



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ

**СТРОИТЕЛЬНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**

## ПОТАПОВСКИЕ ЧТЕНИЯ – 2019

Сборник материалов  
ежегодной Всероссийской научно-практической конференции,  
посвященной памяти доктора технических наук, профессора  
Александра Дмитриевича ПОТАПОВА

*(г. Москва, 25 апреля 2019 г.)*

© Национальный исследовательский  
Московский государственный  
строительный университет, 2019

ISBN 978-5-7264-1985-5

Москва  
Издательство МИСИ – МГСУ  
2019

УДК 624+528+504

ББК 38+26.1+20.1

П64

- П64     **Потаповские чтения – 2019** [Электронный ресурс] : сборник материалов ежегодной Всероссийской научно-практической конференции, посвященной памяти доктора технических наук, профессора Александра Дмитриевича Потапова / М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Нац. исследоват. Моск. гос. строит. ун-т. — Электрон. дан. и прогр. (11,5 Мб). — Москва: Издательство МИСИ – МГСУ, 2019. — Режим доступа: Режим доступа: <http://mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkr-dostupa/> – Загл. с титул. экрана.  
ISBN 978-5-7264-1985-5

Сборник содержит материалы ежегодной Всероссийской научно-практической конференции «Потаповские чтения», посвященной памяти Александра Дмитриевича Потапова. Конференция состоялась 25 апреля 2019 г. в НИУ МГСУ и ее организатором выступила кафедра инженерных изысканий и геоэкологии (ИИиГЭ) НИУ МГСУ.

В работе конференции приняли участие более 150 человек из 16 российских вузов, а также различных кафедр НИУ МГСУ. Конференция была ориентирована на студентов, магистрантов и аспирантов.

Для научных работников, аспирантов, магистрантов и студентов, всех форм обучения в области строительства, инженерных изысканий, геоэкологии и техносферной безопасности.

*Научное электронное издание*

*Материалы публикуются в авторской редакции.  
Авторы опубликованных материалов несут ответственность  
за достоверность приведенных в них сведений.*

© Национальный исследовательский  
Московский государственный  
строительный университет, 2019

Ответственные за выпуск:  
*В.А. Курочкина, И.Ю. Яковлева*

Институт гидротехнического и энергетического строительства  
(ИГЭС НИУ МГСУ)  
Сайт: [www.mgsu.ru](http://www.mgsu.ru)  
<http://iges.mgsu.ru/universityabout/Struktura/Instituti/IGES/>  
Тел. +7 499 183 43 83  
E-mail: [iges@mgsu.ru](mailto:iges@mgsu.ru)  
Кафедра инженерных изысканий и геоэкологии  
Тел.: +7 (495) 287-49-14 (доб. 2380)  
E-mail: [LavrusevichAA@mgsu.ru](mailto:LavrusevichAA@mgsu.ru)

Для создания электронного издания использовано:  
Microsoft Word 2013, ПО Adobe Acrobat

Подписано к использованию 24.06.2019 г. Объем данных 11,5 Мб.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Национальный исследовательский  
Московский государственный строительный университет».  
129337, Москва, Ярославское ш., 26.

Издательство МИСИ – МГСУ.  
Тел.: (495) 287-49-14, вн. 13-71, (499) 188-29-75, (499) 183-97-95.  
E-mail: [ric@mgsu.ru](mailto:ric@mgsu.ru), [rio@mgsu.ru](mailto:rio@mgsu.ru).

## ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРООСМОСА ДЛЯ ЦЕЛЕНАПРАВЛЕННОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СВОЙСТВ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ ПРИ ИХ ОЧИСТКЕ ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

Нестеров Д.С.<sup>1</sup>, Королёв В.А.<sup>2</sup>

*1-магистрант 2 года обучения, МГУ имени М.В. Ломоносова, 119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1*

*2-д.г.-м.н., профессор кафедры инженерной и экологической геологии МГУ имени М.В. Ломоносова, 119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1*

### **Аннотация**

Настоящее исследование касается очистки глинистых грунтов от загрязнений. В данной области по-прежнему остается малоизученным влияние минерального состава грунтов на протекание в них электрокинетических процессов, происходящие в ходе этого изменения свойств грунтов и общую эффективность очистки. Целью исследования было изучение особенностей изменения свойств глинистых грунтов различных минеральных типов при их электрокинетической очистке по простейшей схеме. Испытания проводились на глинистых грунтах полевошпатово-кварцевого, каолинистого, гидрослюдистого и смектитового состава по открытой схеме электроосмоса при постоянной силе тока. В результате воздействия электроосмоса влажность, пористость и солесодержание глин уменьшаются, а их плотность увеличивается. При этом наиболее контрастные преобразования физических свойств были характерны для каолина и гидрослюдистой глины, наибольшая степень очистки была достигнута также для каолина. Очистка суглинка по данной схеме неэффективна из-за низкой электроосмотической активности, а смектитовой глины – из-за продвижения кислого фронта и затухания электроосмоса.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время в связи с постоянным ростом темпов строительства в хозяйственную деятельность часто вовлекаются территории с неблагоприятными инженерно-геологическими условиями, в частности, территории, сложенные водонасыщенными глинистыми грунтами. Часто такие грунты загрязнены тяжёлыми металлами, органическими соединениями или комплексными токсикантами [1]. Для очистки таких грунтов и успешного вовлечения их в хозяйственную деятельность разработаны различные методы обработки грунтов, наиболее перспективным из которых является электрокинетический. При этом преобразования свойств грунтов, подвергшихся очистке подобным методом, во многом остаются неизученными. В связи с этим, целью настоящего исследования является изучение особенностей преобразования свойств глинистых грунтов различных минеральных типов при их очистке электрокинетическим методом.

### **ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ**

Приложение электрического тока к водонасыщенному глинистому грунту вызывает в нём комплекс химических, физических и физико-химических процессов. Среди электрокинетических процессов наибольшее значение имеют электромиграция и электроосмос [2]. Электромиграция представляет собой движение ионов в поровом пространстве под действием электрического тока. Электроосмос – это перемещение молекул воды, окружающих ионы двойного электрического слоя (ДЭС), вызванное миграцией этих ионов под действием электрического тока [3]. При этом на эффективность очистки могут оказывать влияние побочные химические процессы, такие как растворение твёрдой фазы, сорбция/десорбция тяжёлых ме-

таллов, комплексобразование и др., возможность возникновения которых зависит от минерального состава грунта [4]. Поэтому чаще всего электрокинетическую очистку проводят с использованием улучшающих растворов, чаще всего кислых []. Однако влияние состава грунтов на эффективность их очистки во многом не изучено. Поэтому в настоящем исследовании приводятся результаты экспериментов по электрокинетической обработке грунтов по простейшей схеме: обработка электроосмосом ограниченного массива без использования улучшающих добавок.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объектов исследования были выбраны 4 глинистых грунта, представляющие основные их типы и не являющиеся уникальными: моренный суглинок (Москва), глуховецкий каолин (Украина), биясалинская гидрослюдистая глина (Крым) и махарадзевская смектитовая глина (Грузия). Моренный суглинок сложен в основном кварцем (73%) и полевыми шпатами (26%), глинистые минералы в его составе отсутствуют. При этом частицы кварца суглинка покрыты плёнками гидроксидов железа. Каолин сложен на 75% каолинитом и 20% кварцем и содержит примеси других глинистых минералов. Гидрослюдистая глина является полиминеральным грунтом и состоит из иллита (23%), мусковита (23%), полевых шпатов (18%), кварца (17%), глауконита (8%), каолинита (6%), а также содержит примеси доломита (3%) и гипса (2%). Махарадзевская глина (асканглина) сложена на 100% смешаннослойными глинистыми минералами с содержанием смектитовых пакетов больше 60%. Физико-химическая активность глин закономерно возрастает от суглинка к асканглине.

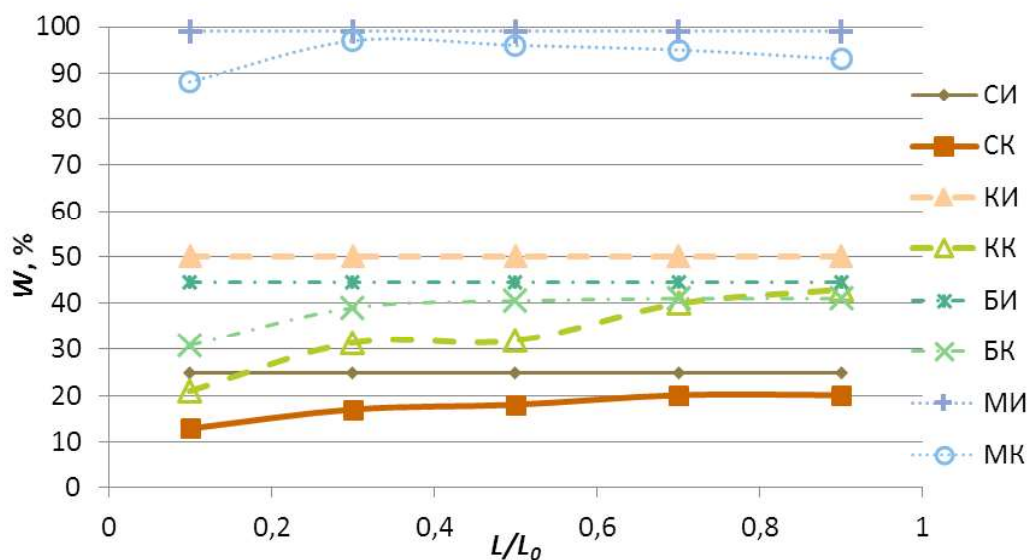
Согласно ГОСТ 25100-2011 моренный суглинок представляет собой суглинок лёгкий песчанистый, глуховецкий каолин и биясалинская глина – глины лёгкие пылеватые, а асканглина – глину тяжёлую [6].

Электроосмотические испытания проводились на глинистых пастах, приготовленных на 0,01 н растворе  $\text{CaCl}_2$  при влажности, близкой к верхнему пределу пластичности  $W_L$ . При этой влажности развитие оболочек двойного электрического слоя (ДЭС) максимально, поэтому электроосмос будет протекать наиболее интенсивно [7]. Эксперименты проводились в ячейке открытого типа с возможностью оттока фильтрата в катодной зоне при постоянной силе тока 10 мА (плотность тока  $j=32 \text{ А/м}^2$ ). Постоянство силы тока поддерживалось путем постепенного увеличения напряжения, эксперимент завершался при превышении напряжением значения 200 мВ или невозможности дальше поддерживать постоянную силу тока.

После эксперимента образец делился на 5 частей. В каждой части определяли влажность  $W$  и плотность  $\rho$  согласно стандартным методикам [8]. Пористость  $n$  рассчитывалась согласно ГОСТ 25100-2011, общее солесодержание  $\chi$  определялось с помощью водных вытяжек. Такие же параметры определялись и для исходных глинистых паст.

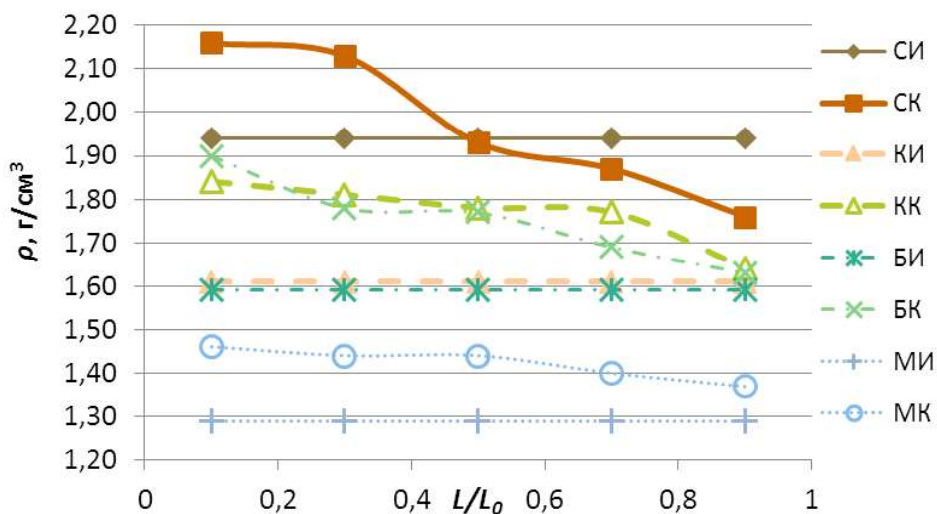
## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Приложение поля постоянного электрического тока к глинистым грунтам приводит к перераспределению их влажности в межэлектродном пространстве (рис. 1). Так, влажность всех исследуемых грунтов снижается относительно исходной, а также в направлении от катода к аноду. При этом наибольшее снижение влажности наблюдалось для глуховецкого каолина, в среднем на 15%. Наименьшей эффект осушения наблюдался для суглинка (7%) и асканглины (5%). В случае суглинка это объясняется низкой электроосмотической активностью грунта, что связано с отсутствием в его составе глинистых минералов. При обработке асканглины по всей длине образца кроме прикатодной зоны происходило закисление грунта ( $\text{pH}=1$ ), что приводило к смене знака электрического заряда частиц грунта, сжатию их ДЭС и подавлению электроосмоса.



**Рис. 1.** Зависимость весовой влажности  $W$  (%) глинистых грунтов от относительного расстояния от анода  $L/L_0$ : СИ – суглинок исходный, СК – суглинок после опыта, КИ – каолин исходный, КК – каолин после опыта, БИ – биясалинская глина исходная, БК – биясалинская глина после опыта, МИ – асканглина исходная, МК – асканглина после опыта,  $L_0$  – длина образца

Осушение глинистых грунтов приводило к изменению их плотности  $\rho$  (рис. 4). В основном, плотность грунтов увеличивалась относительно исходной, что связано с уплотняющим действием электроосмотического потока. Наибольшее увеличение плотности отмечалось для биясалинской глины. Плотность суглинка в катодной части уменьшилась по сравнению с исходной, вероятно, из-за задержки фильтрата в этой зоне.



**Рис. 2.** Зависимость плотности  $\rho$  (г/см<sup>3</sup>) глинистых грунтов от относительного расстояния от анода  $L/L_0$

В соответствии с изменением плотности грунтов происходило изменение их пористости  $n$  (рис. 3). В целом пористость грунтов после электроосмоса уменьшилась по сравнению с исходной, также пористость снижается от катода к аноду. Наибольшее снижение пористо-

сти наблюдалось для каолина, а наименьшее – для асканглины. Для суглинка в катодной части наблюдалось повышение пористости по сравнению с исходной.

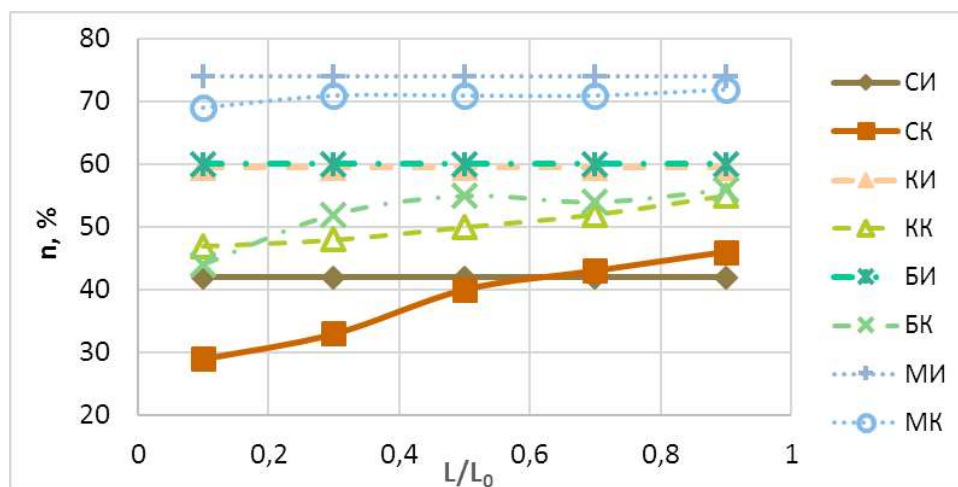


Рис. 3. Зависимость пористости  $n$  (%) глинистых грунтов от относительного расстояния от анода  $L/L_0$

При приложении разности электрических потенциалов к грунту происходит миграция ионов в его поровом пространстве, что приводит к изменению солесодержания грунта (рис. 4). Солесодержание суглинка в целом меняется слабо относительно исходного, при этом оно увеличивается в анодной зоне и снижается в катодной. Снижение солесодержания связано с миграцией и выносом ионов  $Ca^{2+}$ , а его увеличение – с образованием кислой среды в анодной зоне, частичным растворением железистых плёнок и выходом ионов железа в поровый раствор. Солесодержание каолина значительно уменьшается по сравнению с исходным. В случае биясалинской глины, её солесодержание растёт по сравнению с начальным во всём межэлектродном пространстве, что, вероятно, связано с растворением карбонатов.

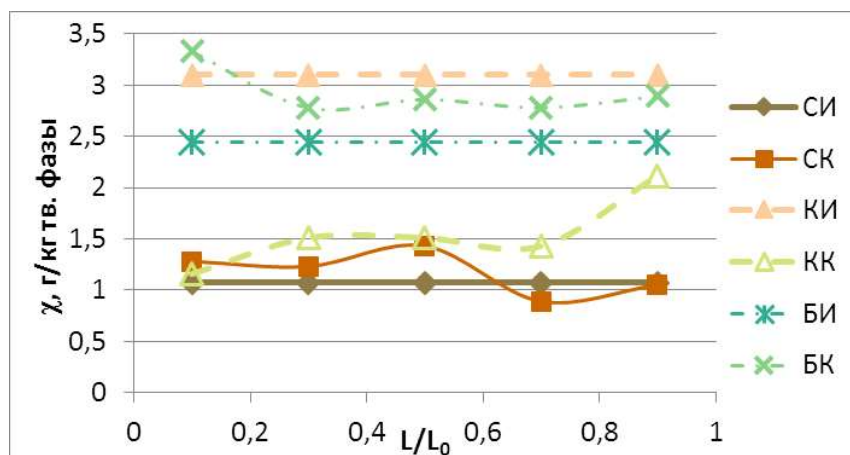


Рис. 4. Зависимость общего солесодержания глинистых грунтов  $\chi$  (г/кг твёрдой фазы грунта) от относительного расстояния от анода  $L/L_0$

## ВЫВОДЫ

1. Действие электроосмоса на глинистые грунты вызывает изменение их свойств – снижение влажности, пористости и солесодержания и повышение плотности.

2. Изменения физических свойств образцов под влиянием электроосмоса происходят более контрастно у глинистых грунтов со средней физико-химической активностью, таких

как каолин и иллитовая глина. Изменение солесодержания при очистке грунтов данным методом зависит от минерального и химического состава грунтов; наибольшая степень очистки достигается для грунтов со средней физико-химической активностью и отсутствием растворимых примесей.

3. Электрокинетическая очистка смектитовых грунтов может быть эффективной только при использовании улучшающих добавок и проточной схемы испытаний, что связано с высокой скоростью распространения кислого фронта в таких грунтах.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Королёв В.А.* Очистка и восстановление геологической среды / Уч. пособие для вузов. – М., ООО «Самполиграфист», 2019. – 430 с.
2. *Reddy K.R., Cameselle C.* Overview of electrochemical remediation technologies. In: *Electrochemical Remediation Technologies for Polluted Soils, Sediments and Groundwater*; // Reddy, K.R.; Cameselle, C., Eds.; A John Willey & Sons, Inc.: Hoboken, New Jersey, 2009; 3-28.
3. *Pamucku S.* Electrochemical transport and transformations. In: *Electrochemical Remediation Technologies for Polluted Soils, Sediments and Groundwater*; // Reddy, K.R.; Cameselle, C., Eds.; A John Willey & Sons, Inc.: Hoboken, New Jersey, 2009; 29-64.
4. *Yeung, A.T.* Geochemical processes affecting electrochemical remediation. In *Electrochemical Remediation Technologies for Polluted Soils, Sediments and Groundwater*; Reddy, K.R.; Cameselle, C., Eds.; A John Willey & Sons, Inc.: Hoboken, New Jersey, 2009; 65-94.
5. *Cameselle, C.; Reddy, K.R.* Development and enhancement of electro-osmotic flow for the removal of contaminants from soils, *Electrochim. Acta*, 2012, 86, 10-22.
6. ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация. – М.: МНТКС, 2012. 29 с.
7. *Злочевская Р.И., Королёв В.А.* Электроповерхностные явления в глинистых породах. – М.: Изд-во МГУ, 1988 – 177 с.
8. ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. – М., Стандинформ, 2016, 19 с.