлых пород.

**Ключевые слова:** вертикальное электрическое зондирование, деятельный слой, многолетнемерзлые породы, почвы, тундра.

**VERTICAL ELECTRICAL RESISTIVITY SOUNDING OF SOILS AND PERMAFROST  
OF THE EASTERN MACROSLOPE OF THE POLAR URALS AND SURROUNDINGS OF  
RIVER ERKUTA****I. I. Alekseev, E. V. Abakumov, G. A. Shamilishvili***Saint Petersburg State University**29, 16th line of Vasilievsky island, Saint Petersburg, 199178**E-mail: alekseevivan95@gmail.com*

The vertical electrical resistivity sounding (VERS) of soil-permafrost strata was studied during the field work within the eastern macroslope of the Polar Urals, foothills of the Polar Urals, surroundings of river Erkuta at several key plots (Yamal peninsula). A portable device LandMapper was used for the measurements. Apparent electrical resistivity values on the soil-permafrost strata usually change rapidly. Histic Gleysols, Gleysols, Stratozems, Spodosols have been investigated within the key plots. Several trends were distinguished in the profile distribution of the electrical resistivity values. The main trend is monotonous increasing of  $R_a$  value with depth. It is necessary to underline that values of apparent electrical resistivity increase rapidly on the border of active layer with permafrost layer (from hundreds to thousands Ohm\*m). It was shown that permafrost layer (in comparison with soil strata) is characterized by higher values of apparent electrical resistivity ( $R_a$ ). Vertical electrical resistivity sounding method helps to perform measurements of electrophysical properties of soil-permafrost strata without any mechanical disturbances of soil cover. The results have been also compared with the data obtained in the field using the steel bar. The results obtained by the two methods on the active layer thickness and permafrost layer depth were clearly corresponding.

**Key words:** vertical electrical resistivity sounding, active layer, permafrost, soils, tundra.

## ВВЕДЕНИЕ

Методы полевой электрофизики в российском почвоведении появились во многом благодаря исследованиям профессора А. И. Позднякова, положившего начало работам по полевой электрофизике почв, которые, в свою очередь, опирались на фундаментальное толкование основных почвенно-электрофизических закономерностей. А. И. Поздняковым с соавторами были продемонстрированы преимущества методов полевой электрофизики по сравнению с традиционными морфологическими и аналитическими методами исследования засоления (Fadele et al., 2013), подтопления (Smernikov et al., 2008), агрогенного освоения (Поздняков, Елисеев, 2012), осушения и других видов мелиорации почв (Поздняков, Елисеев, 2012). Были установлены фундаментальные связи между электрическим сопротивлением почв, их гумусностью, гранулометрическим составом и емкостью катионного обмена.

В связи с этим весьма важной представляется проблема разработки быстрых методов определения глубины деятельного слоя, фактической глубины оттаивания почвы в данный период времени и глубины верхнего слоя многолетнемерзлых пород. Геофизические методы имеют ряд следующих преимуществ перед традиционными механическими: отсутствие механического нарушения почвы, высокая чувствительность и точность метода, быстрота и воспроизводимость (Nauck et al., 2003; Scott et al., 1990).

Криогенные (мерзлотные) почвы представляют особый интерес в плане изучения электрофизических свойств. Если по отношению к сезонно-промерзающим почвам зонального ряда имеет смысл обсуждать корреляцию между электрическим сопротивлением, содержанием гумуса, гранулометрическим составом и прочими характеристиками почв (Поздняков, 2013; Pozdnyakov et al., 2006), то в случае с мерзлотными почвами различия в величинах электрического сопротивления деятельного слоя и многолетнемерзлых пород настолько велики, что указанные выше факторы становятся ничтожно малыми. На основании

ранее опубликованных многочисленных данных (Поздняков, 2008; Gibas et al., 2005; Nauck et al., 2003; Michels et al., 2013; Smernikov et al., 2008; Vanhala et al., 2009) можно сделать вывод, что величины сопротивления почв порядка 1000–5000 Ом\*м характерны для мерзлотных слоев, в то время как для немерзлых глин и песков они на несколько порядков меньше.

Таксономическое и функциональное разнообразие почв севера Западной Сибири было изучено достаточно подробно (Алексеев и др., 2015; Алексеев и др., 2016; Власов и др., 2014; Томашунас, Абакумов, 2014; Ejarque, Abakumov, 2015). Однако следует признать, что указанных исследований недостаточно для оценки функционального состояния почв данного региона. Вопросы классификационного положения многих почв севера Западной Сибири до сих пор являются нерешенными.

Цель настоящей работы заключалась в изучении вертикальной стратификации почвенно-мерзлотных толщ восточного макросклона Полярного Урала, предгорий Полярного Урала и окрестностей реки Еркута (полуостров Ямал).

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводились в ходе экспедиционных работ в Ямало-Ненецком автономном округе в 2016 г. Район исследования располагается на территории Ямало-Ненецкого автономного округа и включает в себя несколько участков полевых работ (рис. 1). Во всех случаях закладывались почвенные разрезы до верхнего слоя многолетнемерзлых пород. Поскольку исследования проводились в августе, следует полагать, что глубина оттаивания в указанный период времени была максимальной. Глубина активного слоя контролировалась также при помощи стального щупа. Рядом с разрезом проводились измерения кажущегося электрического сопротивления почвенно-мерзлотной толщи по методике, описанной А. И. Поздняковым с соавторами (1996). Были исследованы почвы восточного макросклона Полярного Урала в районе р. Восточный Нырдовоменшор, р. Собь, р. Немур и оз. Большое Щучье, предгорий Полярного Урала, а также в районе р. Еркута (рис. 1).



Рис. 1. Район исследований:

- 1 – окрестности р. Восточный Нырдовоменшор и р. Немур;
- 2 – окрестности озера Большое Щучье;
- 3 – окрестности р. Еркута

В районе реки Еркута распространены расчлененные дренированные ландшафты с тундровой растительностью, переувлажненные плоские лайды, преобладают суглинистые почвообразующие породы. При морфологическом описании почв было установлено, что они относятся преимущественно к глеезам (O-Gox-G-ММП), торфяно-глеезам (O-G-ММП) и стратоземам серогумусовым (O-RY-C<sup>~</sup>-D). Во всех почвах встречается суглинистый надмерзлотно-глеевый горизонт на контакте с мерзлотным слоем. Изученные почвы в общем случае отличаются друг от друга преимущественно глубиной залегания слоя многолетнемерзлых пород. Общим для них являются сочетание надмерзлотно-глеевых и поверхностно-глеевых процессов в условиях слаборасчлененного рельефа и доминирование тяжелых по гранулометрическому составу почвообразующих пород.

В районах Полярного Урала и предгорий Полярного Урала были изучены следующие почвы: глееземы криотурбированные (O-Gox-CG), торфяно-подзолы иллювиально-железистые глееватые (OT-AN-E-VHF-Cf,g-Cg), глееземы перегнойно-гумусовые окисленно-глеевые (OT-H-G1ox-G2ox-Cg). Доминируют суглинистые и супесчаные почвообразующие породы. В большинстве

почв присутствует надмерзлотно-глеевый горизонт на контакте с мерзлотным слоем. Растительный покров представлен преимущественно кустарничково-моховой и кустарничково-мохово-лишайниковой тундрой, а также лиственничным редколесьем.

Измерения кажущегося электрического сопротивления почвенных и грунтовых толщ проводились при помощи портативного прибора Landmapper при разносах электрода MN 10 и при разносах электрода АВ/2 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 150, 200, 300, 400, 500 см. Это позволило установить величины кажущегося электрического сопротивления почв на соответствующих глубинах (рис. 2). Результаты полевых измерений пересчитывались согласно методике А. И. Позднякова в соответствии с геометрическими коэффициентами для разных глубин и разносов электродов АВ и MN (Поздняков, Елисеев, 2012).

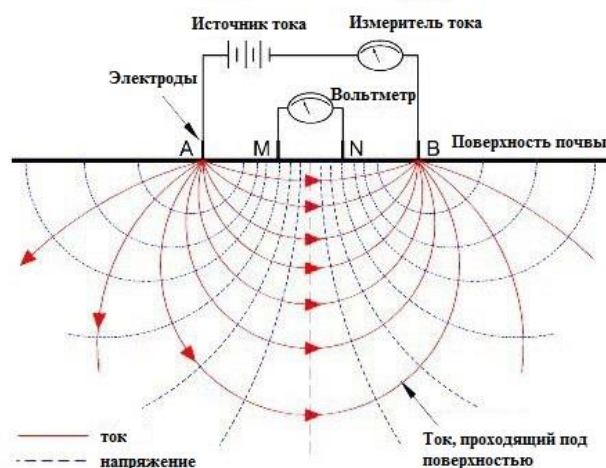


Рис. 2. Принципиальная схема вертикального электрического зондирования

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе полевых исследований выполнялись измерения электрофизических свойств почв, почвенно-мерзлотных толщ и грунтов. Измерения распространялись на глубину до 3–5 метров. Полученные результаты полевых почвенно-электрофизических исследований в дальнейшем обрабатывались в виде одномерной модели (оси: сопротивление-глубина). Проводилась предварительная интерпретация полученных данных (рис. 3).

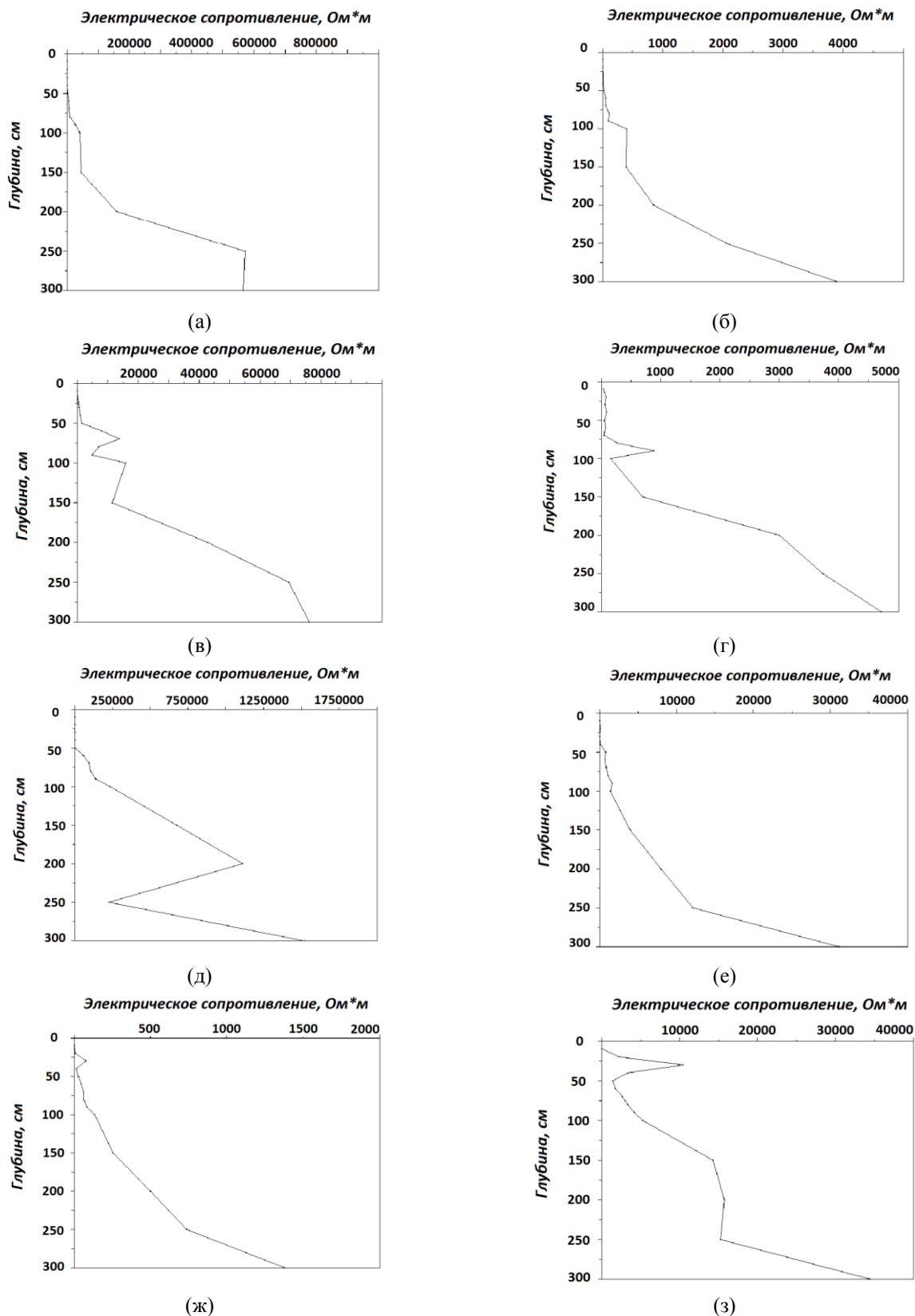


Рис. 3. Удельное электрическое сопротивление в профилях торфяно-глеезема перегнойно-торфяного (а), глеезема перегнойно-гумусового окисленно-глеевого (б), торфяной зутрофной почвы (в), торфяно-глеезема пергноино-гумусового (г), подзола иллювиально-железистого супесчаного (д), торфяно-глеезема потечногогумусового (е), стратозема серогумусового (ж), торфяно-глеезема окисленно-глеевого (з).

Ниже приведена предварительная интерпретация полученных данных об удельном электрическом сопротивлении почвенно-мерзлотных толщ ключевых участков наблюдения.

Было выявлено несколько тенденций в вертикальном ходе изменения величин удельного электрического сопротивления в почвенных профилях. Главная тенденция заключается в монотонном нарастании величины  $R_a$  с глубиной. При этом на контакте многолетнемерзлых пород и почвенного деятельного слоя происходит резкое повышение величин кажущегося сопротивления с сотен до тысяч и десятков тысяч Ом\*м. Вертикальные профили изменения величин удельного электрического сопротивления в целом характеризуются постепенным увеличением показателей  $R_a$  с глубиной и достигают максимальных значений в слое многолетнемерзлых пород.

Для вертикальных профилей изменения величин удельного электрического сопротивления в почвах районов р. Восточный Нырдовоменшор и р. Немур характерно, с одной стороны, равномерное повышение величин  $R_a$  без резких скачков (рис. 3а, б), а с другой – неоднородность в некоторых профилях электрофизических свойств и связанных с ними скачков (зачастую сильных) значений  $R_a$  (рис. 3 в, г). В последнем случае вертикальная неоднородность связана также с литологической неоднородностью толщи, поскольку относительно рыхлый элювий массивно-кристаллических пород сменяется слоем массивно-кристаллических пород. Почвенные профили в районе озера Большое Щучье отличаются сложным ходом изменения значений удельного электрического сопротивления (рис. 3 д) и резкой сменой величин кажущегося электрического сопротивления на глубине около 90–110 см, что свидетельствует об относительной вертикальной неоднородности почвенного покрова на данном ключевом участке.

Почвы, изученные в районе р. Еркута, в основном отличаются простым ходом и наибольшим изменением величин удельного

электрического сопротивления (рис. 3 е, ж). Более сложным является ход изменения величин  $R_a$  в профиле торфяно-глеезема окисленно-глеевого (рис. 3 з), характеризующийся наличием пика данной величины на глубине 30 см и ее постепенным повышением внутри толщи многолетнемерзлых пород. Это может быть обусловлено местными осложнениями микрорельефа, а также неоднородностью со сменой границ надмерзлотно-глеевого горизонта.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе данного исследования было установлено, что для почвенно-мерзлотной толщи характерно резкое увеличение величин кажущегося электрического сопротивления с глубиной, что коррелирует с появлением слоя многолетнемерзлых пород. Случаи, когда вертикальный ход изменения величин удельного электрического сопротивления отличается более сложной картиной, обусловлены характером микро- и мезорельефа, сменой растительности, а также почвообразующих пород.

Установлено, что величины кажущегося электрического сопротивления хорошо согласуются с параметрами литологической организации почвенно-мерзлотной толщи и могут быть признаны в качестве диагностических критериев выделения почвенных горизонтов.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Настоящая работа посвящена памяти профессора А. И. Позднякова (кафедра физики почв МГУ), основателя электрофизики почв в России, который ушел из жизни 15 августа 2015 года. Он внес огромный вклад в развитие данной научной дисциплины, а также помог авторам статьи организовать почвенно-электрофизические исследования в Арктике и Антарктике.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 16-34-60010 РФФИ мол-а-дк) и гранта Президента РФ для молодых докторов наук № МД-3615.2015.4, МЭЦ «Арктика» при правительстве Ямало-Ненецкого автономного округа.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев И. И., Абакумов Е. В., Томашунас В. М. 2015. Катенарная дифференциация почв предгорий Полярного Урала на примере участка в районе р. Халяталбей (приток р. Щучья) // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. Т. 24. № 4. С. 146–149.
- Алексеев И. И., Абакумов Е. В., Шамилишвили Г. А., Лодыгин Е. Д. 2016. Содержание тяжелых металлов и углеводов в почвах населенных пунктов Ямало-Ненецкого автономного округа // Гигиена и санитария. Вып. 6 (в печати).
- Власов Д. Ю., Абакумов Е. В., Томашунас В. М., Крыленков В. А., Зеленская М. С. 2014. Микробиота почв и антропогенных субстратов полуострова Ямал // Гигиена и санитария. № 5. С. 49–51.
- Поздняков А. И., Позднякова Л. А., Позднякова А. Д. 1996. Стационарные электрические поля в почвах // М: КМК Scientific Press LTD. 360 с.
- Поздняков А. И. 2008. Электрические параметры почв и почвообразование // Почвоведение. № 10. С. 1188–1197.
- Поздняков А. И., Елисеев П. И. 2012. Зависимости удельного электрического сопротивления от некоторых свойств антропогенно-преобразованных легких почв агроландшафтов гумидной зоны // Вестник ОГУ. № 10 (146). С. 98–104.
- Поздняков А. И. 2013. Биоэлектрические потенциалы в системе почва-растение // Почвоведение. № 7. С. 813–821.
- Томашунас В. М., Абакумов Е. В. 2014. Содержание тяжелых металлов в почвах полуострова Ямал и острова Белый // Гигиена и санитария. № 6. С. 26-31.
- Abakumov E. V., Parnikoza I. Yu. 2015. Determination of the soil-permafrost border in two maritime Antarctic regions on the base of electric sounding data // Ukrainian Antarctic journal. № 14, pp. 138–142.
- Ejarque E., Abakumov E. 2015. Stability and biodegradability of organic matter from Arctic soils of Western Siberia: insights from <sup>13</sup>C-NMR spectroscopy and elemental analysis // Solid Earth Discussions. 7(4):3021–3052.
- Fadele S. I., Sule P. O., Dewu B. B. M. 2013. The Use of Vertical Electrical Sounding (VES) for Groundwater Exploration around Nigerian College of Aviation Technology (NCAT), Zaria, Kaduna State, Nigeria // The Pacific Journal of Science and Technology. Vol. 1, № 1, pp. 549-555.
- Gibas J., Rachlewicz G., Szczucinski W. 2005. Application of DC resistivity soundings and geomorphological surveys in studies of modern Arctic glacier marginal zones, Petuniabukta, Spitsbergen // Polish Polar Research. Vol. 26, № 4, pp. 239-258.
- Hauck C., Muhl D.V., Maurer H. 2003. Using DC resistivity tomography to detect and characterize mountain permafrost // Geophys. Prospect. № 51. pp. 273–284.
- Michels Turu I. V., Ros Visus X. Geophysical survey carried out in the Hansbreen glacial front (Hornsund, SW Spitzberguen): Surface Nuclear Magnetic Resonance (SNMR), Magnetic susceptibility of rocks and Electrical Resistivity facies: Permafrost identification and subglacial aquifers // IV Congreso Ibérico de la I.P.A. Núria (Vall de Ribes, Pirineo oriental), junio 2013.
- Pozdnyakov A. I., Pozdnyakova L. A., Karpachevskii L. O. 2006. Relationship between Water Tension and Electrical Resistivity in Soils // Eurasian Soil Science. Vol. 39, Suppl. 1, pp. S78–S83.
- Scott W., Sellmann P., Hunter J. 1990. Geophysics in the study of permafrost, Geotechnical and Environmental Geophysics // Soc. of Expl. Geoph., Tulsa, pp. 355–384.
- Smernikov S. A., Pozdnyakov A. I., Shein E. V. 2008. Assessment of Soil Flooding in Cities by Electrophysical Methods // Eurasian Soil Science. Vol. 41, № 10, pp. 1059–1065.
- Vanhala H., Lintinen P., Ojala A. 2009. Electrical Resistivity Study of Permafrost on Ridnitšohkka Fell in Northwest Lapland, Finland // Geophysica. № 45(1–2), pp. 103–118.

