

## **ТЕХНОГЕННЫЕ АНОМАЛИИ В РАЙОНЕ СКЛАДИРОВАННЫХ ОТХОДОВ ЗОЛОТОДОБЫЧИ: ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ**

*Татьяна Алексеевна Кулешова*

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, студент 2-го курса магистратуры, тел. (953)794-94-98, e-mail: Kuleshova.nstu@gmail.com

*Наталья Викторовна Юркевич*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)363-91-94, e-mail: YurkevichNV@ipgg.sbras.ru

*Светлана Борисовна Бортникова*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор геолого-минералогических наук, зав. лабораторий, тел. (383)363-91-95, e-mail: BortnikovaSB@ipgg.sbras.ru

*Ольга Петровна Саева*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, тел. (383)363-91-94, e-mail: SaevaOP@ipgg.sbras.ru

Рассматривается хвостохранилище Комсомольского золото-извлекательного завода. Целью работы является исследование состава отходов горнорудного производства и направления миграции дренажа с использованием электротомографии и геохимических методов, а также определение изменчивости электрофизических параметров и состава техногенной среды в зависимости от температуры. Приводятся результаты лабораторного эксперимента по определению концентраций  $CS_2$ ,  $C_2H_6S$ ,  $(CH_3)_2SO$  над поверхностью вещества отходов.

**Ключевые слова:** хвостохранилище, электротомография, лабораторный эксперимент, концентрация.

## **TECHNOGENIC ANOMALIES IN THE ABANDONED TAILINGS OF GOLD MINING: ELECTROPHYSICAL AND GEOCHEMICAL DATA**

*Tatyana A. Kuleshova*

Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia, Master Student, phone: (953)794-94-98, e-mail: Kuleshova.nstu@gmail.com

*Nataliya V. Yurkevich*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)363-91-94, e-mail: YurkevichNV@ipgg.sbras.ru

***Svetlana B. Bortnikova***

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Head of Laboratory, phone: (383)363-91-95, e-mail: BortnikovaSB@ipgg.sbras.ru

***Olga P. Saeva***

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Researcher, phone: (383)363-91-94, e-mail: SaevaOP@ipgg.sbras.ru

The tailing dump of the Komsomolsk gold-mining plant is considered. The aim of the work is to study the composition of mining waste and the directions of migration of drainage using electro-tomography and geochemical methods, as well as determining the variability of electrophysical parameters and composition of the man-made environment depending on temperature. The results of a laboratory experiment to determine the concentrations of  $CS_2$ ,  $C_2H_6S$ ,  $(CH_3)_2SO$  above the surface of the waste substance are given.

**Key words:** tailing, electro-tomography, laboratory experiment, concentration.

Проблема загрязнения окружающей среды токсичными химическими элементами вследствие их миграции из хранилищ отходов горнорудного производства исследуется с середины XX в. и освещается в отечественной и, особенно, зарубежной литературе. Понимание строения хвостохранилищ необходимо для выяснения механизмов переноса химических элементов, выявления процессов формирования геохимических аномалий в зоне влияния горнорудного производства [1-3]. Одним из перспективных подходов к изучению состава хвостохранилищ и путей миграции дренажных растворов в подземные воды является применение электроразведки. За рубежом методы электроразведки получили широкое распространение для выявления структуры хвостохранилищ, оценки направлений просачивания кислых дренажей [5, 6].

Среди российских исследований известны лишь единичные работы, в которых для определения состава хвостохранилищ использовались методы электромагнитного сканирования и вертикального электрического зондирования [4, 7]. Между тем, мониторинг и прогноз состояния хранилищ отходов горнорудного производства требует комплексного подхода с использованием геохимических, гидрологических и геофизических методов. Несмотря на накопленный в этой области зарубежный опыт существует ряд актуальных вопросов интерпретации данных электроразведки при переходе от величин удельного электрического сопротивления к конкретным физическим и химическим параметрам вещества.

В ходе химических реакций в хранящихся отходах горнорудного производства происходит выделение газов разного класса опасности. Динамическое геохимическое опробование вещества позволяет определить, как и с какой интенсивностью изменяются концентрации химических элементов в хвостохранилище, как происходит просачивание дренажа, как токсичные газы выходят на поверхность.

Целью работы является определение изменчивости электрофизических параметров и состава техногенной среды в зависимости от температуры, исследование состава отходов горнорудного производства и направления миграции дренажа с использованием электротомографии и геохимических методов на примере Комсомольского хвостохранилища золото-извлекательного завода (Кемеровская область).

Хвостохранилище представляет собой котловину, заполняющуюся общим стоком золото-извлекательного завода. Количество накопленного материала составляет порядка 1 млн. м<sup>3</sup>. Твердое вещество отходов состоит из кварца, полевого шпата, кальцита и сульфидных минералов (пирит, сфалерит, галенит, пирротин и арсенопирит).

В ходе полевых работ проведено электромагнитное сканирование (ЭМС) северной (неокисленной) и южной (окисленной) частей хвостохранилища аппаратурой «АЭМП-14». Построены геоэлектрические разрезы среды по шести профилям: двум перпендикулярным в северной части хвостохранилища и четырем параллельным в южной части. Применялся метод микроэлектротомографии при помощи аппаратуры «Скала-48», разработанной в лаборатории электромагнитных полей Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Расстановка электродов с шагом 30 см позволяет получить разрешение 15 см, глубина – до 2 м, длина профиля – 14 м, ошибка измерения – 2,5%. Для геохимического опробования выкопаны и опробованы шурфы (глубиной до 2 м) в зонах с наименьшими сопротивлениями среды. Отобраны 34 пробы, и с помощью прибора «Эксперт-001» («Эконикс-Эксперт», Москва) методом потенциометрии измерены физико-химические параметры (рН, Eh) паст, приготовленных при смешивании вещества отходов с водой в соотношении 2:1 в полевых условиях. Для прямых кондуктометрических измерений удельной электропроводности (УЭП) паст использовался портативный прибор «Cond 315i», ошибка измерений которого составляет ±0,5%. В лабораторных условиях определен элементный состав отходов методом РФА-СИ (ИЯФ СО РАН), ошибка измерений – 5-7 %. Содержания серы сульфидной ( $S_{\text{сульфидн}}$ ) и сульфатной ( $S_{\text{сульфатн}}$ ) в отходах определены классическими химическими методами. В лабораторных условиях проведен эксперимент по определению УЭП и состава атмосферного воздуха над пробами вещества отходов с помощью газоанализатора «ГАНК-4».

По результатам электромагнитного сканирования можно отметить, что северная часть хвостохранилища отличается низким распределением сопротивлений от 6 до 7,3 Ом·м. Наблюдается относительно равномерное распределение УЭС по всей площади. Более низкое сопротивление – ближе к озеру, что может быть связано с более высокой влажностью в приповерхностном горизонте. На южной части хвостохранилища значения УЭС выше и варьируется от 10 до 46 Ом·м.

По данным электротомографии (рис. 1) зоны с наиболее низким сопротивлением располагаются на глубине 0-1,5 м. и приурочены к горизонтам с наибольшим содержанием хвостов и связаны либо с высокой проводимостью ске-

лета за счет присутствия сульфидов металлов, либо с проводимостью порового раствора. На глубине от 1,5 до 2,5 м. расположен менее проводящий горизонт, соответствующий выходу коренных пород. На разрезах заметны зоны со средними значениями УЭС, находящиеся под дамбой, вероятно, соответствующие направлению миграции дренажа.

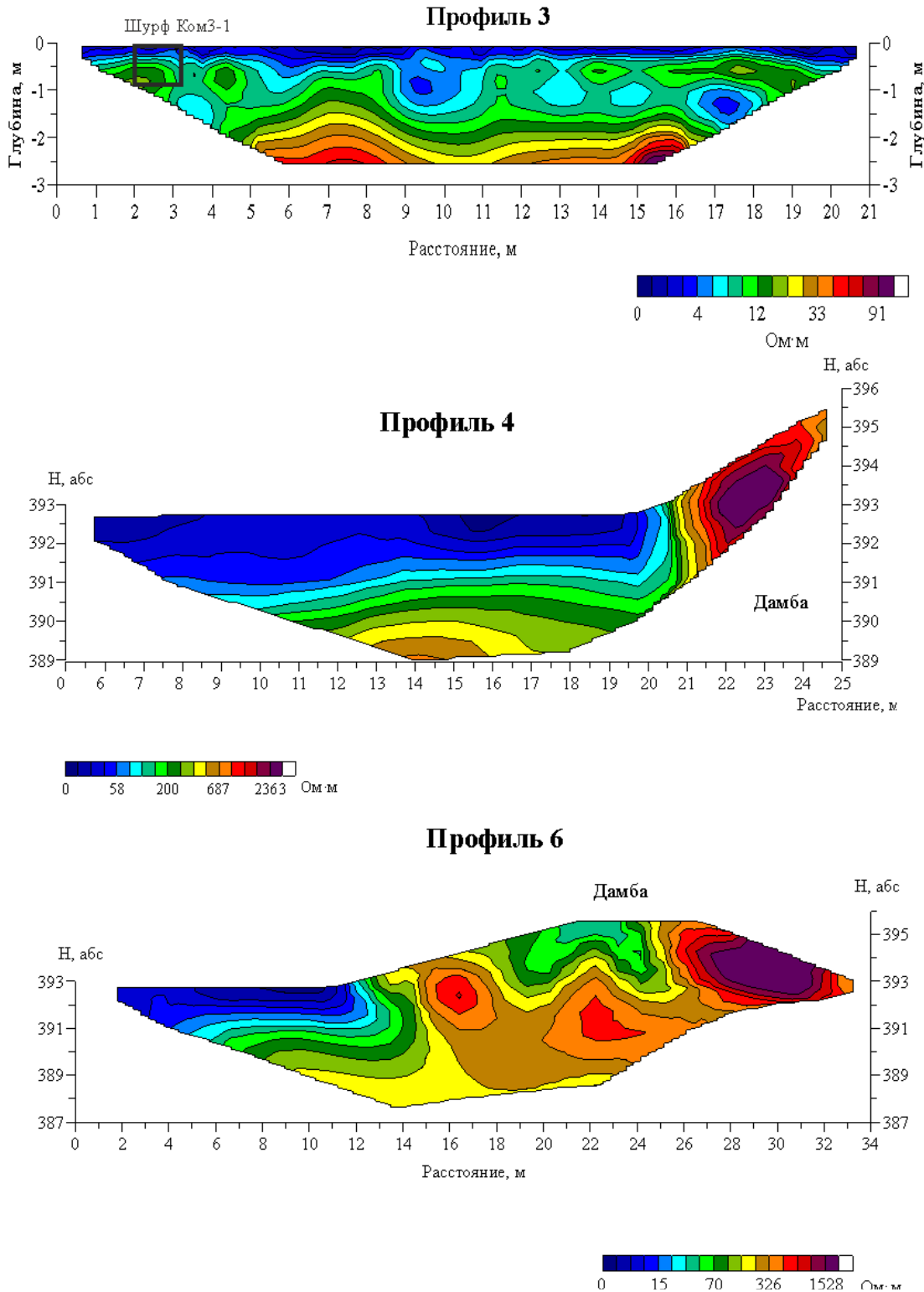


Рис. 1. Результаты микроэлектротомографии по профилям №3, 4, 6

Шурф «Ком 2-3» глубиной 120 см выкопан в северной части хвостохранилища. Потенциометрией измерены  $E_h \approx 250$  мВ и  $pH \approx 7$ , значения pH среды на всех глубинах нейтральны. УЭС по результатам электротомографии и резистивиметрии практически совпадает и на глубине 50 см равно 10 Ом·м. УЭП по данным кондуктометрии обратно пропорционально УЭС и составляет 2000 мкСм/см, что говорит о сходимости результатов этих трех методов.

В южной части хвостохранилища исследован шурф «Ком 3-1» глубиной 80 см. Удельное электрическое сопротивление по данным электротомографии изменяется плавно по всей глубине до 15 Ом·м, по данным резистивиметрии до 40 Ом·м. УЭП изменяется от 2000 до 4000 мкСм/см, на глубине ниже 30 см параметр практически не изменяется и составляет около 2000 мкСм/см.  $E_h$  среды меняется в диапазоне 300-700 мВ, pH среды варьирует от 2 до 6 ед.

Чтобы определить, во сколько раз содержание элементов превышают значения кларков в земной коре, посчитаны коэффициенты концентрирования (КК). Определено, что наибольшие КК характерны для элементов с низкой распространенностью: Te (КК=4937, кларк 0,001 г/т), Sb (КК=3400, кларк 0,5 г/т), Bi (КК=1340, кларк 0,009 г/т). Выражена аномалия для элемента первого класса опасности As со средним уровнем распространенности (КК=1765, кларк 1,7 г/т). В то же время концентрации распространенных элементов породообразующих минералов (K, Ca, Ti, Mn, Fe) близки к значениям кларков или даже ниже.

По результатам опробования шурфов были взяты образцы проб с окисленной и неокисленной части хвостохранилища и измерены массовые концентрации газов над их поверхностью в лабораторных условиях при изменении температуры. Для эксперимента готовилась паста из сухого вещества с дистиллированной водой в соотношении В:П = 1:2. После суточной заморозки пробы стакан с исследуемым веществом постепенно нагревался до  $t=+50^\circ\text{C}$ , последовательно с увеличением температуры произведены измерения удельной электропроводности (УЭП) и массовой концентрации сероуглерода ( $\text{CS}_2$ ), диметилсульфида ( $\text{C}_2\text{H}_6\text{S}$ ) и диметилсульфоксида ( $(\text{CH}_3)_2\text{SO}$ ) над поверхностью пробы.

В начале эксперимента при температуре  $+4^\circ\text{C}$  в неокисленных пробах фиксируется концентрация сероуглерода равная  $0,0022$  мг/м<sup>3</sup>, в окисленных –  $0,0024$  мг/м<sup>3</sup>, диметилсульфида –  $0,036$  мг/м<sup>3</sup> и  $0,039$  мг/м<sup>3</sup>, соответственно, диметилсульфоксида –  $0,046$  мг/м<sup>3</sup> и  $0,57$  мг/м<sup>3</sup>. При увеличении температуры вещества отходов концентрации исследуемых веществ в неокисленной части увеличиваются, в окисленной – уменьшаются и при температуре  $+50^\circ\text{C}$  достигают максимальных и минимальных значений. Концентрация сероуглерода в воздухе составляет  $0,0024$  мг/м<sup>3</sup> и  $0,0021$  мг/м<sup>3</sup>, диметилсульфида –  $0,040$  мг/м<sup>3</sup> и  $0,035$  мг/м<sup>3</sup>, диметилсульфоксида –  $0,051$  мг/м<sup>3</sup> и  $0,043$  мг/м<sup>3</sup>.

Эксперимент по определению удельной электропроводности пасты Комсомольских отходов при нагревании показал полиномиальную зависимость УЭП от температуры с коэффициентом аппроксимации 0,95 для неокисленной части хвостохранилища (рис. 2) и с коэффициентом аппроксимации 0,91 для окисленной (рис. 3).

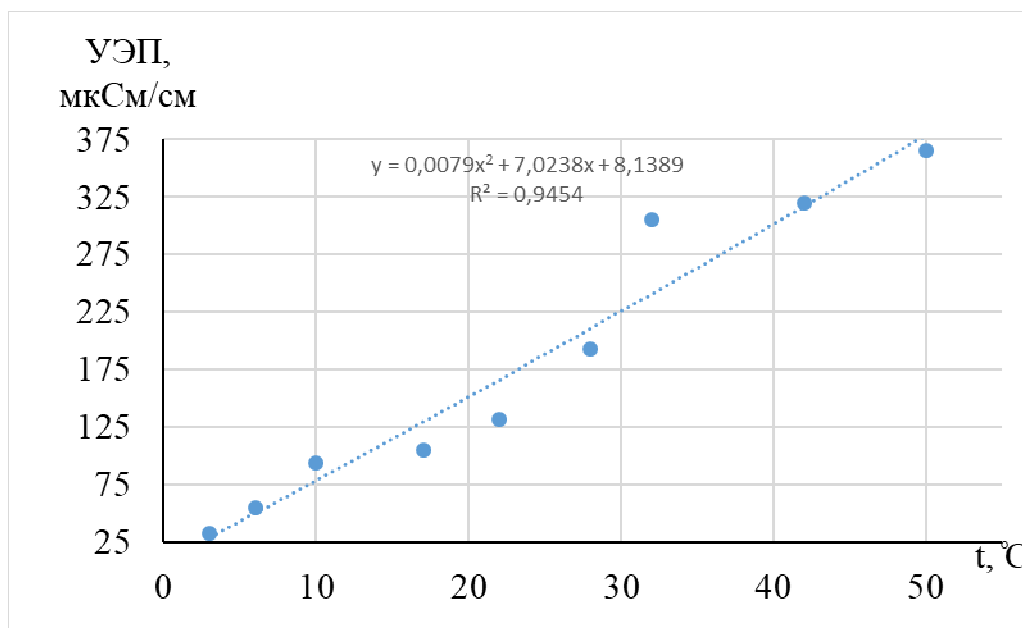


Рис. 2. Зависимость УЭП от температуры неокисленной части

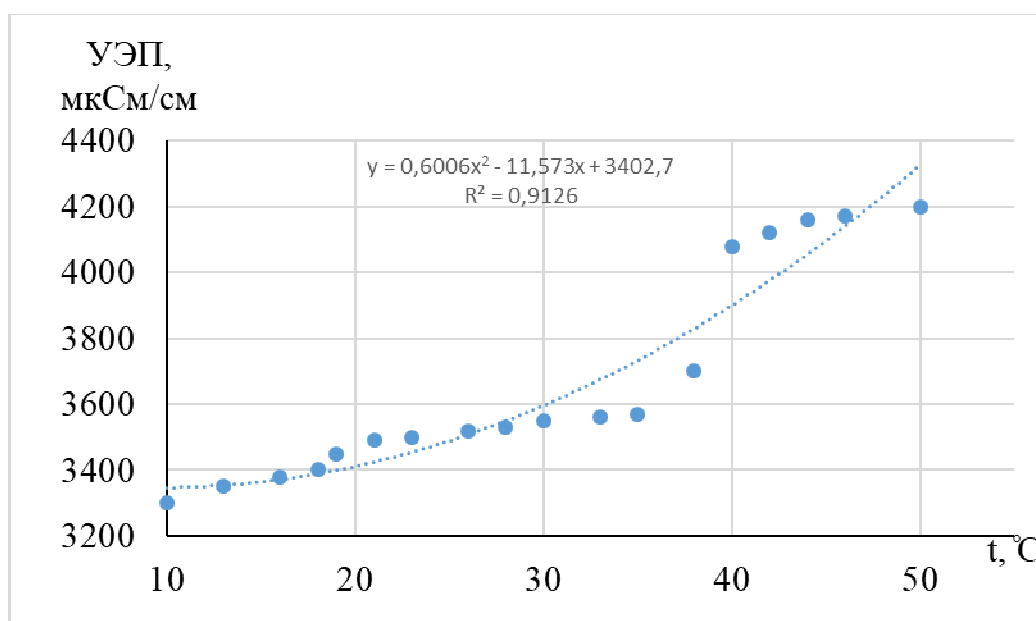


Рис. 3. Зависимость УЭП от температуры окисленной части

По данным электромагнитного сканирования на площадке Комсомольского хвостохранилища определены зоны с контрастными удельными электрическими сопротивлениями для определения оптимальных участков для проведения электротомографии.

Данные, полученные методом микроэлектротомографии, верифицированы результатами геохимического опробования. Более окисленное вещество отходов в южной части хвостохранилища характеризуется низкими значениями рН,

более высокой удельной электропроводностью и низкими сопротивлениями паст по данным прямых кондуктометрических и резистивиметрических измерений, что согласуется с результатами электротомографии. Менее окисленные отходы в северной части имеют нейтральные значения рН паст и более высокие сопротивления среды.

Эксперименты по определению удельного электрического сопротивления отходов в диапазоне температур от 0 до 50<sup>0</sup>С показали увеличение электропроводности паст при нагревании. При этом удельная электропроводность паст окисленных отходов выше электропроводности паст неокисленного материала на порядок, что согласуется с результатами полевых электротомографических исследований.

При увеличении температуры неокисленных отходов концентрации летучих соединений – сероуглерода, диметилсульфида и диметилсульфоксида – увеличиваются и достигают максимальных значений при 50<sup>0</sup>С. Лабораторный эксперимент помогает выявить динамику концентраций газов над поверхностью вещества в зависимости от температуры, что может помочь в полевых условиях определить достоверность измеренных данных в зависимости от времени года.

*Работа выполнена при поддержке проектов ФНИ №№ 0331-2019-0031, 0266-2019-0008.*

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бортникова С.Б., Гаськова О.Л., Айриянц А.А. Техногенные озера: формирование, развитие и влияние на окружающую среду. – Новосибирск: изд-во СО РАН филиал ГЕО, 2003. – 120 с.
2. Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов: справочник: в 6 кн. / Под ред. Э.К. Буренкова. – М.: Недра, 1994. – кн. 2: Главные р – элементы. – 303 с.
3. Мур Дж. В., Рамамурти С. Тяжелые металлы в природных водах. – М.: Мир, 1987. – 288 с.
4. The combination of Geoelectrical Measurements and Hydro-Geochemical Studies for the Evaluation of Groundwater Pollution in Mining Tailings Areas / S. Bortnikova, N. Yurkevich, E. Bessonova, Y. Karin, O. Saeva. – The Handbook of Environmental Chemistry. – Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2013. – 18 p.
5. Some geophysical methods for tailings/mine waste work / D.L. Campbell, R.J. Horton, R.J. Bisdorf, D.L. Fey, M.H. Powers, D.L. Fitterman // Tailings and Mine Waste: Proceedings of the Sixth International Conference (Fort Collins, Colorado, January 24-27, 1999). – Rotterdam, A.A. Balkema, 1999. – P. 35–43.
6. Oldenburg D.W., Li Y. Estimating depth of investigation in dc resistivity and IP surveys // Geophysics. – 1999. – Vol. 64. – Issue. 2. – P. 403–416.
7. Vertical and lateral spreading of highly mineralized acid drainage solutions (Ur dump, Salair): electrical resistivity tomography and hydrogeochemical data / V.V. Olenchenko, D.O. Kucher, S.B. Bortnikova, O.L. Gaskova, A.V. Edelev, M.P. Gora // Russian Geology and Geophysics. – 2016. – Vol. 57. – №4. – 617-628.

© Т. А. Кулешова, Н. В. Юркевич, С. Б. Бортникова, О. П. Саева, 2019