

DOI: 10.25558/VOSTNII.2021.20.11.006

УДК 613.63: 612.2: 622.276.55

© А.И. Фомин, А.Е. Жуйков, Т.В. Грунсковой, 2021

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



ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ПОРИСТЫХ ВЛАГОНАСЫЩЕННЫХ ГРУНТОВ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ НЕОРГАНИЧЕСКИМИ ЭКОТОКСИКАНТАМИ

В статье обоснована актуальность развития методов оперативного диагностирования участков грунтов, загрязненных растворами кислот и щелочей. Рассмотрены основные теоретические зависимости электропроводящих свойств от параметров грунтового массива. Приведена база данных структурных параметров порового пространства грунтов для условий Кемеровской области – Кузбасса. Определены электропроводящие свойства растворов с различным содержанием солей, кислот и щелочей. Сформирована база данных и регрессионных зависимостей для интерпретации результатов экспериментальных зондирований при контроле изменения отношения объема загрязнителя и объема порового пространства в зависимости от удельного электрического сопротивления. Установлено, что при увеличении концентрации кислот и щелочей в растворе происходит монотонное уменьшение удельного электрического сопротивления, эта закономерность является физической основой метода диагностирования зон загрязнения и контроля процессов их дезактивации.

Ключевые слова: ЭКОЛОГИЯ, ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА, УДЕЛЬНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ, ЭКОТОКСИКАНТЫ, ЗАГРЯЗНЕНИЕ.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время вопросам экологии уделяется особое внимание, так как возросла нагрузка на окружающую среду в результате интенсивного антропогенного воздействия различных отраслей промышленности [1–3]. В промышленно развитых регионах Российской Федерации особо остро стоит вопрос загрязнения почвы и грунтов. Наибольшее влияние на нарушение биологического баланса почвы оказывает химическое загрязнение. Его основные источники — промышленность, сельское хозяйство и транспорт [4–6]. Воздействие этих отраслей человеческой деятельности может привести к усталости почвы, снижению ее плодородия. Химические загрязнители грунтов в результате промышленной деятельности могут проникать через сельскохозяйственные культуры, а затем попадать в организмы животных и людей. Они также могут оказывать прямое влияние на загрязнение поверхностных и подземных вод в результате вымывания вредных веществ из грунтов.

Значительная часть экотоксикантов являются электрически контрастными веществами. Например, все нефтепродукты проявляют ярко выраженные диэлектрические свойства, а фенол, формальдегид, кислоты являются электролитами и имеют низкое электросопротивление. Поэтому участки загрязнения представляют собой аномальные электрически контрастные зоны, которые можно диагностировать методами электроразведки, георадиолокации и другими геофизическими методами.

В горнодобывающей промышленности активно используются щелочные и кислотные аккумуляторы (автомобильный, подземный железнодорожный транспорт, индивидуальные светильники и др.), при обслуживании которых имеет место утечки электролитов, также являющиеся экотоксикантами.

Активное загрязнение грунтов щелочными и кислотосодержащими экотоксикантами происходит при применении технологий подземного выщелачивания, гидроразрыва пластов, складировании отходов обогатительных фабрик.

Для мониторинга загрязнений грунтов применяют прямые и косвенные инструментальные методы. Прямые методы (инфракрасной спектрофотометрии, ультрафиолетовой люминесценции, газовой и газо-жидкостной хроматографии) предусматривают наличие сложной аппаратуры, значительную продолжительность анализа и обязательное извлечение пробы грунта, при этом погрешность измерений может достигать 40–50 %. В связи с вышеизложенным возрастает роль количественной оценки содержания загрязнителей в грунте косвенным геофизическим методом с помощью измерения электрических параметров грунта.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основная физическая предпосылка метода контроля состоит в том, что все кислоты и щелочи (электролит в аккумуляторе и т. д.) проявляют электрическую контрастность, обладают относительно низким электрическим сопротивлением. Эффективное удельное электросопротивление (УЭС) данных жидкостей в зависимости от концентрации изменяется в диапазоне $\rho = 0,01-1$ Ом·м, в то время как для природных минеральных растворов этот диапазон составляет $\rho = 1-100$ Ом·м. УЭС влагонасыщенной горной породы, которая представляет собой трехфазную среду, определяется с помощью классической эмпирической зависимости, исследуемой в электроразведке:

$$\rho_k = \frac{\alpha K_n}{m \beta W \gamma} \rho_v, \quad (1)$$

где m — пористость (поровая пустотность); W — коэффициент влагонасыщения пространства пор и трещин; ρ_v — УЭС раствора, заполняющего поровое пространство, Ом·м; K_n , α , β , γ — эмпирические параметры, зависящие от структурно-текстурных особенностей исследуемых грунтов (пород); K_n — параметр, учитывающий поверхностную проводимость глинистого микрослоя на поверхности пор; α — параметр, зависящий от типа геологического отложения; β — параметр, определяемый структурой порового пространства (в

основном извилистостью каналов); γ — параметр, зависящий от смачиваемости раствором поверхности пор.

Величина параметров K_n и α для угленосных и углевмещающих отложений одного типа может быть принята равной 1. Параметр β зависит от структуры порового пространства и для уплотненных несвязных грунтов изменяется в диапазоне $\beta = 1,3-2,2$;

параметр γ определяется степенью смачиваемости поверхности твердой фазы и изменяется в диапазоне $\gamma = 1,8-3,5$. Диапазоны значений параметров β и γ , получены путем обратных расчетов с использованием банка экспериментальных данных ρ_k/ρ_b , а также усредненных значений физико-технических параметров m и W для основных видов глинистых грунтов Кузбасса (табл. 1).

Таблица 1

Прогнозные значения структурных параметров β и γ

| Вид грунта | Параметр β | | | | | | | | | |
|-------------------|--------------------------------------|------|------|--|------|------|-------------------------------------|------|------|------|
| | Супеси ($m = 0,314; W = 0,187$) | | | Суглинки ($m = 0,296; W = 0,227$) | | | Глины ($m = 0,324; W = 0,189$) | | | |
| Параметр γ | 1,80 | 2,20 | 2,60 | 1,80 | 2,20 | 2,60 | 1,80 | 2,20 | 2,60 | |
| ρ_k/ρ_b | 10,0 | 0,59 | 1,15 | 1,72 | 0,30 | 0,79 | 1,27 | 0,62 | 1,21 | 1,80 |
| | 5,0 | 1,18 | 1,74 | 2,32 | 0,87 | 1,36 | 1,84 | 1,23 | 1,82 | 2,41 |
| | 2,0 | 1,96 | 2,51 | 3,13 | 1,62 | 2,11 | 2,60 | 2,05 | 2,64 | 3,23 |
| | 1,5 | 2,20 | 2,77 | 3,34 | 1,69 | 2,35 | 2,83 | 2,30 | 2,89 | 3,84 |
| | 1,2 | 2,40 | 2,95 | 3,53 | 2,04 | 2,53 | 3,02 | 2,50 | 3,09 | 4,46 |

Для оценки содержания загрязнителя в поровой жидкости целесообразно использовать теоретическую зависимость гармонического средневзвешенного для двухкомпонентной среды, что позволит с большой достоверностью рассчитать искомую величину:

$$\frac{1}{\rho_b} = \frac{V_3}{\rho_3} + \frac{V_n}{\rho_n} = \frac{V_3}{\rho_3} + \frac{1 - V_3}{\rho_n} = \frac{V_3 \cdot \rho_n + \rho_3 - V_3 \cdot \rho_3}{\rho_3 \cdot \rho_n}, \quad (2)$$

где V_3, V_n — соответственно, объемные доли загрязнителя и природной влаги в заполнители пор; ρ_3, ρ_n — соответственно, УЭС загрязнителя и природной влаги.

Теоретические зависимости (1) и (2) принципиально позволяют оценивать степень загрязнения грунта по результатам единичных замеров, продольных и площадных электрических зондирований.

Для дальнейшего анализа физических процессов загрязнения грунтов необходимы сведения об электрофизических свойствах природных водных растворов и жидкостей, содержащих загрязняющие вещества и насыщающих грунты. Проведены экспериментальные исследования электрических свойств растворов электролитов, содержащих кислоты и щелочи, с измерением на постоянном и переменном электрическом токе.

Для измерений была подготовлена установка, состоящая из емкости для растворов из токонепроводящего материала, с помощью четырехэлектродного микродатчика были произведены замеры истинного УЭС на постоянном токе каротажным прибором КП-2 и на переменном токе, с помощью низкочастотного генератора и мультиметров (рис. 1). Расстояние между контактами микродатчика $AM = MN = NB = 10 \text{ мм} = a$.

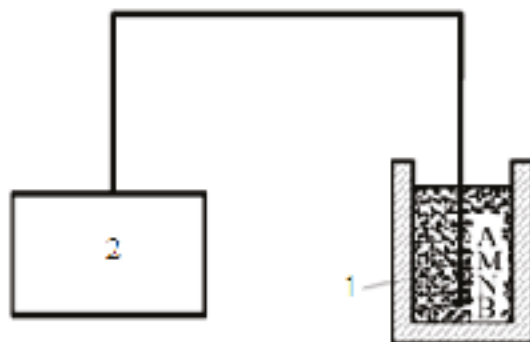


Рис. 1. Схема измерительной установки на постоянном токе: 1 — четырехэлектродный датчик; 2 — каротажный прибор КП-2

Величину УЭС раствора вычислили по формуле:

$$\rho = K \frac{\Delta U}{I} \quad (3)$$

где K — геометрический коэффициент установки, определяемый из соотношения

$K = \frac{4\pi}{\frac{1}{AM} + \frac{1}{AN} + \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}}$; ΔU — падение напряжения на электродах AN, B ; I — ток через питающие электроды AB, A .

Для датчика на рис. 1 $K = 4\pi a$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлены результаты измерений УЭС ρ раствора $NaCl$ в зависимости от концентрации соли в растворе и частоты переменного тока. На рис. 3 представлена взаимосвязь УЭС концентрированных растворов кислоты и щелочи от частоты переменного тока, при этом установлено, что УЭС растворов щелочи и кислоты находится в диапазоне $10^{-1}-10^{-2}$, что указывает на их контрастность по отношению к природным водным растворам.

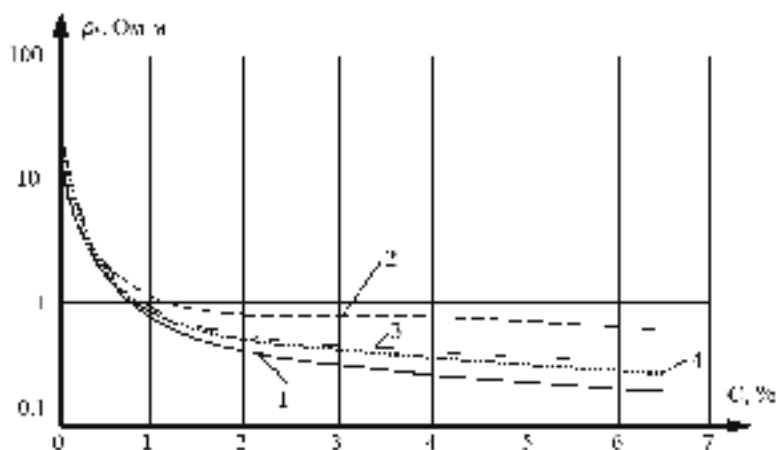


Рис. 2. Зависимость УЭС раствора ρ_3 от концентрации соли C в растворе: 1 — постоянный ток; 2 — переменный ток, $f=10 \text{ Гц}$; 3 — 200 Гц ; 4 — 1000 Гц

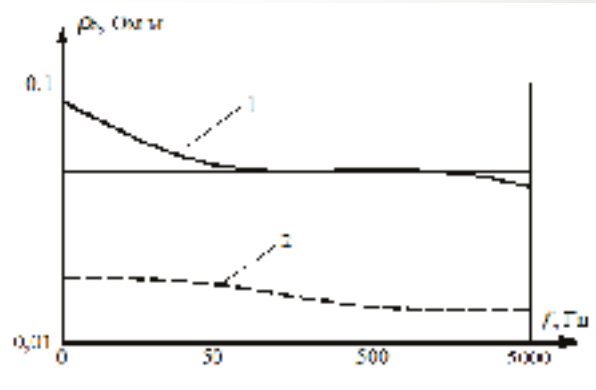
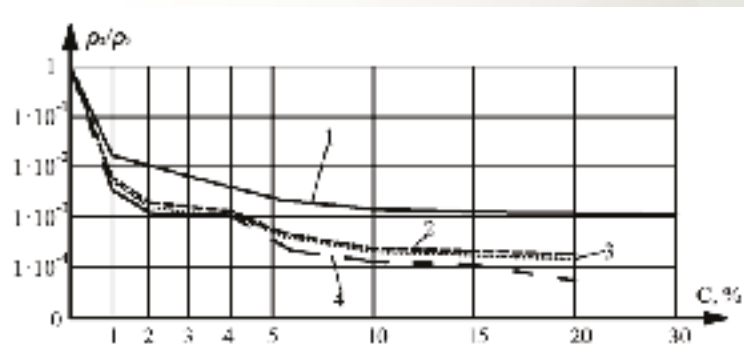


Рис. 3. Зависимость УЭС ρ_3 кислоты и щелочи от частоты переменного тока:
1 — серная кислота (H_2SO_4); 2 — щелочь (NaOH)

При увеличении концентрации кислоты и щелочи в водном растворе происходит уменьшение УЭС, таким образом, что при концентрации более 8 %, УЭС меняется незначительно

(рис. 4). На рисунке приведены зависимости абсолютных значений ρ_3 и УЭС раствора кислоты и щелочи от их концентрации.

а



б

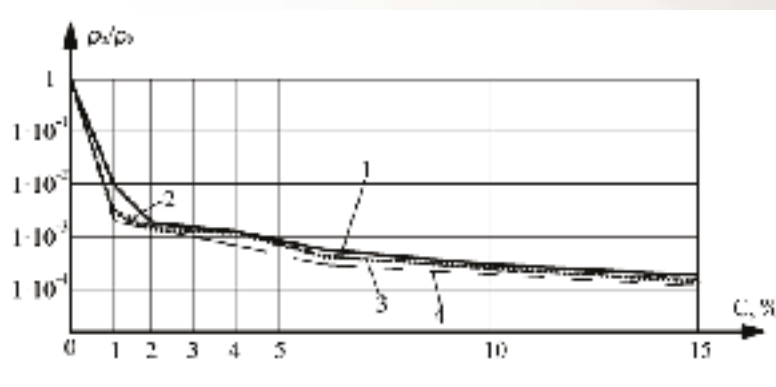


Рис. 4. Зависимость УЭС раствора ρ_3 от концентрации кислоты (а) и щелочи (б) в растворе:
1 — постоянный ток; 2 — переменный ток, $f = 50$ Гц; 3 — 500 Гц; 4 — 5000 Гц

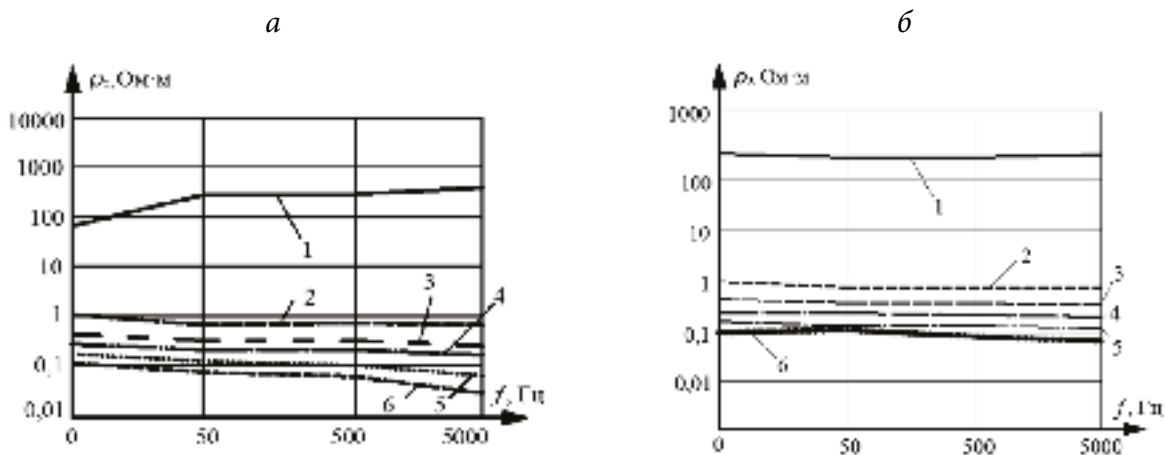


Рис. 5. Зависимость УЭС ρ_s раствора воды с щелочью (а) и кислотой (б) различной концентрации от частоты переменного тока f : 1 — чистая вода; 2 — $C = 2\%$; 3 — $C = 4\%$; 4 — $C = 6\%$; 5 — $C = 10\%$; 6 — $C = 15\%$

Подстановкой в уравнение (2) экспериментальных данных, приведенных на рис. 4 и рис. 5, получены зависимости средних значений ρ_v от относительного содержания загрязнителя V_3/V_n для постоянного (рис. 6) и переменного (рис. 7) токов.

Приведенные зависимости позволили сформировать базу данных для интерпретации результатов экспериментальных зондирований при контроле изменения отношения V_3/V_n по величине ρ_k .

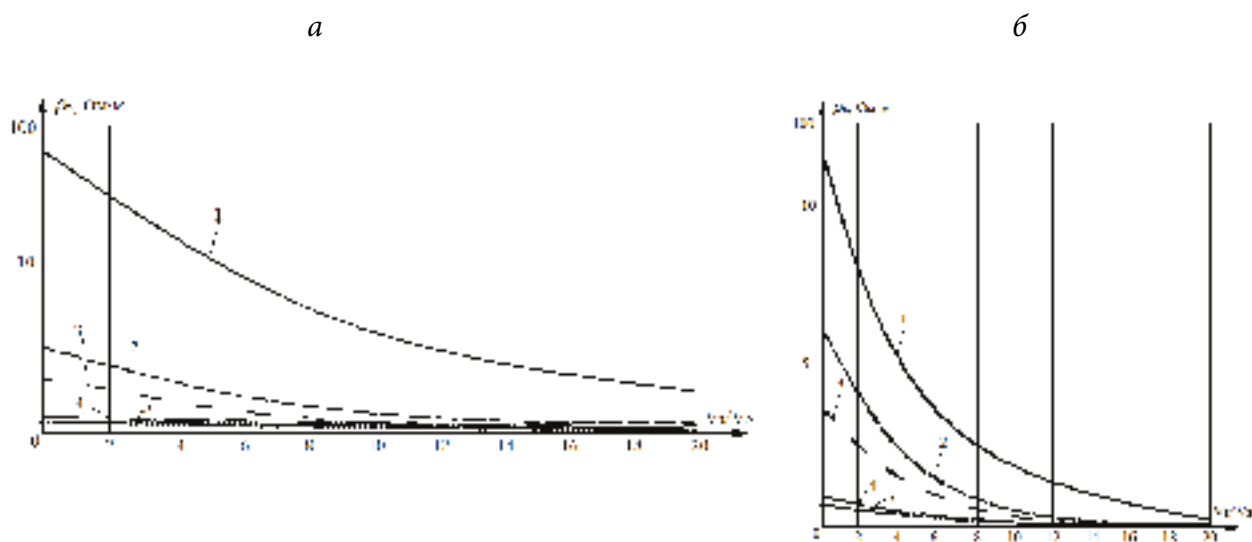


Рис. 6. Зависимость средних значений ρ_s от относительного содержания кислоты (а) и щелочи (б) при измерении на постоянном токе: 1 — концентрация соли в растворе $C = 2$ г/л; 2 — $C = 5$ г/л; 3 — $C = 10$ г/л; 4 — $C = 30$ г/л

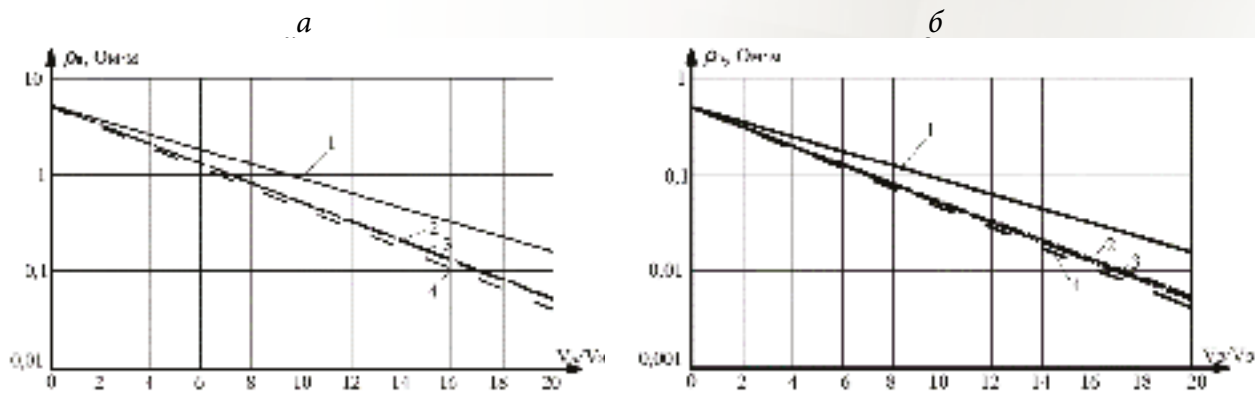
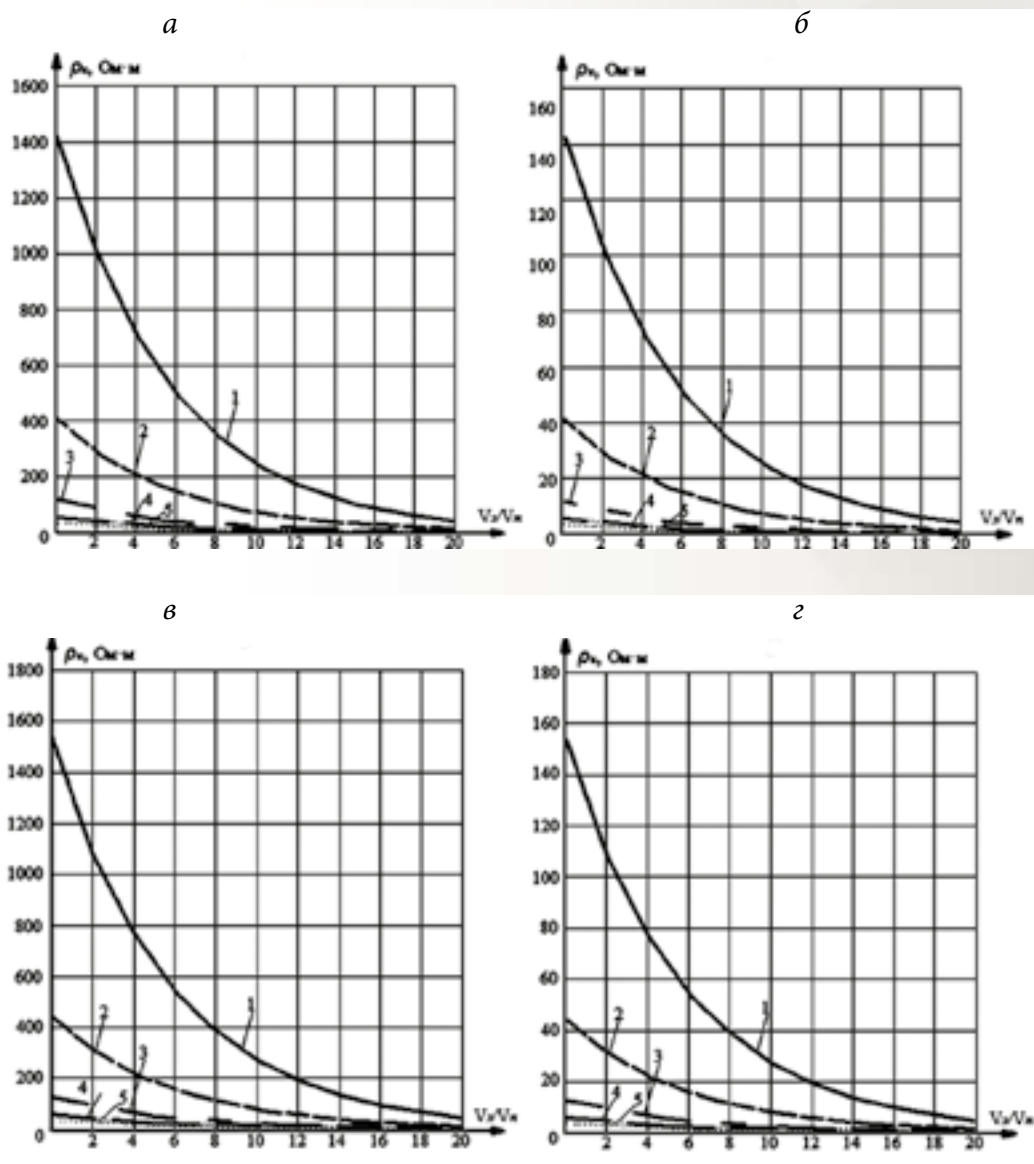


Рис. 7. Зависимость средних УЭС от частоты переменного тока и концентрации кислоты (а) и щелочи (б) в электролите при $C = 0,2$ г/л; 3 г/л: 1 — $f = 0$ Гц; 2 — 50 Гц; 3 — 500 Гц; 4 — 5000 Гц

С учетом средних значений диапазонов структурных параметров β и γ , приведенных в табл. 1, рассчитаны зависимости измене-

ния эффективного УЭС основных глинистых грунтов четвертичных отложений Кузбасса, частично представленные на рис. 8 и 9.



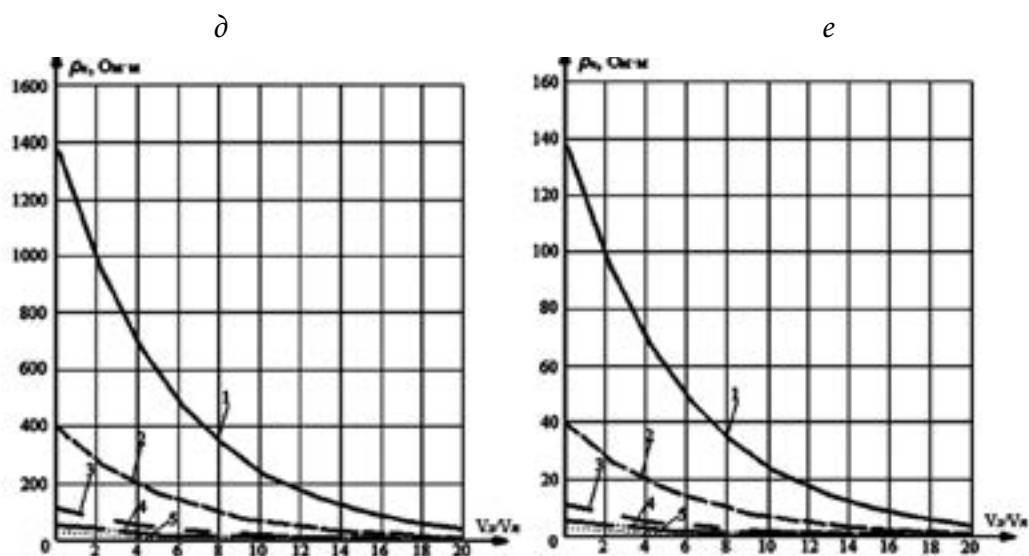
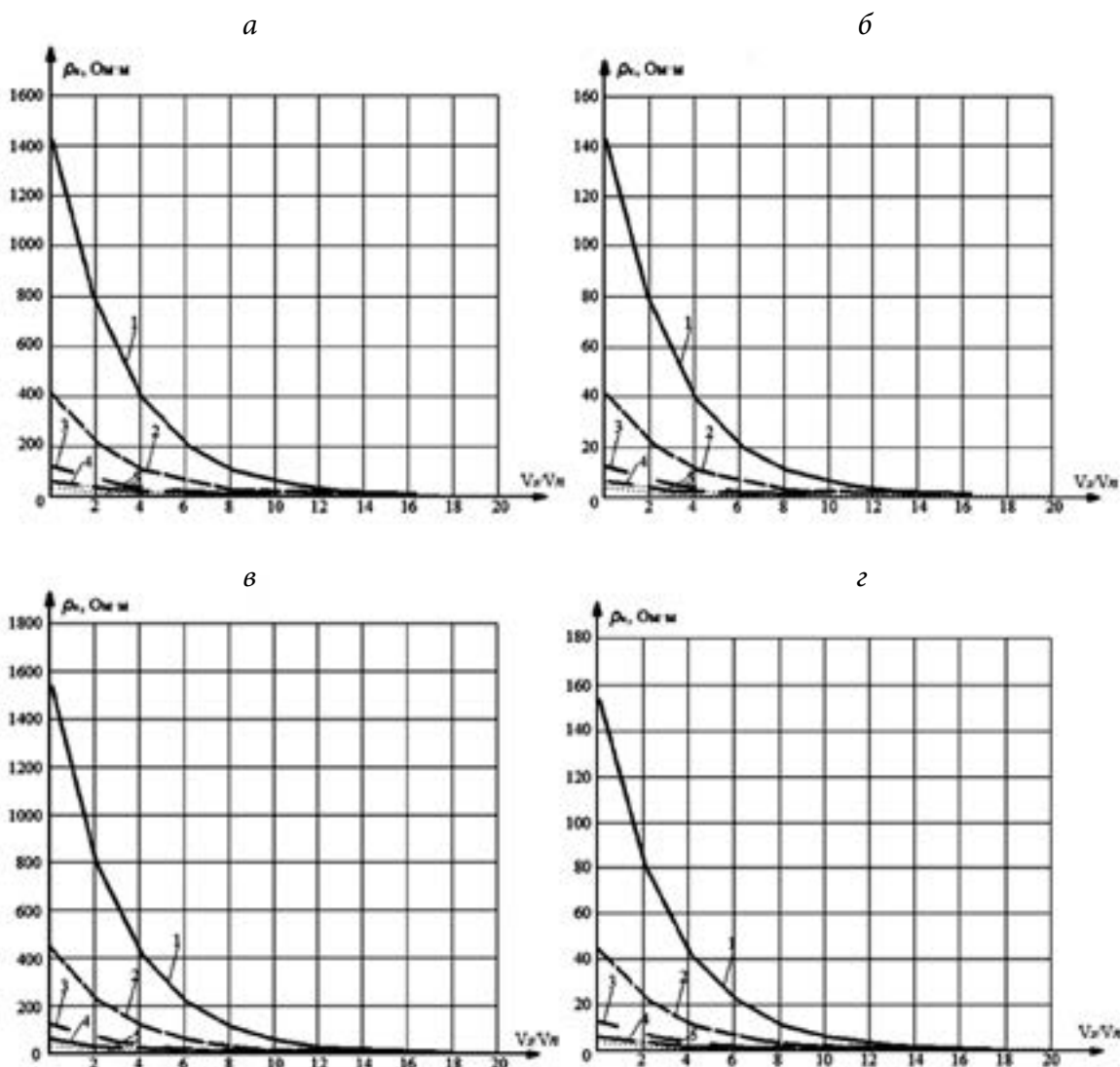


Рис. 8. Зависимости эффективного УЭС ρ_k грунтов Кузбасса от коэффициента влагонасыщения пространства пор и трещин W , относительного содержания кислоты в средневзвешенном V_n/V_3 и концентрации соли в электролите C , г/л: супесей — $C = 0,2$ (а), $C = 3$ (б); суглинков — $C = 0,2$ (в), $C = 3$ (г); глин — $C = 0,2$ (д), $C = 3$ (е): 1 — $W = 0,1$; 2 — $W = 0,2$; 3 — $W = 0,4$; 4 — $W = 0,6$; 5 — $W = 0,8$



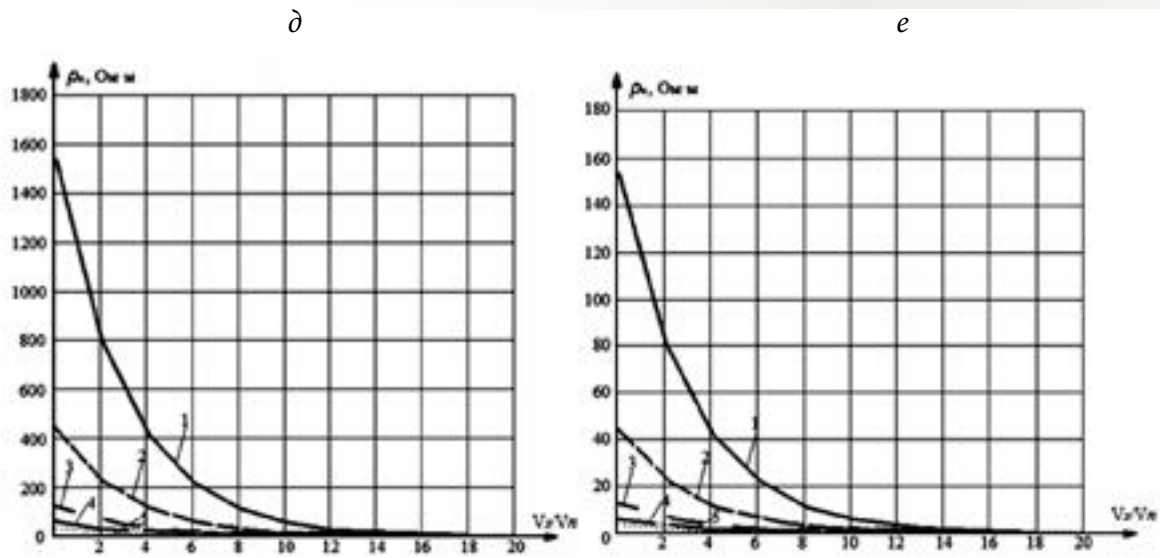


Рис. 9. Зависимости эффективного УЭС ρ_a грунтов Кузбасса от коэффициента влагонасыщения пространства пор и трещин W , относительного содержания щелочи в средневзвешенном V_n/V_s и концентрации соли в электролите C , г/л: супесей — $C = 0,2$ (а), $C = 3$ (б); суглинков — $C = 0,2$ (в), $C = 3$ (г); глин — $C = 0,2$ (д), $C = 3$ (е): 1 — $W = 0,1$; 2 — $W = 0,2$; 3 — $W = 0,4$; 4 — $W = 0,6$; 5 — $W = 0,8$

ВЫВОДЫ

Результаты проведенных исследований позволили установить следующее:

- при концентрации более 1 % растворы кислот и щелочей являются электрически контрастными по отношению к природным растворам;
- с учетом структурных параметров основных типов песчано-глинистых грунтов Кузбасса накоплен банк данных для диагно-

стирования зон загрязнения неорганическими экотоксикантами по отрицательным аномалиям удельного электросопротивления.

Исследование проведено в рамках гранта МК-1212.2020.5 «Геолого-геофизический мониторинг процессов электрохимической очистки грунтовых оснований сооружений от нефтяных загрязнений».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Strelnikova Ju.Yu. Psychological consequences of anthropogenic and natural emergencies impact on the employees of extreme profile professions // In the World of Scientific Discoveries, Series A. 2015. Vol. 3. No. 2. P. 155–167.
2. Popova A., Popova V. Change of Quercus robur L. Acorns seedlings cytogenetic parameters under anthropogenic impact // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Forestry Forum «Forest ecosystems as global resource of the biosphere: calls, threats, solutions». 2020. P. 012047.
3. Barlow S.E., O'Neill M.A. Technological advances in field studies of pollinator ecology and the future of e-ecology // Current Opinion in Insect Science. 2020. Vol. 38. P. 15–25.
4. Turkov S.L. Information support for strategic management processes' in geocology and agriculture // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. P. 012042.
5. Kolomyts E.G. Introduction to experimental geocology: results of a scientific inquiry // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2018. Vol. 88. No. 6. P. 482–493.
6. Lopatin D.V., Zhirov A.I. Morphological systematics of the relief and its implications for geography and geocology // Geography and Natural Resources. 2017. Vol. 38. No. 1. P. 30–37.
7. Solovitskiy A., Brel O., Nikulin N., Nastavko E., Meser T. Land resource management as the

ground for mining area sustainable development // E3S Web of Conferences. The Second International Innovative Mining Symposium. 2017.

8. Solovitskiy A., Brel O., Saytseva A., Kaizer Ph. Land-and-ecological problems of Kuzbass mineral resources development // E3S Web of Conferences. 3rd International Innovative Mining Symposium, IIMS 2018: Electronic edition. 2018.

9. Chuncai Z., Guijian L., Ting F., Ruoyu S., Dun W. Leaching characteristic and environmental implication of rejection rocks from Huainan coalfield, Anhui province, China // Journal of Geochemical Exploration. 2014. Vol. 143. P. 54–61.

10. Malitch K.N., Latypov R.M. Cu-isotope systematics of magmatic PGE-Cu-Ni sulfide ores from the Talnakh and Kharaelakh intrusions, Norilsk province (Russia) // Mineralogical Magazine. 2012. Vol. 76. No. 6. P. 2061.

11. Xu X., Li Y., Wang D., Xu N. Effects of simulated acid rain on the photosynthetic physiological characteristics in *Ulva fasciata* under salt stress // Journal of Fisheries of China. 2016. Vol. 40. No. 5. P. 731–739.

12. Litvinovich A.V., Pavlova O.Yu., Lavrishchev A.V., Bure V.M., Salnjikov E. Dynamics of soil Ph after utilization of byproducts of industrial rock processing as a calcareous material in acid soils // Communications in Soil Science and Plant Analysis. 2021. Vol. 52. No. 2. P. 93–101.

13. Prostov S., Shabanov E. Diagnostics of oil pollution zones by electro-physical method // E3S Web of Conferences. The Second International Innovative Mining Symposium. 2017. P. 02007.

14. Prostov S., Shabanov E. Geological-and-geophysical monitoring of electrochemical cleaning of soil from petroleum pollution // E3S Web of Conferences. 3rd International Innovative Mining Symposium, IIMS 2018: Electronic edition. 2018. P. 02002.

15. Prostov S.M., Gucal M.B., Shabanov E.F. Physical basis of the controlled electrochemical treatment of soils from oil products // Chinese Coal in the XXI Century: Mining, Green and Safety. Tais-han Academic Forum – Project on Mine Disaster Prevention and Control. 2014. P. 433–440.

DOI: 10.25558/VOSTNII.2021.41.93.010

UDC 622.874

© E.A. Shabanov, S.M. Prostov, E.M. Vakhyanov, 2021

E.A. SHABANOV

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

S.M. PROSTOV

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

E.M. VAKHYANOV

Senior Lecturer of the Department
KuzSTU, Kemerovo

EXAMINATION OF ELECTRIC CONDUCTIVITY OF POROUS MOISTURE-SATURATED SOILS CONTAMINATED WITH INORGANIC ECOTOXICANTS

The article substantiates the relevance of development of methods of operational diagnostics of soil areas contaminated with solutions of acids and alkalis. Main theoretical dependencies of electroconductive properties on soil massif parameters are considered. The database of structural parameters of soil pore space for conditions of Kemerovo region–Kuzbass is given. Electroconductive properties of solutions with different content of salts, acids and alkalis are determined. A database of data and regression dependencies is formed to interpret the results of experimental probes when controlling the change in the ratio of the pollutant volume and the volume of the pore space depending on the resistivity. It was established that with an increase in the concentration of acids and alkalis in the solution there is a monotonous decrease in the specific electrical resistance, this pattern is the physical basis of the method of diagnosing contamination zones and controlling their deactivation processes.

Keywords: ECOLOGY, ENVIRONMENT, RESISTIVITY, ECOTOXICANTS, POLLUTION.

REFERENCES

1. Strelnikova Ju.Yu. Psychological consequences of anthropogenic and natural emergencies impact on the employees of extreme profile professions // In the World of Scientific Discoveries, Series A. 2015. Vol. 3. No. 2. P. 155–167.
2. Popova A., Popova V. Change of *Quercus robur* L. Acorns seedlings cytogenetic parameters under anthropogenic impact // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Forestry Forum «Forest ecosystems as global resource of the biosphere: calls, threats, solutions». 2020. P. 012047.
3. Barlow S.E., O'Neill M.A. Technological advances in field studies of pollinator ecology and the future of e-ecology // Current Opinion in Insect Science. 2020. Vol. 38. P. 15–25.
4. Turkov S.L. Information support for strategic management processes' in geocology and agriculture // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. P. 012042.
5. Kolomyts E.G. Introduction to experimental geocology: results of a scientific inquiry // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2018. Vol. 88. No. 6. P. 482–493.
6. Lopatin D.V., Zhironov A.I. Morphological systematics of the relief and its implications for geography and geocology // Geography and Natural Resources. 2017. Vol. 38. No. 1. P. 30–37.
7. Solovitskiy A., Brel O., Nikulin N., Nastavko E., Meser T. Land resource management as the ground for mining area sustainable development // E3S Web of Conferences. The Second International Innovative Mining Symposium. 2017.
8. Solovitskiy A., Brel O., Saytseva A., Kaizer Ph. Land-and-ecological problems of Kuzbass mineral resources development // E3S Web of Conferences. 3rd International Innovative Mining Symposium, IIMS 2018: Electronic edition. 2018.
9. Chuncai Z., Guijian L., Ting F., Ruoyu S., Dun W. Leaching characteristic and environmental implication of rejection rocks from Huainan coalfield, Anhui province, China // Journal of Geochemical Exploration. 2014. Vol. 143. P. 54–61.
10. Malitch K.N., Latypov R.M. Cu-isotope systematics of magmatic PGE-Cu-Ni sulfide ores from the Talnakh and Kharaelakh intrusions, Norilsk province (Russia) // Mineralogical Magazine. 2012. Vol. 76. No. 6. P. 2061.
11. Xu X., Li Y., Wang D., Xu N. Effects of simulated acid rain on the photosynthetic physiological characteristics in *Ulva fasciata* under salt stress // Journal of Fisheries of China. 2016. Vol. 40. No. 5. P. 731–739.
12. Litvinovich A.V., Pavlova O.Yu., Lavrishchev A.V., Bure V.M., Salnjikov E. Dynamics of soil Ph after utilization of byproducts of industrial rock processing as a calcareous material in acid soils // Communications in Soil Science and Plant Analysis. 2021. Vol. 52. No. 2. P. 93–101.

13. Prostov S., Shabanov E. Diagnostics of oil pollution zones by electro-physical method // E3S Web of Conferences. The Second International Innovative Mining Symposium. 2017. P. 02007.

14. Prostov S., Shabanov E. Geological-and-geophysical monitoring of electrochemical cleaning of soil from petroleum pollution // E3S Web of Conferences. 3rd International Innovative Mining Symposium, IIMS 2018: Electronic edition. 2018. P. 02002.

15. Prostov S.M., Gucal M.B., Shabanov E.F. Physical basis of the controlled electrochemical treatment of soils from oil products // Chinese Coal in the XXI Century: Mining, Green and Safety. Taishan Academic Forum – Project on Mine Disaster Prevention and Control. 2014. P. 433–440.