

DOI: 10.25558/VOSTNII.2022.82.82.011

УДК 504.064: 622.02

© Е.А. Шабанов, С.М. Простов, Е.М. Вахьянов, 2022

Е.А. ШАБАНОВ

канд. техн. наук,
доцент кафедры
КузГТУ, г. Кемерово
e-mail: evgenshab@mail.ru



С.М. ПРОСТОВ

д-р техн. наук,
профессор кафедры
КузГТУ, г. Кемерово
e-mail: psm.kem@mail.ru



Е.М. ВАХЬЯНОВ

старший преподаватель кафедры
КузГТУ, г. Кемерово



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРУНТОВ ПРИ ЭЛЕКТРООСМОТИЧЕСКОЙ ОЧИСТКЕ ОТ РАСТВОРОВ КИСЛОТ И ЩЕЛОЧЕЙ НА ОДНОМЕРНОЙ МОДЕЛИ

В работе исследованы закономерности изменения физических свойств грунтов, загрязненных растворами кислоты и щелочи с концентрацией 1–8 %, при обработке постоянным однородным электрическим полем в одномерной электрической модели. В межэлектродном пространстве фиксировались следующие параметры: удельное электросопротивления (УЭС), влажность, плотность, гранулометрический состав. Установлено, что при электроосмотической обработке происходят сложные физико-химические процессы осушения, образования нерастворимых экологически нейтральных соединений, взаимодействия активных веществ с металлом электродов. Измерение электросопротивлений с использованием микродатчиков позволяет вести детальный мониторинг изменений состояния и свойств грунтов в зоне электрообработки в реальном масштабе времени, при этом пространственно-временные изменения УЭС являются объективным критерием перехода загрязненных грунтов в неактивное состояние.

Ключевые слова: ЭКОЛОГИЯ, ГРУНТ, ЭЛЕКТРООСМОС, ЗАГРЯЗНЕНИЕ, КИСЛОТА, ЩЕЛОЧЬ, ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЕ, ВЛАЖНОСТЬ, ПЛОТНОСТЬ, ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ, ДЕЗАКТИВАЦИЯ.

ВВЕДЕНИЕ

Угольная промышленность Кемеровской области вносит наибольший вклад в ухудшение экологической ситуации региона [1–3]. Наряду с большим объемом промышленных отходов в виде отвалов вскрышных пород и необходимостью рекультивации нарушенных земель [4–5], одной из важнейших нерешенных экологических проблем предприятий, применяющих открытую геотехнологию, является загрязнение грунтов кислото- и щелочесодержащими экотоксикантами [6–7].

Под воздействием кислот в подземных водах резко повышается содержание тяжелых металлов — свинца, кадмия, цинка и особенно алюминия, который поступает через корневые системы в древесные ткани и вызывает отравление растений, что зачастую приводит к их гибели. Для здоровья человека кислоты опасны своим токсическим воздействием, которое может стать причиной химических ожогов и отравления организма. Основными источниками загрязнений грунта кислотосодержащими экотоксикантами на горнодобывающих предприятиях Кемеровской области являются сбросы обогатительных фабрик, отработанные свинцовые аккумуляторы промышленной техники и фильтрующие массивы сооружений для очистки сточных вод. Высокая вероятность загрязнения грунтов растворами щелочей, существует при применении технологий подземного выщелачивания и гидроразрывов пластов [8–9].

Для полноценной рекультивации загрязненного грунта в первую очередь необходимо оперативное диагностирование зоны загрязнения. Современные методы определения этих зон весьма трудоемки, т. к. зачастую связаны со значительными денежными и временными затратами, которые отводятся на лабораторные испытания образцов грунта [10–11].

Интерес вызывает применение для этих целей электрофизических методов, в значительной мере свободных от этих недостатков. Эти же методы вполне пригодны для мониторинга процессов дезактивации зон загрязнений грунта, т. к. это позволит детально наблю-

дать пространственно-временные изменения процессов очистки грунта и оценивать качество обработки. На данный момент, одним из перспективных методов очистки грунта от жидких экотоксикантов является электрохимическая (электроосмотическая) очистка, которая уже несколько лет активно изучается и развивается в КузГТУ. Проведены лабораторные исследования на образцах грунтов и нефтесодержащих веществ, одномерной и объемной установках, а также в натуральных условиях [12–14].

Доказано, что метод достаточно информативен при загрязнении грунтов нефтепродуктами, отличающихся низкой электропроводностью. Вместе с тем, полученные закономерности и диапазоны изменения физических свойств грунтов необходимо проверить и скорректировать в лабораторных и натуральных условиях для кислотосодержащих экотоксикантов.

Актуальным представляется проведение испытаний метода контроля процессов электроосмотической и электрохимической очистки грунтов от неорганических кислот и щелочей.

Цель работы — экспериментальное исследование закономерностей пространственно-временных изменений физических свойств грунтов, загрязненных неорганическими экотоксикантами в форме растворов кислот и щелочей, при электрообработке.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Физико-химические и гидро- и термодинамические процессы в поровом пространстве грунтов приводят к изменениям их электропроводящих, диэлектрических свойств, формированию естественных электрических полей. Измерение параметров этих полей методами зондирования, каротажа, томографии, геоолокации, позволяет решить научно-практические задачи, в частности:

- контролировать гидродинамические параметры фильтрации инъекционных растворов в реальном масштабе времени [15];

- оценивать качество цементации пор и интенсивность набора их прочности [16];

– прогнозировать изменение механических свойств намывных грунтов при водоотдаче и фильтрационной консолидации [17, 18];

– контролировать процессы электрохимического закрепления малопроницаемых грунтов [19].

Эффективное удельное (кажущееся) электросопротивление (УЭС) влагонасыщенного грунтового массива, представляющего собой трехфазную среду (твердый скелет–поровое пространственно — влага, частично заполняющая поры), достаточно точно описывается эмпирической зависимостью, активно используемой в классической электроразведке [17]:

$$\rho_k = \alpha K_{\Pi} m^{-\beta} w^{-\gamma} \rho_B \quad (1)$$

где m — пористость; w — коэффициент влагонасыщения порового пространства; α , β , γ , K_{Π} — эмпирические структурно-текстурные параметры, изменяющиеся в широких диапазонах [21].

Основная физическая предпосылка идеи метода контроля степени загрязнения грунта неорганическими экотоксикантами состоит в изменении УЭС раствора, заполняющего поры грунта. Теоретически зависимость от параметров загрязняющей и природной влаги может описываться следующими формулами:

– логарифмического средневзвешенного:

$$\lg \rho_B = V_3 \lg \rho_3 + V_{\Pi} \lg \rho_{\Pi}; \quad (2)$$

– гармонического средневзвешенного:

$$\rho_B^{-1} = V_3 \rho_3^{-1} + V_{\Pi} \rho_{\Pi}^{-1}; \quad (3)$$

где ρ_3 , ρ_{Π} — УЭС соответственно загрязнителя и природной влаги в заполнителе пор; V_3 , V_{Π} — объемные доли компонентов.

Из уравнения (3), в частности, с учетом того, что $V_3 = 1 - V_{\Pi}$, можно получить:

$$\rho_B = \rho_3 \rho_{\Pi} [\rho_3 + V_3 (\rho_{\Pi} - \rho_3)]^{-1}; \quad (4)$$

По данным, приведенным в [21], диапазоны УЭС составляют:

– для щелочей и кислот $\rho_3 = 0,01 - 10$ Ом·м;

– для природных минерализованных природных растворов $\rho_{\Pi} = 1 - 100$ Ом·м, т. е. данные загрязнители вполне электрически контрастны.

Теоретические зависимости (1) – (4) принципиально позволяют оценивать степень загрязнения грунта по результатам единичных замеров, профильных и площадных электрических зондирований. Прямая оценка величины V_3 практически невозможна, поскольку требует знания целого ряда параметров, поэтому на данном этапе исследований целесообразно ограничиться качественным анализом.

Физическое моделирование зоны электрообработки выполнено в одномерном варианте. Основой установки являются четырехэлектродные микродатчики (AM = MN = NB = 1 см), погруженные в грунт, загружаемый в трубчатую емкость. Пластинчатые электроды 6 и 7 обеспечивают однородное электрическое поле. Остальные элементы установки показаны на рис. 1.

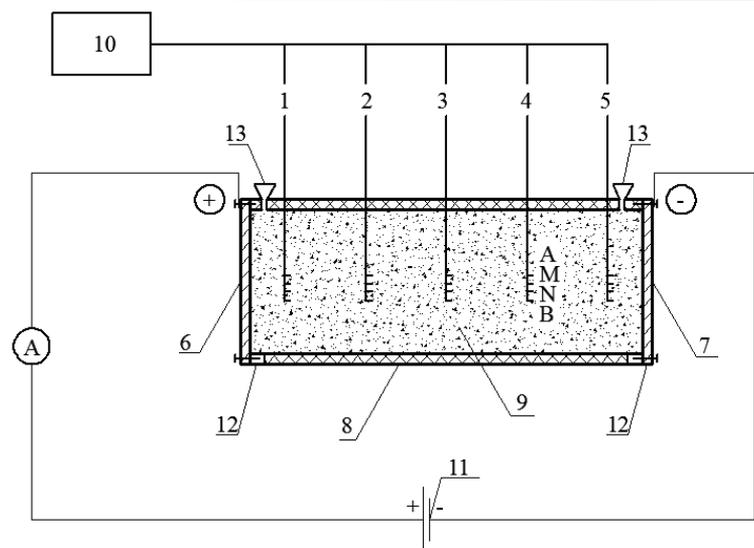


Рис. 1. Схема экспериментальной лабораторной установки — «одномерной модели»: 1–5 — четырехэлектродные датчики-зонды № 1–5; 6 — положительный электрод (анод); 7 — отрицательный электрод (катод); 8 — полиэтиленовая труба 160 мм; 9 — обрабатываемый загрязненный грунт; 10 — каротажный прибор КП-2; 11 — источника питания постоянного электрического тока Б5-50; 12 — дренажные отверстия; А, М, N, В — медные микроэлектроды; 13 — отверстия для подачи активного вещества

Основными задачами экспериментальных исследований были следующие: установление влияния нагревания массива электрическим током на разложение кислот; изучение физических параметров очищаемого массива; исследование процессов химических взаимодействий и электрокоагуляции, способствующих

переходу растворов кислот и щелочей в твердое состояние.

Исследования проводились со следующими загрязнителями грунта: серная кислота и едкий натрий. Данные о концентрациях загрязнителей приведены в табл. 1.

Таблица 1

Концентрации загрязнителей грунта

№ п/п	Вид загрязнителя	Масса воды, кг	Масса концентрированного загрязнителя, кг	Концентрация загрязнителя, %	Время обработки
1	Чистый грунт (6,5 кг)	1,8	0	0 %	132 часа
2	Кислота H ₂ SO ₄	1,67	0,13	1 %	132 часа
3		1,28	0,52	4 %	108 часов
4		0,76	1,04	8 %	108 часов
5		1,58	0,217	1 %	108 часов
6	Щелочь NaOH	0,93	0,87	4 %	108 часов
7		0,067	1,733	8 %	84 часа

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлены характерные графики изменения напряжения и силы тока. Регулируя напряжение при изменении элек-

тросопротивления установки, сила тока поддерживалась постоянной. На начальном этапе обработки чистого и загрязненного грунта происходит увеличение напряжения из-за

увеличения УЭС массива при испарении влаги в приэлектродных областях; в дальнейшем происходит плавное уменьшение напряже-

ния из-за скопления и растворения электролита, которое приводит к уменьшению УЭС.

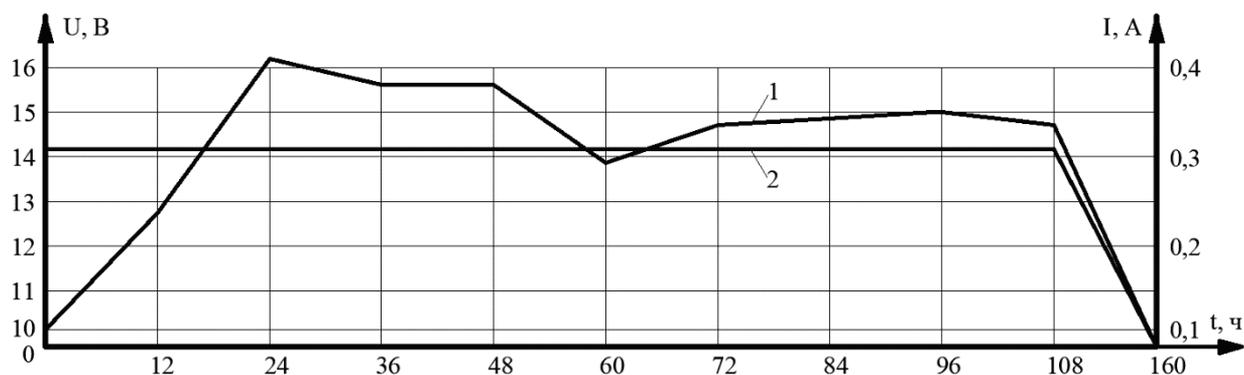


Рис. 2. Характерные графики изменения напряжения и силы тока в течение обработки:
1 — напряжение Uс; 2 — сила тока I

Графики изменения относительного УЭС при электрообработке грунтов, загрязненных раствором H_2SO_4 представлены на рис. 3, а растворов – на рис. 4.

В ходе электрообработки чистого грунта было выявлено, что под действием электрического тока происходит осмотическое движение влаги от датчика 5 к датчику 1, т. к. УЭС грунта на 1 датчике уменьшается, а на датчике 5 увеличивается. Процессы изменения УЭС грунта, загрязнённого 1 %-м и 4 %-м растворами серной кислоты, качественно схожи между собой, однако диапазоны положительных и отрицательных приращений УЭС с ростом концентрации загрязнителя увеличиваются.

На первом этапе, под действием электрического тока, запускается процесс электролиза. Со стороны анода (датчик 1) начинается разложение молекул воды с выделением чистого кислорода. В ходе этого процесса кислотность грунта увеличивается, и значения УЭС снижаются (линия 1, рис. 3б).

Через первые сутки (линия 2, рис. 3б, в) начинает проявляться эффект осушения грунта за счет его нагрева под действием электрического тока. Испарение воды приводит к увеличению концентрации загрязнителя в грунте, снижению скорости протекания электролиза и, как следствие, увеличению УЭС, что регистрируется на датчиках 1, 2 (линия 1, 2, рис. 3б, в).

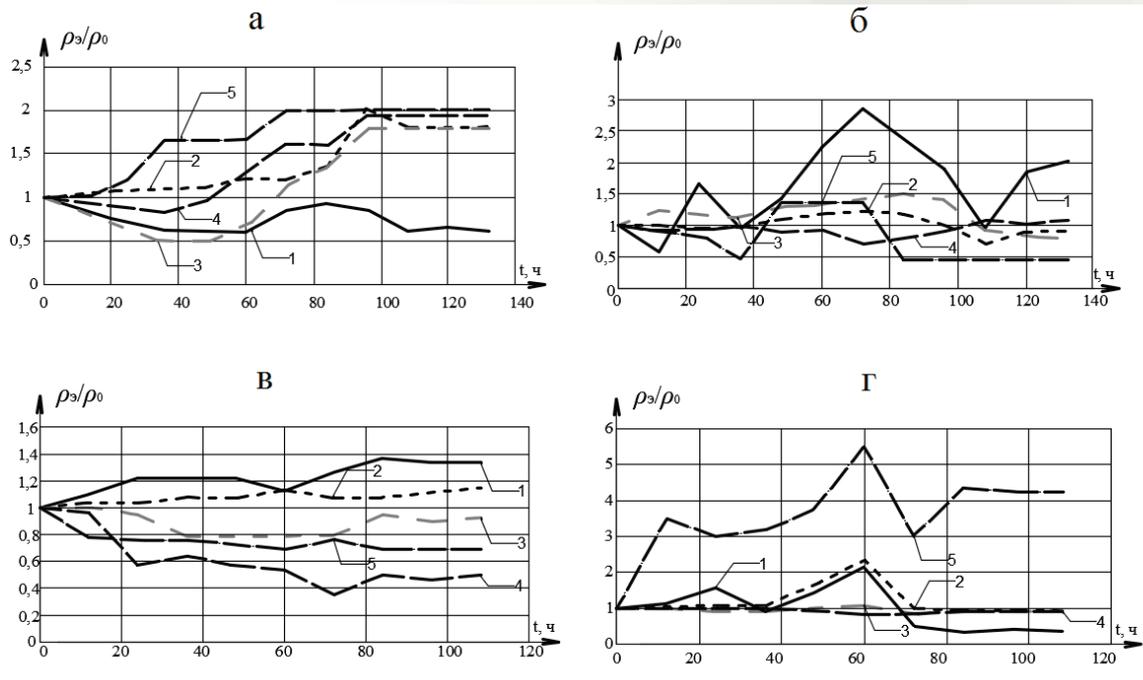


Рис. 3. График изменения относительного УЭС в течение обработки грунта по датчикам 1–5: а — чистый грунт; б — серная кислота с концентрацией 1 %; в — с концентрацией 4 %; г — с концентрацией 8 %

По истечении двух суток процессы испарения, электролиза замедляются и начинает преобладать электроосмотическое движение жидкости в грунте. В последующие четверо суток под действием электрического тока, кислота и растворы ее солей перемещаются от анода к катоду. Это приводит к осушению грунта, росту УЭС со стороны анода (датчик 1), а со стороны катода к увеличению концентрации раствора кислоты, что приводит к формированию зоны грунта с пониженным УЭС (датчик 5).

При загрязнении грунта раствором с содержанием серной кислоты 8 % отчетливо видно резкое увеличение УЭС грунта со стороны катода (рис. 5г). Данный эффект может быть вызван не изменениями внутри грунта, а протеканием химической реакции между раствором серной кислоты и металлической пластиной, которая выступала крышкой торцевой части экспериментальной установки. Реакция окисления металла снижала плотность раствора серной кислоты и, как следствие, увеличивала УЭС грунта со стороны датчика 5. Малая контрастность между показаниями датчиков 1–4 может быть связана с меньшим содержанием воды в растворе за-

грязнителя и соответственно меньшим влиянием процессов осмоса и осушения грунта.

При загрязнении грунта водным раствором с содержанием едкого натрия 8 % изменение УЭС грунта практически повторяют аналогичный эксперимент, описанный выше с 8 %-ой серной кислотой. Выделяется резкое увеличение УЭС грунта со стороны катода (датчик 5, рис. 4в). Данный эффект также может быть вызван не изменениями внутри грунта, а протеканием химической реакции между раствором щелочи и оцинкованной металлической пластиной — крышкой торцевой части экспериментальной установки. Необходимо отметить, что при визуальном осмотре коррозия металлической крышки, выполняющей роль анода, была минимальной, что скорее всего вызвано оттоком загрязнителя за счет электроосмоса.

Оксидная пленка цинка обладает амфотерными свойствами (способна реагировать как с кислотами, так и с щелочами) и химически растворяется щелочами. После растворения амфотерного оксида в щелочи металл реагирует с водой по схеме взаимодействия активного металла. При этом происходит образование амфотерного гидроксида и выде-

ление водорода. Но на этом процесс не останавливается, далее следует взаимодействие

амфотерного гидроксида со щелочью.

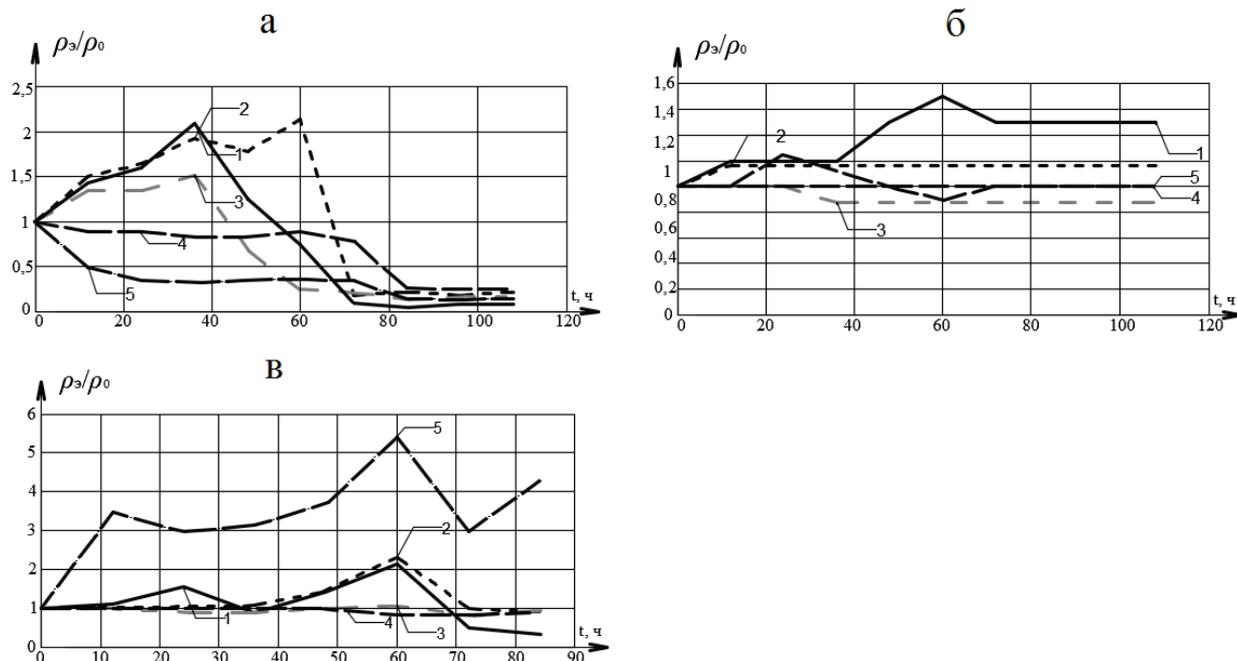


Рис. 4. График изменения относительного УЭС в течение обработки грунта, загрязненного едким натрием NaOH по датчикам 1–5: а — едкий натрий с концентрацией 1 %; б — с концентрацией 4 %; в — с концентрацией 8 %

Таким образом, реакция взаимодействия с металлом снижала плотность раствора щелочи и как следствие, увеличивала УЭС грунта со стороны датчика 5.

3D-зависимости, отражающие описанные выше результаты экспериментов, представлены на рис. 5 и 6.

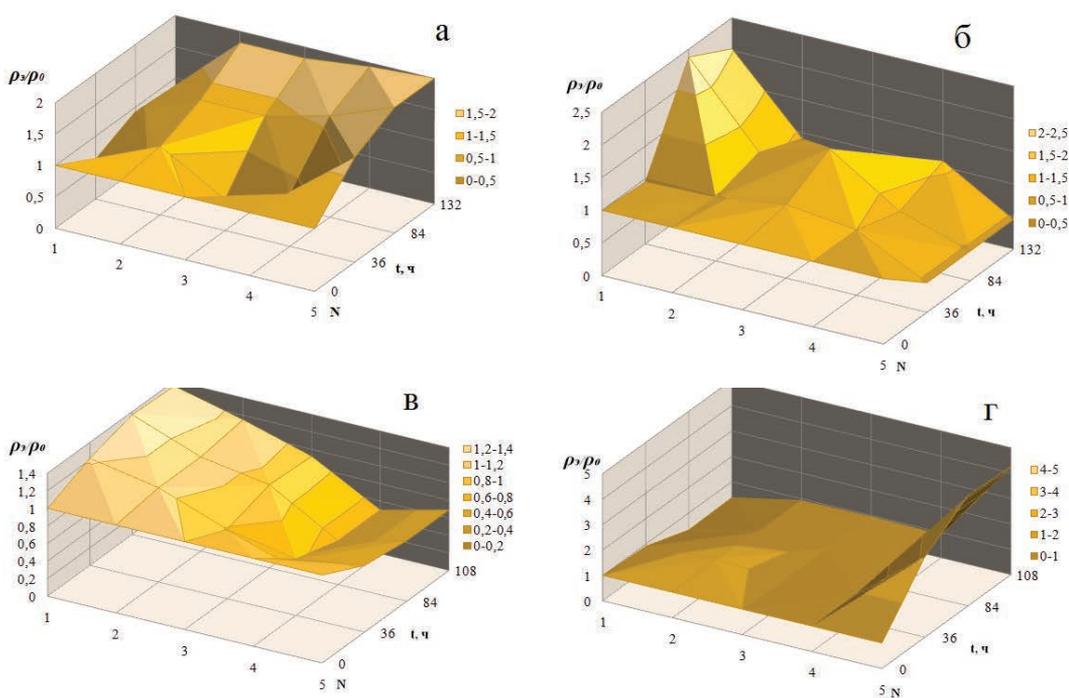


Рис. 5. 3D-зависимости относительного УЭС при обработке грунта, загрязненного раствором H_2SO_4 : а — чистый грунт; б — серная кислота с концентрацией 1 %; в — с концентрацией 4 %; г — с концентрацией 8 %

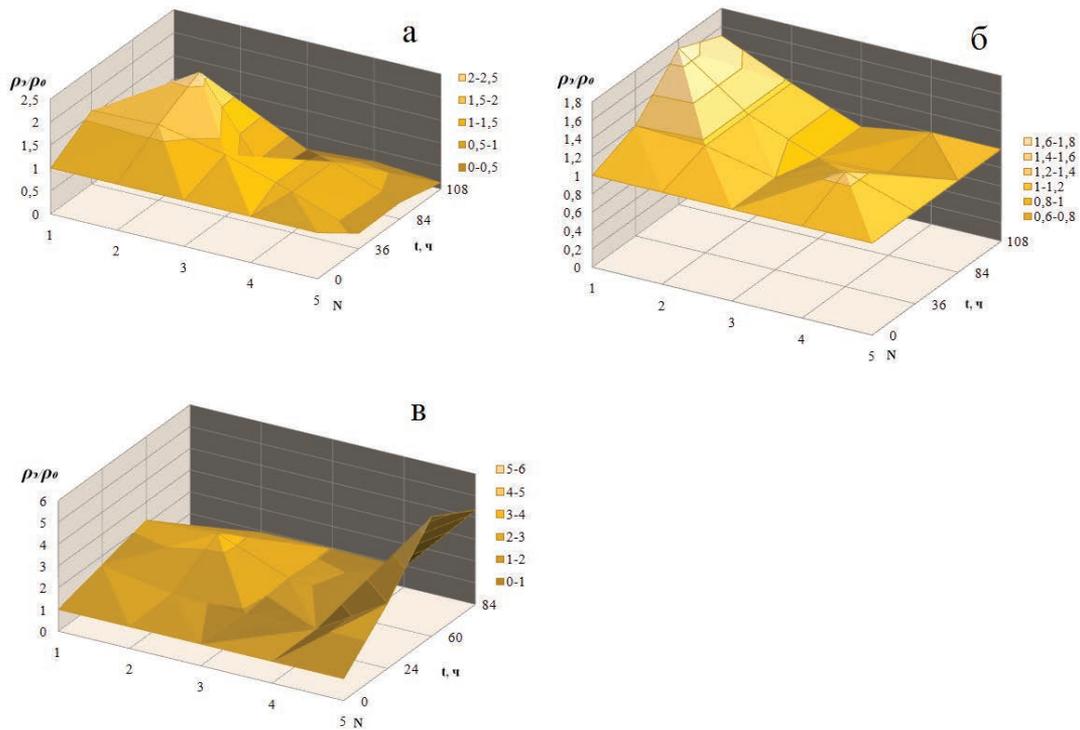


Рис. 6. 3D–зависимость относительного УЭС при обработке грунта, загрязненного раствором NaOH: а — едкий натрий с концентрацией 1 %; б — с концентрацией 4 %; в — с концентрацией 8 %

Изменение физико-механических характеристик образцов грунта в процессе электрообработки приведены в табл. 2.

Таблица 2

Физико-механические характеристики образцов грунта

Рисунки № датчика	Характеристики грунта (до/после обработки)		
	Влажность, %	Плотность в естественном состоянии, г/см ³	Плотность в сухом состоянии, г/см ³
Чистый грунт			
Рис. 3а, № 1	25,62/23,83	1,94/2,15	1,54/1,73
Рис. 3а, № 3	25,62/23,72	1,94/2,08	1,54/1,68
Рис. 3а, № 5	25,62/20,86	1,94/1,65	1,54/1,36
Серная кислота с концентрацией 1 %			
Рис. 3б, № 1	22,05/13,57	1,97/2,00	1,61/1,76
Рис. 3б, № 3	22,05/21,26	1,97/1,93	1,61/1,59
Рис. 3б, № 5	22,05/21,58	1,97/1,71	1,61/1,41
Серная кислота с концентрацией 4 %			
Рис. 3в, № 1	20,77/11,53	2,03/1,78	1,68/1,60
Рис. 3в, № 3	20,77/23,47	2,03/2,07	1,68/1,68
Рис. 3в, № 5	20,77/19,95	2,03/1,96	1,68/1,63

Рисунки № датчика	Характеристики грунта (до/после обработки)		
	Влажность, %	Плотность в естественном состоянии, г/см ³	Плотность в сухом состоянии, г/см ³
Серная кислота с концентрацией 8 %			
Рис. 3г, № 1	13,88/9,03	1,88/1,64	1,65/1,50
Рис. 3г, № 3	13,88/11,81	1,88/1,91	1,65/1,71
Рис. 3г, № 5	13,88/14,97	1,88/1,95	1,65/1,70
Едкий натрий с концентрацией 1 %			
Рис. 4а, № 1	24,29/23,57	2,05/2,13	1,65/1,72
Рис. 4а, № 3	24,29/24,91	2,05/2,03	1,65/1,63
Рис. 4а, № 5	24,29/10,37	2,05/2,01	1,65/1,82
Едкий натрий с концентрацией 4 %			
Рис. 4б, № 1	14,34/10,09	2,10/2,04	2,01/1,85
Рис. 4б, № 3	14,34/9,69	2,10/2,10	2,01/1,92
Рис. 4б, № 5	14,34/4,80	2,10/2,06	2,01/1,97
Едкий натрий с концентрацией 8 %			
Рис. 4в, № 1	12,22/10,34	2,15/2,10	2,02/1,99
Рис. 4в, № 3	12,22/8,52	2,15/2,13	2,02/2,01
Рис. 4в, № 5	12,22/5,86	2,15/2,19	2,02/2,03

Анализ данных табл. 2 показал, что при электрообработке без применения активных дезактивирующих реагентов происходит достаточно сложные физико-химические процессы.

При обработке чистого грунта во всем объеме происходит снижение влажности на 10–20 % за счет удаления влаги при нагревании, особенно интенсивно в прикатодной области. При этом плотность грунта в этой области снижается на величину до 20 %, а в остальном объеме увеличивается на 5–7 %.

При загрязнении грунта кислотой, снижение влажности наблюдается только в прикатодной зоне на величину 30–40 %. В этой же зоне происходит снижение плотности грунта на 8–15 % (при концентрации 4 8 %).

При загрязнении грунта раствором щелочи наибольшее снижение влажности происходило в прикатодной зоне во всем диапазоне концентраций. При этом закономерных изменений плотности грунта не зафиксировано.

Изменение гранулометрического состава образцов грунта в процессе электрообработки представлено в табл. 3.

Физико-механические параметры образцов грунта определены весовым методом. Для изучения гранулометрического состава образцы высушивались и после извлечения из бюксов перемалывались в керамической ступке. Длительность перемалывания для всех образцов выдерживалась одинаковая. Измерения проводились ситовым методом.

Таблица 3

Гранулометрический состав образцов грунта

Рисунки № датчика	Содержание фракций (мм), % (до/после обработки)					
	2	1	0,5	0,25	0,1	<0,1
Чистый грунт						
Рис. 3а, № 1	38,5/20,45	12,13/13,41	11,13/11,59	9,0/9,77	6,5/8,98	22,75/35,80
Рис. 3а, № 3	38,5/22,67	12,13/11,33	11,13/10,49	9,0/9,53	6,5/8,16	22,75/37,82
Рис. 3а, № 5	38,5/0,00	12,13/1,24	11,13/6,62	9,0/12,41	6,5/15,17	22,75/64,55
Серная кислота с концентрацией 1 %						
Рис. 3б, № 1	44,92/35,99	9,59/9,97	8,47/9,77	7,56/8,97	12,08/17,55	17,38/17,75
Рис. 3б, № 3	44,92/40,77	9,59/11,48	8,47/10,71	7,56/9,68	12,08/10,06	17,38/17,29
Рис. 3б, № 5	44,92/5,17	9,59/6,20	8,47/12,92	7,56/13,82	12,08/32,43	17,38/29,46
Серная кислота с концентрацией 4 %						
Рис. 3в, № 1	33,9/15,45	11,19/15,67	10,55/15,45	9,7/12,51	18,66/17,14	15,99/23,79
Рис. 3в, № 3	33,9/42,30	11,19/9,99	10,55/8,93	9,7/7,76	18,66/14,24	15,99/16,79
Рис. 3в, № 5	33,9/5,86	11,19/11,60	10,55/13,43	9,7/12,97	18,66/31,57	15,99/24,57
Серная кислота с концентрацией 8 %						
Рис. 3г, № 1	24,53/16,16	14,03/18,85	12,49/17,01	11,93/14,44	21,33/11,63	15,69/21,91
Рис. 3г, № 3	24,53/20,89	14,03/14,29	12,49/13,20	11,93/13,42	21,33/22,62	15,69/15,58
Рис. 3г, № 5	24,53/18,54	14,03/13,24	12,49/13,45	11,93/14,19	21,33/24,15	15,69/16,42
Едкий натрий с концентрацией 1 %						
Рис. 4а, № 1	1,44/0,85	6,33/5,52	11,33/11,57	19,33/13,80	37,56/26,01	24,00/42,25
Рис. 4а, № 3	1,44/0,55	6,33/3,54	11,33/9,52	19,33/13,07	37,56/42,75	24,00/30,57
Рис. 4а, № 5	1,44/0,53	6,33/2,63	11,33/8,09	19,33/12,61	37,56/42,54	24,00/33,61
Едкий натрий с концентрацией 4 %						
Рис. 4б, № 1	20,05/5,34	9,64/5,44	13,83/9,75	10,57/13,03	25,64/38,71	20,28/27,74
Рис. 4б, № 3	20,05/6,48	9,64/10,38	13,83/12,33	10,57/13,84	25,64/31,68	20,28/25,29
Рис. 4б, № 5	20,05/18,57	9,64/8,11	13,83/9,13	10,57/11,15	25,64/35,88	20,28/17,16
Едкий натрий с концентрацией 8 %						
Рис. 4в, № 1	24,32/13,80	14,54/12,38	13,40/9,11	9,57/17,15	23,04/33,04	15,14/14,51
Рис. 4в, № 3	24,32/15,11	14,54/14,43	13,40/10,30	9,57/13,84	23,04/32,17	15,14/14,42
Рис. 4в, № 5	24,32/17,01	14,54/14,66	13,40/9,06	9,57/15,07	23,04/30,18	15,14/14,02

Анализ данных показал, что наиболее контрастные результаты получены на ситах крупностью 2 мм, 0,1 мм и менее 0,1 мм.

Изучив гранулометрический состав незагрязнённого грунта до электрохимической обработки и после нее, можно сделать вывод,

что процессы, протекающие под воздействием постоянного электрического тока, вызывают «размягчение грунта» с уменьшением содержания крупных частиц (более 2 мм) и увеличением частиц размером менее 0,25 мм. Сильнее всего данный эффект проявляется в районе катода (датчик № 5).

Гранулометрические составы грунтов с содержанием загрязнителя «серная кислота» 1 % и 4 % схожи между собой. Наблюдается тенденция к уменьшению содержания пылеватых частиц (менее 0,1 мм) и увеличению частиц крупностью 0,1–0,25 мм. На датчике № 5 значительно снижено содержание частиц крупностью более 2 мм, но увеличено количество частиц крупностью до 0,25 мм.

В образце глинистого грунта с добавлением 8 % серной кислоты продолжает снижаться содержание частиц более 2 мм и увеличиваться процент частиц размером менее 0,25 мм. Необходимо отметить, что наблюдается инверсия в изменениях грантсостава между датчиками № 1 и № 5. Если в предыдущих опытах происходило увеличение доли пылеватых частиц в районе датчика № 5, то в данном эксперименте описанный эффект наблюдается со стороны датчика № 1. Результаты измерений коррелируют с материалами, представленными на рис. 3, — наибольший рост доли пылеватых частиц происходит в районе датчика, на котором происходит снижение УЭС.

Таким образом, попадание серной кислоты в глинистый грунт приводит к его пластификации (размельчаются крупные зерна), и происходит «слипание» пылеватых частиц.

Добавление едкого натрия в малых концентрациях (1 %, 4 %) очень сильно снижает долю частиц более 2 мм, при этом значительно увеличивая процент содержания частиц 0,1–0,25 мм. Данный эффект объясняется тем, что в сухом виде едкий натр представляет из

себя твердые хрупкие гранулы, и при высыхании в грунте он образует тонкие хрупкие пленки между частицами грунта, которые препятствуют образованию крупных частиц и легко разрушаются при перемалывании.

Увеличение концентрации щелочи до 8 %, приводит к образованию более прочных «ячеек», что ведет к снижению содержания пылеватых частиц и увеличению частиц крупностью более 1 мм.

ВЫВОДЫ

Проведенные экспериментальные исследования на одномерной физической модели позволили установить следующее:

– при электроосмотической обработке грунтов, загрязненных неорганическими экотоксикантами в виде растворов кислот и щелочей, в межэлектродном пространстве происходят сложные физико-химические процессы осушения, образования нерастворимых экологически нейтральных соединений, взаимодействия активных веществ с металлом электродов;

– измерение электросопротивлений с использованием микродатчиков позволяет вести детальный мониторинг изменений состояния и свойств грунтов в зоне электрообработки в реальном масштабе времени, при этом пространственно-временные изменения УЭС являются объективным критерием перехода загрязненных грунтов в неактивное состояние.

Исследование проведено в рамках гранта МК-826.2022.1.5 «Диагностирование пространственно-временных вариаций физических свойств зон загрязнения грунтов электрически контрастными экотоксикантами».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фомин А.И., Халявина М.Н. Производственные риски на предприятиях горнодобывающей промышленности мира, угольной промышленности Кузбасса // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. 2020. № 1. С. 59–65.
2. Отто О.В., Шестакова А.М. Эколого-экономический ущерб от деятельности угольной промышленности Кемеровской области // Сборник научных статей международной молодежной школы-семинара «Ломоносовские чтения на Алтае». 2013. С. 333–338.

3. Кутепов Ю.И., Мухина А.С., Мосейкин В.В. Инженерно-геологические и геоэкологические проблемы восстановления нарушенных земель при отвалообразовании на открытой угледобыче в Кузбассе // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 5. С. 5–24.
4. Бортникова Г.А., Межова Л.А. Технология рекультивации территории карьеров биологическим методом рекультивации // Материалы X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Территориальная организация общества и управление в регионах». 2015. С. 142–144.
5. Зеньков И.В., Нефедов Б.Н., Сибирякова О.В., Кирюшина Е.В., Вокин В.Н. Экономика рекультивации. Инновационные технологии горнотехнической рекультивации породных отвалов // Уголь. 2013. № 12 (1053). С. 94–95.
6. Добротина Е.Д., Тешебаев Ш.Б. Полевой метод комплексной оценки антропогенного загрязнения почв и грунтов на территориях автономных поселений в Арктике // Проблемы Арктики и Антарктики. 2009. № 1 (81). С. 116–125.
7. Езкан М.Х., Гюркан Р., Узкан А., Акчай М. Определение марганца и свинца в образцах придорожного грунта методом пламенной атомно-абсорбционной спектроскопии с использованием ультразвукового выщелачивания // Журнал аналитической химии. 2005. Т. 60. № 5. С. 529.
8. Андреева Т.А. Характеристика сточных вод обогатительных фабрик и методы очистки сточных вод обогатительных фабрик // Химия и химическая технология: достижения и перспективы. 2018. С. 502.1–502.4.
9. Морозов В.В., Пестряк И.В., Эрдэнэзуул Ж. Влияние концентрации неионогенного собирателя — аллилового эфира амилксантогеновой кислоты на флотацию медно-молибденовых руд // Цветные металлы. 2018. № 11. С. 14–20.
10. Воскобойникова И.В., Кириленко А.А. Анализ почвенно-химических показателей ландшафтно-рекреационных территорий г. Ейска // Материалы X Международной научно-практической конференции «Экологическая безопасность региона». 2021. С. 26–30.
11. Патент RU 106748 U1 Российская Федерация, МПК G01N 15/00. Фильтрационно-адсорбционный прибор / Тельминов И.В., Клемушина Л.А., Невзоров А.Л., Айзенштадт А.М.; правообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Северный (Арктический) федеральный университет» — № 2011111845/28; заявл. 29.03.2011; опубл. 20.07.2011.
12. Шабанов Е.А., Простов С.М., Гуцал М.В. Исследование физических свойств грунтов при электроосмотической обработке // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2015. № 1 (107). С. 3–7.
13. Шабанов Е.А., Простов С.М., Гуцал М.В. Метод оценки загрязнения нефтепродуктами по электрическим свойствам грунтов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2015. № 6 (112). С. 38–45.
14. Шабанов Е.А., Простов С.М. Натурные испытания метода контролируемой электрохимической очистки грунта от нефтезагрязнений. Ч.I. изменение физических свойств грунтового массива // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2016. № 6 (118). С. 35–44.
15. Хямяляйнен В.А., Простов С.М. Электрическое поле при фильтрации инъекционного раствора // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1995. № 4. С. 52–56.
16. Khyamyalyainen V.A., Prostov S.M., Syrkin P.S. Electrical resistivity of cemented cracked rocks // Journal of Mining Science. 1995. Vol. 31. No. 5. P. 360–363.
17. Prostov S.M., Khyamyalyainen V.A., Bakhaeva S.P. Interrelation among electrophysical properties of clay rocks, their porosity and moisture saturation // Journal of Mining Science. 2006. Vol. 42. No. 4. P. 349–359.

18. Prostov S.M., Bakhaeva S.P., Smirnov N.A. Prediction of physico-mechanical properties of hydraulic fill based on electrical sounding // Journal of Mining Science. 2015. Vol. 51. No. 1. P. 55–62.

19. Prostov S.M., Gerasimov O.V., Nikulin N.Y. Properties of clayey soils subject to local hydrofracking and stabilization by injection of cement-sand grout // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2015. Vol. 52. No. 2. P. 88–94.

20. Prostov S.M., Nikulin N.Y. Mechanisms of change in physical properties of soil under experimental electrochemical reinforcement // Journal of Mining Science. 2015. Vol. 51. No. 5. P. 908–916.

21. Шабанов Е.А., Простов С.М., Вахьянов Е.М. Исследование электропроводности пористых влагонасыщенных грунтов, загрязненных неорганическими экотоксикантами // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. 2021. № 4. С. 87098.

DOI: 10.25558/VOSTNII.2022.82.82.011

UDC 504.064: 622.02

© E.A. Shabanov, S.M. Prostov, E.M. Vakhyanov, 2022

E.A. SHABANOV

Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor of Department
KuzSTU, Kemerovo
e-mail: evgenshab@mail.ru

S.M. PROSTOV

Doctor of Engineering Sciences,
Professor of Department
KuzSTU, Kemerovo
e-mail: psm.kem@mail.ru

E.M. VAKHYANOV

Senior Lecturer of Department
KuzSTU, Kemerovo

EXPERIMENTAL STUDY OF PHYSICAL PROPERTIES OF SOILS DURING ELECTROOSMOTIC CLEANING OF ACID AND ALKALI SOLUTIONS IN ONE-DIMENSIONAL MODEL

The work investigated the regularities of changes in the physical properties of soils contaminated with solutions of acid and alkali with a concentration of 1–8 %, when treated with a constant homogeneous electric field in a one-dimensional electrical model. The following parameters were recorded in the interelectrode space: specific electrical resistivity, humidity, density, grain size distribution. It was established that during electroosmotic processing complex physicochemical processes of drying, formation of insoluble ecologically neutral compounds, interaction of active substances with electrode metal occur. Measurement of electrical resistivity using micro-sensors allows to conduct detailed monitoring of changes in the condition and properties of soils in the electric treatment zone in real time, at the same time, space-time changes in ESD are an objective criterion for the transition of contaminated soils to an inactive state.

Keywords: ECOLOGY, SOIL, ELECTROOSMOS, POLLUTION, ACID, ALKALI, ELECTRICAL RESISTANCE, HUMIDITY, DENSITY, PARTICLE SIZE DISTRIBUTION, DECONTAMINATION.

REFERENCES

1. Fomin A.I., Khalyavina M.N. Production risks at the enterprises of the mining industry of the world, the coal industry of Kuzbass // Bulletin of the VostNII Scientific Center for Industrial and Environmental Safety [Vestnik Nauchnogo centra VostNII po promyshlennoj i ekologicheskoj bezopasnosti]. 2020. No. 1. P. 59–65. [In Russ.].
2. Отто О.В., Шестакова А.М. Эколога-экономический ущерб от деятельности угольной промышленности Кемеровской области // Сборник научных статей международной молодежной школы-семинара «Ломоносовские чтения на Алтае». 2013. С. 333–338. [In Russ.].
3. Kutepov Yu.I., Mukhina A.S., Moseikin V.V. Engineering-geological and geocological problems of restoration of disturbed lands during dumping at open-pit coal mining in Kuzbass // Mining information and analytical bulletin [Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten]. 2022. No. 5. P. 5–24. [In Russ.].
4. Bortnikova G.A., Mezhova L.A. Technology of recultivation of the territory of quarries by the biological method of recultivation // Materials of the X All-Russian scientific and practical conference with international participation «Territorial organization of society and management in the regions». 2015. P. 142–144. [In Russ.].
5. Zenkov I.V., Nefedov B.N., Sibiryakova O.V., Kiryushina E.V., Fokin V.N. Economics of reclamation. Innovative technologies of mining and technical recultivation of rock dumps // Coal [Ugol]. 2013. No. 12 (1053). P. 94–95. [In Russ.].
6. Dobrotina E.D., Teshebaev Sh.B. Field method of complex assessment of anthropogenic pollution of soils and soils in the territories of autonomous settlements in the Arctic // Problems of the Arctic and Antarctica [Problemy Arktiki i Antarktiki]. 2009. No. 1 (81). P. 116–125. [In Russ.].
7. Askan M.H., Gyurkan R., Urkan A., Akchay M. Determination of manganese and lead in roadside soil samples by flame atomic absorption spectrometry using ultrasonic leaching // Journal of Analytical Chemistry [Zhurnal analiticheskoy himii]. 2005. Vol. 60. No. 5. P. 529. [In Russ.].
8. Andreeva T.A. Characteristics of wastewater treatment plants and methods of wastewater treatment of processing plants // Chemistry and chemical technology: achievements and prospects [Himiya i himicheskaya tekhnologiya: dostizheniya i perspektivy]. 2018. P. 502.1–502.4. [In Russ.].
9. Morozov V.V., Pestryak I.V., Erdenezuul Zh. Influence of concentration of nonionic collector — allyl ether of amyloxanthogenic acid on flotation of copper-molybdenum ores // Non-ferrous metals [Cvetnye metally]. 2018. No. 11. P. 14–20. [In Russ.].
10. Voskoboinikova I.V., Kirilenko A.A. Analysis of soil and chemical indicators of landscape and recreational territories of Yeysk // Materials of the X International scientific and practical Conference «Ecological safety of the region». 2021. P. 26–30. [In Russ.].
11. Patent RU 106748 U1 Russian Federation, IPC G01N 15/00. Filtration and adsorption device / Telminov I.V., Klemushina L.A., Nevzorov A.L., Aisenstadt A.M.; copyright holder Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Professional Education «Northern (Arctic) Federal University» — No. 2011111845/28; application 29.03.2011; publ. 20.07.2011. [In Russ.].
12. Shabanov E.A., Prostov S.M., Gutsal M.V. Investigation of physical properties of soils during electroosmotic treatment // Bulletin of the Kuzbass State Technical University [Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta]. 2015. No. 1 (107). P. 3–7. [In Russ.].
13. Shabanov E.A., Prostov S.M., Gutsal M.V. Method of assessment of oil pollution by electrical properties of soils // Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2015. No. 6 (112). P. 38–45. [In Russ.].
14. Shabanov E.A., Prostov S.M. Full-scale tests of the method of controlled electrochemical soil purification from oil pollution. Part I. change of physical properties of the soil mass // Bulletin of the Kuzbass State Technical University [Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta]. 2016. No. 6 (118). P. 35–44. [In Russ.].

15. Khamalyainen V.A., Prostov S.M. Electric field during filtration of injection solution // Physical and technical problems of mineral development [Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh]. 1995. No. 4. P. 52–56. [In Russ.].

16. Khyamyalyainen V.A., Prostov S.M., Syrkin P.S. Electrical resistivity of cemented cracked rocks // Journal of Mining Science. 1995. Vol. 31. No. 5. P. 360–363.

Prostov S.M., Khyamyalyainen V.A., Bakhaeva S.P. Interrelation among electrophysical properties of clay rocks, their porosity and moisture saturation // Journal of Mining Science. 2006. Vol. 42. No. 4. P. 349–359.

17. Prostov S.M., Bakhaeva S.P., Smirnov N.A. Prediction of physico-mechanical properties of hydraulic fill based on electrical sounding // Journal of Mining Science. 2015. Vol. 51. No. 1. P. 55–62.

18. Prostov S.M., Gerasimov O.V., Nikulin N.Y. Properties of clayey soils subject to local hydrofracking and stabilization by injection of cement-sand grout // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2015. Vol. 52. No. 2. P. 88–94.

19. Prostov S.M., Nikulin N.Y. Mechanisms of change in physical properties of soil under experimental electrochemical reinforcement // Journal of Mining Science. 2015. Vol. 51. No. 5. P. 908–916.

20. Shabanov E.A., Prostov S.M., Vasyanov E.M. Investigation of electrical conductivity of porous moisture-saturated soils contaminated with inorganic ecotoxicants // Bulletin of the Scientific Center of VostNII on Industrial and Environmental Safety [Vestnik Nauchnogo centra VostNII po promyshlennoj i ekologicheskoj bezopasnosti]. 2021. No. 4. P. 87–98. [In Russ.].

**Оформление подписки на журнал «Вестник Научного центра
ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности»
осуществляется через Агентство подписки «Урал-Пресс Кузбасс»**

Подписной индекс 80814