

# Исследование зависимости электропроводности песчано-глинистых пород от нагрузки и температуры в области фазового перехода поровой влаги

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2022-6-84-88>

## ВОРОНКОВ И.Н.

Магистр техн. наук,  
директор ТОО "GOLD-WAY",  
100026, г. Караганда, Республика Казахстан,  
e-mail: GoldWayLtd@yandex.kz

## МАЛАХОВ А.А.

Магистр техн. наук,  
главный инженер ТОО "GOLD-WAY",  
100026, г. Караганда, Республика Казахстан,  
e-mail: GoldWayLtd@yandex.kz

## ОЛЕНЮК С.П.

Канд. техн. наук,  
старший преподаватель  
кафедры «Маркшейдерское дело и геодезия»  
Карагандинского государственного  
технического университета,  
100027, г. Караганда, Республика Казахстан,  
e-mail: savml@mail.ru

## СИТНИКОВ Д.В.

Генеральный директор  
ТОО «Kazakhstan Coal (Казахмыс Коал)»,  
100015, г. Караганда, Республика Казахстан,  
e-mail: Denis.Sitnikov@kazakhstan.kz

## АБДИКАШЕВ Е.

Магистр техн. наук,  
технический директор  
ТОО «Kazakhstan Coal (Казахмыс Коал)»,  
100015, г. Караганда, Республика Казахстан

В работе представлен комплексный подход к вопросу исследования характера динамики физического состояния песчано-глинистых пород Борлинского каменноугольного месторождения при многофакторном изменении внешних условий. Универсальным показателем влияния внешних и внутренних факторов выбрана характеристика электропроводности пород – электрическое сопротивление. Многократные испытания песчано-глинистых пород при различных значениях внешних и внутренних факторов позволили вывести объединяющие их эмпирические зависимости и установить фактическую точку фазового перехода, отличную от нуля градусов. Полученные результаты могут быть использованы при выполнении геофизических исследований песчано-глинистых горных пород и разработке систем мониторинга изменения их состояния.

**Ключевые слова:** угольное месторождение, вмещающие породы, свойства горных пород, состояние породного массива, поровая влага, электропроводность грунта, испытательный стенд, фазовый переход.

**Для цитирования:** Исследование зависимости электропроводности песчано-глинистых пород от нагрузки и температуры в области фазового перехода поровой влаги / Воронков И.Н., Малахов А.А., Оленюк С.П. и др. // Уголь. 2022. № 6. С. 84-88. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-6-84-88.

## ВВЕДЕНИЕ

Исследование состояния свойств и состояния горных пород является важной задачей для различных отраслей промышленности, включая строительство и горное производство. При этом актуальность вопроса наблюдения за изменением состояния породного массива обусловлена зависимостью от него технологических, экономических и других параметров связанного с ним производства, что способствует развитию соответствующих методов наблюдения, мониторинга и исследования его состояния [1, 2, 3].

В частности, параметры карьерных откосов и технология обработки Борлинского каменноугольного месторождения, анализ пород которого представлен в данной работе, зависят от прочностных свойств обрабатываемого массива горных пород.

Изменение свойств, целостности и связанности пород во времени предполагает его исследование как динамического процесса, подверженного внешним и внутренним факторам.

### ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫХ ПОРОД ПРИ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДАХ ВНУТРИПОРОВОЙ ВЛАГИ

Существует множество факторов, влияющих на изменение свойств пород, слагающих исследуемый массив, среди которых отдельный интерес представляет изменение свойств наиболее подверженных этому песчано-глинистых пород при фазовых переходах внутрипоровой влаги.

Так, при исследованиях механики мерзлых грунтов [4] выявлено, что предел прочности на сжатие мерзлой глины при незначительных фазовых превращениях может измениться на величину свыше 50%. Сами мерзлые глины представляют собой сложную систему частиц, образующую: твердыми минеральными частицами, включениями льда, водой в связанном и жидком состояниях (рис. 1), парами и газами. Между этими составляющими имеется сложная взаимосвязь, зависящая от их свойств и внешних факторов.

К основным внутренним связям глин, находящихся в многофазовом состоянии, относят: молекулярные связи на контактах твердых минеральных частиц, зависящие от расстояния между частицами и площади контактов, обычно растущими с увеличением давления; льдоцементные связи, зависящие от множества факторов: температуры, льдистости, размеров и строения ледяных включений, их ориентации, содержания свободной воды и т.д.

Влияние внешней нагрузки на свойства данных пород обусловлено как увеличением содержания незамерзшей воды, так и возрастанием местного давления в точках контакта минеральных частиц, также имеют место перекристаллизация льда и изменение ориентировки его кристаллов.

Влияние температуры на свойства глин также имеет свои особенности, обусловленные их строением и составом. В отличие от свободной воды, имеющей при нормальном атмосферном давлении температуру замерзания  $0^{\circ}\text{C}$ , поровая вода, находящаяся у поверхности минеральных частиц под действием их силового поля (пленочная вода), будет в среднем иметь температуру замерзания от  $0$  до  $-2,5^{\circ}\text{C}$  и ниже.

Влияние данных факторов предполагает изменение не только физических, но и электрических свойств исследуемых пород за счет существенного влияния на число и подвижность свободных носителей электрического заряда. Таким образом, динамика переходных процессов может быть оценена по изменению электропроводности или электрического сопротивления пород.

Для этой цели авторами работы были разработаны специализированное устройство и программное обеспечение для лабораторных исследований комплексной зависимости электропроводности (электрического сопротивления) песчано-глинистых пород от температуры и внешней нагрузки.

Устройство представляет собой испытательный стенд, позволяющий выполнять комплексные исследования характера зависимости относительной электропроводности песчано-глинистых и дисперсных горных пород от их уплотнения и температуры за счет непрерывной регистрации данных параметров при поэтапном нагружении образцов пород в различных температурных режимах.

Испытательный стенд состоит из испытательной камеры, уплотняющего винтового механизма, и измерительной электроники (рис. 2). Испытательная камера образована кюветой с прямоугольным основанием 1, в рабочей области которой располагаются две дополнительные подвижные стенки 2 и 3, одна из которых соединяется с винтовым механизмом 4, регулирующим степень уплотнения породы. Вторая, подвижная, стенка передает нагрузку на тензометрический датчик веса 6 для регистрации степени уплотнения.

Также дополнительно в нее встроены датчик температуры 7. Обе стенки оснащены металлическими электродами 5 для пропускания электрического заряда и определения степени электропроводности породы в ее текущем состоянии.

При выполнении комплексных исследований образец породы подвергают постепенному нагружению шаговым поворотом ручки винтового механизма. Нагрузка передается на исследуемый объем породы, а через него на тензодатчик, который представляет собой мостовую схему из тензорезисторов, закрепленных на металлической основе специальной формы. Плечи моста расположены с разных сторон от линии деформации основания. Нагруженное основание деформируется, сжимая и растягивая тензорезисторы, сопротивление которых меняется про-

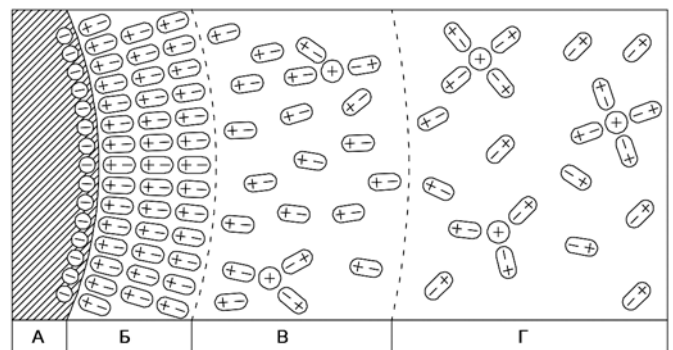


Рис. 1. Схема молекулярного связывания воды с поверхностью минеральной частицы: А – минеральная частица; Б – вода связанная; В – вода рыхлосвязанная; Г – вода свободная

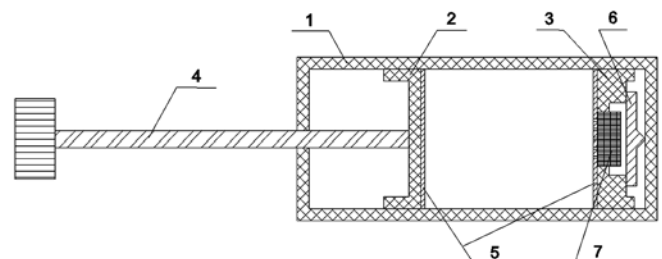


Рис. 2. Схема испытательного стенда для исследования электропроводности

порционально приложенной нагрузке, а мостовая схема их подключения обеспечивает соответствующее изменение напряжения, измеряемого 24-разрядным АЦП на базе модуля HX711. Электрическое сопротивление объема исследуемой породы между металлическими электродами регистрируется 16-разрядным АЦП ADS1115. Температура исследуемой среды измеряется цифровым датчиком повышенной точности.

Непрерывно получаемые данные через контроллер передаются в ПК для дальнейшей обработки в специализированной программе (рис. 3).

При выполнении исследований образец песчано-глинистой породы при естественной влажности помещался в плотно закрытую кювету устройства и многократно подвергался циклическим нагрузкам при охлаждении и постепенном нагревании от  $-10$  до  $+10^{\circ}\text{C}$ . Рабочий интервал температур составил от  $-7$  до  $+7^{\circ}\text{C}$ .

Нагрузка периодически менялась от 0,5 до 5 кгс по мере постепенного нагрева рабочей среды в процессе естественного теплообмена.



Рис. 3. Выполнение комплексных измерений сопротивления, нагрузки и температуры

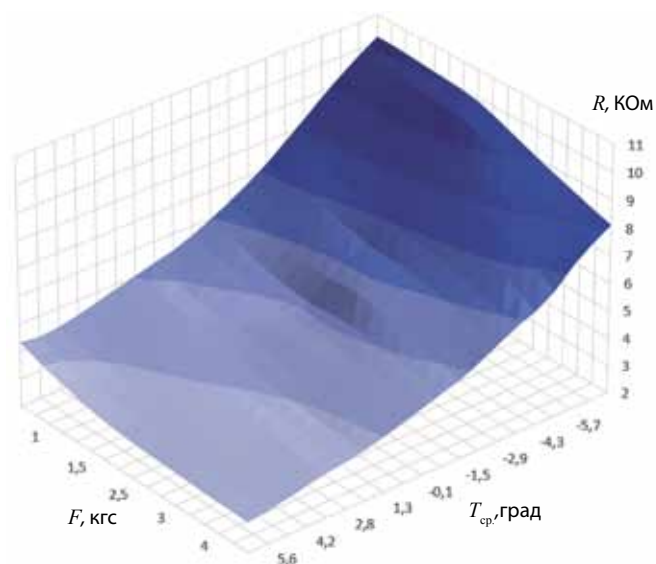


Рис. 4. Зависимость сопротивления породы от приложенной нагрузки и температуры

Таким образом был набран достаточный объем экспериментальных данных для формирования трехмерной зависимости сопротивления исследуемой породы от приложенной нагрузки и температуры (рис. 4), представленной функцией двух переменных  $R = U(F, T)$ .

Первичная статистическая обработка заключалась в усреднении смежных значений, передискретизации данных с заданным шагом для формирования равномерного избыточного распределения значений на всем интервале определения представленной функции.

Как видно из формы зависимости, она представлена поверхностью с небольшим перегибом и неравномерным наклоном в области до и после  $0^{\circ}$

Для детального анализа формы полученной зависимости она была сведена к наборам продольного и поперечного среза данных при постоянных значениях средних температур (рис. 5) и средних нагрузок (рис. 6).

Из представленных зависимостей следует, что при отрицательных температурах имеют место незначительные перегибы графиков, характеризующие как резкий спад электрического сопротивления породы при возрастании нагрузки, так и снижение влияния растущей нагрузки на изменение ее электропроводности. Это, вероятно, обусловлено влиянием льдистых включений, которые способны оказывать сопротивление уплотняющей нагрузке до превышения их предела прочности, а также, разрушаясь, могут перекрывать движение носителей электрического заряда, являясь к тому же диэлектриком. При этом различная температура определяет собственное соотношение количества воды в порах, находящейся в различных фазовых состояниях.

Таким образом, представленные данные говорят о процессе фазового перехода как о постепенном изменении состояния многофазной среды, где в малых пределах не происходит резкого скачка значения электропроводности.

Однако при этом следует отметить различия в характере зависимости сопротивления породы от температуры, расположенной по разные стороны от предполагаемой точки фазового перехода (см. рис. 6).

Как следует из представленных зависимостей (см. рис. 6), форма и наклон графиков на участке от  $-7$  до  $0^{\circ}\text{C}$  заметно круче, чем на участке от  $0$  до  $7^{\circ}\text{C}$ . Это говорит о том, что на данных участках действуют различные законы взаимодействия, связей и математических зависимостей.

Для установления данных законов и определения характерной точки фазового перехода была получена и построена обобщенная зависимость сопротивления породы от средней температуры (рис. 7).

Обобщенная зависимость была условно разделена  $0^{\circ}\text{C}$  на фазу А, содержащую включения льда в поровом пространстве исследуемой породы, и фазу Б, в которой вся влага находится в жидком состоянии. При этом тренды полученных зависимостей описываются следующими уравнениями:

$$\text{Фаза А : } y = -0,0106x^2 - 0,7805x + 4,91,$$

$$\text{Фаза Б : } y = 0,0123x^2 - 0,3243x + 5,1693.$$

Решением системы этих уравнений в области определения от  $-7$  до  $7^{\circ}\text{C}$  является пересечение представленных парабол в точке фазового перехода при  $-0,6^{\circ}\text{C}$ .

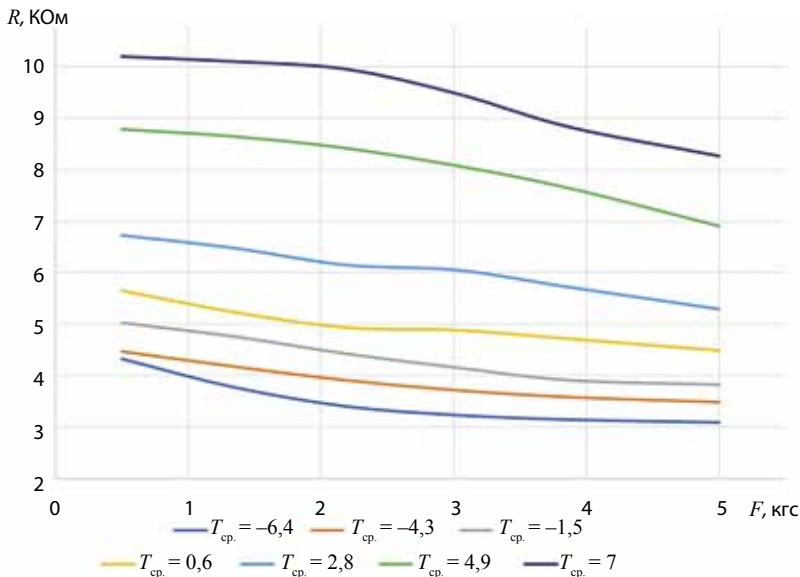


Рис. 5. Зависимость сопротивления от нагрузки при постоянном значении температур

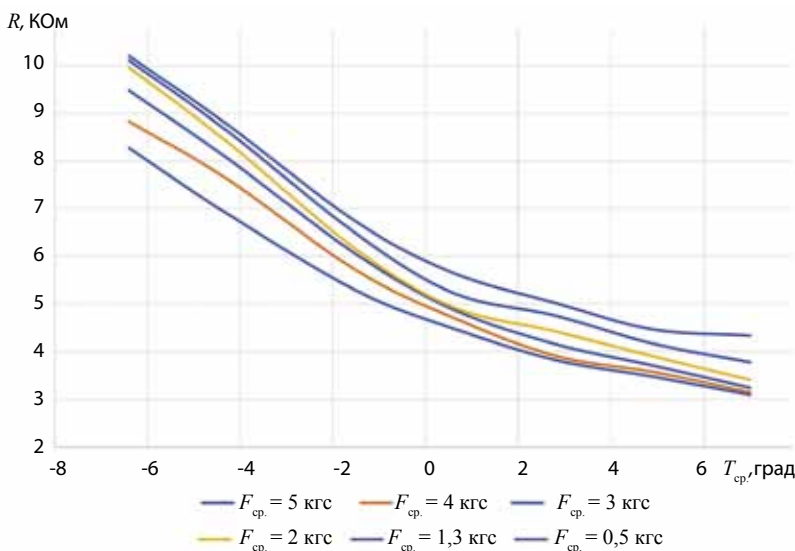


Рис. 6. Зависимость сопротивления от средних температур при постоянных нагрузках

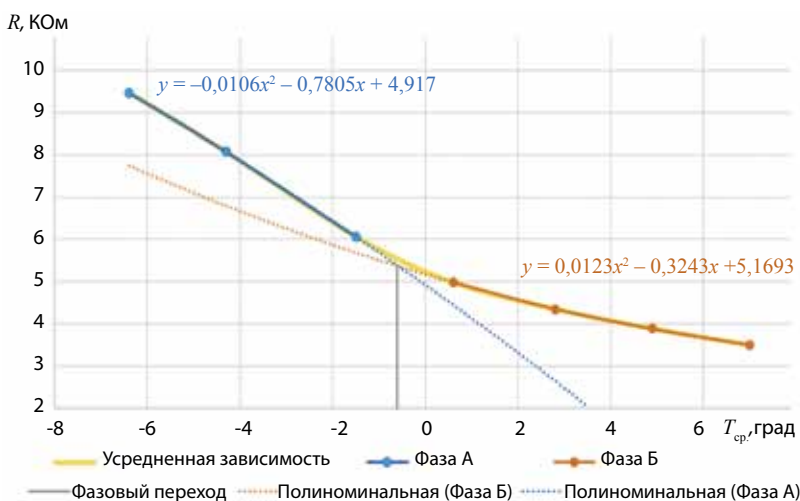


Рис. 7. Обобщенная зависимость сопротивления породы от средней температуры

Таким образом, при температуре породы  $-0,6^{\circ}\text{C}$  в ней происходит фазовый переход, при котором полностью исчезает льдистость в порах, и зависимость электрического сопротивления породы от нагрузки и температуры начинает подчиняться другому закону.

Это следует учитывать при определении характеристик пород косвенным путем, а также при натурном контроле динамики состояния пород в массиве по изменению его электропроводности в процессе геомониторинга в условиях сезонного изменения фазовых состояний при колебании температур.

### ВЫВОДЫ

Полученные результаты согласуются с ранними исследованиями о сложных связях и многофазовом составе строения мерзлых песчано-глинистых пород, образованных системой минеральных частиц, льдистых включений, воды различного вида связанности. Представленное изменение электропроводности пород под растущей механической нагрузкой при константе температуры дало возможность регистрировать динамику свойств и состояния пород по результатам непрерывных измерений.

Также установлено, что характерной точкой фазового перехода, обуславливающей существенное изменение особенности отклика породы на механическое воздействие, является температура  $-0,6^{\circ}\text{C}$ . При указанном переходе, связанном с сезонными явлениями в данном регионе, также меняются выявленные зависимости электрического сопротивления породы от температуры, что необходимо учитывать при косвенном определении состояния данных пород в массиве.

Характеристики и зависимости, полученные для наиболее подверженных внешним факторам песчано-глинистых пород Борлинского каменноугольного месторождения, могут быть использованы при натурном мониторинге динамики их состояния посредством контроля электропроводности и влияющих факторов.

### Список литературы

1. ГОСТ 25100-2011 Грунты. Классификация (с поправкой). М.: Стандартинформ, 2013.
2. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. (Общая и прикладная). М.: Высшая школа, 1973. 446 с.
3. Строение двойного электрического слоя в тонкокапиллярных системах // Известия вузов. Геология и разведка. 1976. № 1. С.111-119.

4. Зыков Ю.Д. Геофизические методы исследования криолитозоны. М.: Издательство МГУ, 2007. 272 с.
5. ГОСТ 5180-2015 Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. М.: Стандартинформ, 2016.
6. Шестернев Д.М. Физика, химия и механика мерзлых грунтов: учебное пособие. Чита: Поиск, 2012. 331 с.
7. Вакулин А.А. Основы геокриологии. Тюмень: Издательство Тюменского государственного университета, 2011. 220 с.
8. Шевнин В.А. Бобачев А.А., Баранчук К.И. Лабораторные измерения сопротивления и параметров вызванной поляризации рыхлых грунтов для определения литологического строения разреза // Инженерные изыскания. 2014. № 09-10. С. 53-58.
9. A novel freezing point determination method for oil – contaminated soils based on electrical resistance measurement and its influencing factors / G. Li, J. Zhang, Z. Zhou et al. // *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 721. P. 1-11.
10. Parameterization of soil freezing characteristic curve for unsaturated soils / J. Teng, J. Koub, X. Yanc et al. // *Cold Regions Science and Technology*. 2020. Vol. 170. P. 1-29.
11. Wang Q., Qi J., Wang S. et al. Effect of freeze-thaw on freezing point of a saline loess // *Cold Regions Science and Technology*. 2020. Vol. 170. P. 1-21.
12. Zhou J., Wei C., Lai Y. et al. Application of the generalized Clapeyron equation to freezing point depression and unfrozen water content // *Water Resources Research*. 2018. No 54. P. 9412–9431.
13. Istomin V., Chuvilin E., Bukhanov B. et al. Pore water content in equilibrium with ice or gas hydrate in sediments // *Cold Regions Science and Technology*. 2017. Vol. 137. P. 60-67.

## Original Paper

UDC 550.372: 552.525 © I.N. Voronkov, A.A. Malakhov, S.P. Olenyuk, D.V. Sitnikov, E. Abdikashev, 2022  
 ISSN 0041-5790 (Print) • ISSN 2412-8333 (Online) • Ugol' – Russian Coal Journal, 2022, № 6, pp. 84-88  
 DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2022-6-84-88>

## Title

**RESEARCH INTO DEPENDENCE OF ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF SANDY-CLAYEY ROCKS ON LOAD AND TEMPERATURE IN THE PORE MOISTURE PHASE TRANSITION ZONE**

## Authors

Voronkov I.N.<sup>1</sup>, Malakhov A.A.<sup>1</sup>, Olenyuk S.P.<sup>2</sup>, Sitnikov D.V.<sup>3</sup>, Abdikashev E.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>GOLD-WAY LLC, Karaganda, 100026, Republic of Kazakhstan

<sup>2</sup>Karaganda state technical university, Karaganda, 100027, Republic of Kazakhstan

<sup>3</sup>Kazakhmys Coal LLP, Karaganda, 100015, Republic of Kazakhstan

## Authors Information

**Voronkov I.N.**, Master of Engineering Sciences, Director,  
 e-mail: GoldWayLtd@yandex.kz

**Malakhov A.A.**, Master of Engineering Sciences, Chief Engineer,  
 e-mail: GoldWayLtd@yandex.kz

**Olenyuk S.P.**, PhD (Engineering), Senior Lecturer of the Department  
 "Surveying and Geodesy"

**Sitnikov D.V.**, General Director, e-mail: Denis.Sitnikov@kazakhmys.kz

**Abdikashev E.**, Master of Engineering Sciences, Technical Director,  
 e-mail: Erzhan.Abdikashev@kazakhmys.kz

## Abstract

The paper presents a comprehensive approach to studying the nature of the dynamics in physical state of the sand-clay soils of the Borlinsky coal deposit under the multi-factor change in external conditions. Electrical resistance, i.e. the electrical conductivity of soils, was selected as a universal indicator of the impact of external and internal factors. Multiple tests of sandy and clayey soils under different external and internal factors of various magnitudes allowed to define their unifying empirical dependences and to establish the actual phase transition point which is different from zero degrees. The results obtained can be used in geophysical investigations of sandy and clayey soils, and development of systems for monitoring changes in their condition.

## Keywords

Coal deposit, Host rock, Rock properties, Rock mass condition, Electrical conductivity of soils, Pore water, Test bench, Phase transition.

## References

1. GOST 25100-2011 Soils. Classification (with corrections). Moscow, Standartinform Publ., 2013. (In Russ.).
2. Tsytoich N.A. Mechanics of frozen soils. (General and Applied), Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1973, 446 p. (In Russ.).
3. Structure of the double electrical layer in fine capillary systems. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Geologiya i razvedka*, 1976, (1), pp.111-119. (In Russ.).
4. Zikov Yu.D. Geophysical methods of studying the cryolithic zone. Moscow, MGU Publ., 2007, 272 p. (In Russ.).

5. GOST 5180-2015 Soils. Methods of laboratory definition of physical properties. Moscow, Standartinform Publ., 2016. (In Russ.).

6. Shesternev D.M. Physics, Chemistry and Mechanics of frozen soils: a textbook. Chita, Poisk Publ., 2012, 331 p. (In Russ.).

7. Vakulin A.A. Fundamentals of Geocryology. Tyumen, Tyumen State University Publ., 2011, 220 p. (In Russ.).

8. Shevnin V.A., Bobachev A.A. & Baranchuk K.I. Laboratory measurements of resistance and induced polarization parameters of loose soils to determine the lithological structure of the cross-section. *Inzhenernyye izyskaniya*, 2014, (09-10), pp. 53-58 (In Russ.).

9. Li G., Zhang J., Zhou Z. et al. A novel freezing point determination method for oil – contaminated soils based on electrical resistance measurement and its influencing factors. *Science of the Total Environment*, 2020, (721), pp. 1-11.

10. Teng J., Koub J., Yanc X. et al. Parameterization of soil freezing characteristic curve for unsaturated soils. *Cold Regions Science and Technology*, 2020, (170), pp. 1-29.

11. Wang Q., Qi J., Wang S. et al. Effect of freeze-thaw on freezing point of a saline loess. *Cold Regions Science and Technology*, 2020, (170), pp. 1-21.

12. Zhou J., Wei C., Lai Y. et al. Application of the generalized Clapeyron equation to freezing point depression and unfrozen water content. *Water Resources Research*, 2018, (54), pp. 9412-9431.

13. Istomin V., Chuvilin E., Bukhanov B. et al. Pore water content in equilibrium with ice or gas hydrate in ediments. *Cold Regions Science and Technology*, 2017, (137), pp. 60-67.

## For citation

Voronkov I.N., Malakhov A.A., Olenyuk S.P., Sitnikov D.V. & Abdikashev E. Research into dependence of electrical conductivity of sandy-clayey rocks on load and temperature in the pore moisture phase transition zone. *Ugol'*, 2022, (6), pp. 84-88. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2022-6-84-88.

## Paper info

Received February 11, 2022

Reviewed April 15, 2022

Accepted May 23, 2022