

## ГЕОЭКОЛОГИЯ (НАУКИ О ЗЕМЛЕ)

УДК 550.837

**Геоэлектрическая диагностика химического загрязнения геологической среды в зоне влияния полигона токсичных отходов****А.П. Гусев, М.Г. Верутин, П.А. Калейчик, И.О. Прилуцкий, И.А. Шаврин**Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины,  
246019, Гомель, ул. Советская, 104*(Статья поступила в редакцию 10 октября 2018 г.)*

Рассмотрены результаты изучения методом сопротивлений загрязнения верхней части геологической среды в зоне влияния отвалов фосфогипса. Для электропрофилирования использовалась симметричная установка АМNB. Выполнено картирование загрязнения почвогрунтов на территории отвалов и в зоне их влияния (при АВ=3-10 м). Загрязнение почвогрунтов индицируется аномалиями низкого кажущегося сопротивления (менее 10 Ом·м). Проведена оценка состояния дамбы, перекрывающей сток загрязненных вод с территории отвалов в окружающую среду. Установлены вероятные места утечек загрязненных вод из водоотводного канала по аномальному снижению кажущегося сопротивления грунтов верхней части ограждающей дамбы (менее 50 Ом·м при фоне 500 Ом·м и более).

Ключевые слова: *геоэлектрика; химическое загрязнение; отвалы фосфогипса; кажущееся электрическое сопротивление.*

DOI: 10.17072/pSU.geol.18.1.79

**Введение**

Геоэлектрика – комплекс геофизических методов, основанных на использовании электромагнитных полей, параметры которых зависят от физических свойств горных пород, вод и технических элементов (Вахромеев, 1995; Папырин, Пустозеров, 1998; Огильви, 1990). Использование геоэлектрики при оценке и картографировании загрязнения почвогрунтов и подземных вод основано на взаимосвязи между их удельным электрическим сопротивлением и засолением, т.е. содержанием солей (Mazac et al., 1987; Огильви, 1990; Frohlich et al., 1994). Так, между электропроводностью почвы и сухим остатком водной вытяжки существует высокая степень корреляции: коэффициент корреляции составляет 0,96-0,97 (Оценка засоления почв..., 2013).

Геоэлектрика методом сопротивлений может использоваться при изучении загрязнения компонентов геологической среды различными способами: измерение электрического сопротивления в стенках разреза (по шурфам, канавам и прочим выработкам); электрическое профилирование на небольших разносах – АВ – 1,5-10 м (картирование

загрязнения); вертикальное электрическое зондирование (изучение изменения загрязнения с глубиной – от поверхности до подошвы зоны аэрации); резистивиметрическое опробование почв (измерение сопротивления водных вытяжек из проб почв и грунтов); резистивиметрия поверхностных вод (измерение сопротивления пробы воды из временных и постоянных водоемов и водотоков).

Геоэлектрические методы – надежный способ выявления и картирования инфильтрации вод из каналов, водохранилищ, шламоохранилищ и т.д. По геоэлектрическим параметрам можно судить о зонах трещиноватости (разуплотнения) в дамбах. Так, электрометрия широко используется для контроля состояния дамб шламоохранилищ калийных комбинатов (Прохоров, 2003, 2007), дамб прудов (Фоменко, 2015). Геоэлектрические методы применяются при оценке загрязнения подземных вод различными техногенными источниками (Mazac et al., 1987; Frohlich et al., 1994; Муска, Mendeki, 2014; Ofomola, 2015).

Отсутствие постоянного контроля за техническим состоянием такого рода сооружений может привести к разрушению их отдельных участков, загрязнению окружающей

среды. Проведение геоэлектрической диагностики технического состояния инженерных сооружений способствует выявлению повреждений на ранней стадии, что существенно уменьшает расходы на ремонт и позволяет предотвратить техногенные аварии.

Применение геоэлектрических методов для изучения состояния технических объектов позволяет вести непрерывные площадные наблюдения при относительно низкой стоимости работ, без бурения скважин и нарушения растительно-почвенного покрова горными выработками.

### Объект и методика исследований

Объект исследований – полигон твердых отходов Гомельского химического завода – крупнейшего в Беларуси предприятия химической промышленности, которое производит более 20 видов химической продукции (серная и фосфорная кислоты, аммофос, суперфосфат, азотно-фосфорно-калийные удобрения, фтористый алюминий и т.д.). На предприятии применяется технология обработки апатитового концентрата, обуславливающая образование твердых фосфогипсовых отходов, которые складываются на территории специального полигона. В настоящее время накоплено более 17 млн т отходов, занимающих территорию около 100 га. Фосфогипс в отвалах содержит до 40% влаги, в его составе около 97% составляет гипс и 3% – фосфаты железа и алюминия, ортофосфорная кислота, фторсиликаты калия и натрия, фториды кальция. Отвалы фосфогипса являются постоянно действующим источником поступления загрязняющих веществ в поверхностные и грунтовые воды, почвогрунты, причиной деградации растительного покрова (Гусев и др., 2013; Гусев, 2015).

В поверхностных водах на территории отвалов минерализация достигает 10-20 г/дм<sup>3</sup>, содержание сульфат-иона – 1-6 г/дм<sup>3</sup>, фосфора фосфатного – 1-5 г/дм<sup>3</sup>, иона фтора – 0,5-1,5 г/дм<sup>3</sup>. Грунтовые воды в зоне влияния отвалов также загрязнены сульфат-ионом, фосфором фосфатным, ионами железа, фтора, аммония. Минерализация грунтовых вод составляет до 10-20 г/дм<sup>3</sup>.

Целью исследований являлось изучение

состояния геологической среды в зоне влияния полигона отходов химического производства геоэлектрическим методом. Решались следующие задачи:

картирование загрязнения верхней части геологической среды на территории отвалов и в зоне их влияния;

оценка состояния земляной дамбы, задерживающей поверхностный сток с отвалов;

выяснение зон утечек загрязненных вод из отводных каналов.

Метод исследования – электропрофилирование с помощью симметричной четырехэлектродной установки АМNB (разносы – АВ= 3 м, MN= 1 м; АВ= 10 м, MN= 3 м; АВ= 30, MN= 10 м). Шаг профилирования 10-50 м. Для измерений использовалась электроразведочная аппаратура ERA-MAX.



Рис. 1. Отвалы фосфогипсовых отходов

### Результаты и их обсуждение

На территории полигона отходов и в его окрестностях были выполнены электропрофилирования на различных разносах питающих электродов АВ – 3, 10 и 30 м. Известно, что эффективная глубина проникновения тока в однородном полупространстве приблизительно равна 0,25 расстояния между питающими электродами А и В. В неоднородной слоистой среде глубина проникновения тока зависит от соотношения мощностей и сопротивлений слоев в разрезе. В большинстве случаев глубина проникновения тока (т.е. глубина исследований) изменяется в пределах 0,1-0,25 расстояния между электродами А и В (Матвеев, 1990). Исходя из этого глубина исследований составляла от 0,3 до 10 м. Обобщенные результаты измерений кажущегося электрического сопротивления приводятся в таблице.

Для фоновой территории характерно

снижение кажущегося сопротивления с эффективной глубиной исследований, что обусловлено наличием водоносного горизонта (по данным замеров в скважинах уровень грунтовых вод находится на глубине 2-5 м) и особенностями геологического строения верхней части разреза (водно-ледниковые пески и супеси подстилаются моренными суглинками). Максимальные значения кажущегося сопротивления отмечаются на разносах АВ 3 и 10 м. В зоне отвалов для всего изучаемого разреза характерно низкое кажущееся сопротивление (менее 10 Ом·м), что обусловлено высокой степенью засоления почвогрунтов и грунтовых вод. В зоне влияния отвалов (до 100 м от границы отва-

лов по направлению поверхностного и подземного стока) кажущееся сопротивление увеличивается сверху вниз: наименьшее сопротивление имеет самая верхняя часть разреза (первые десятки см), а затем с глубиной сопротивление возрастает (примерно в 2 раза). Этот факт указывает на то, что источником химического загрязнения в этой зоне являются поверхностные воды, а направление движения загрязненных вод по вертикали – нисходящее. На расстоянии 100-200 м от границы отвалов фосфогипса по направлению стока дифференциация разреза по кажущемуся сопротивлению слабая, а по сравнению с зоной отвалов величина сопротивления увеличивается на порядок (таблица).

*Кажущееся электрическое сопротивление по данным электропрофилирования на разных эффективных глубинах, Ом·м*

Разнос АВ, м	Отвалы фосфогипса	Зона влияния отвалов (до 100 м)	Зона влияния отвалов (100-200 м)	Фоновая территория
30	5,1* (3,0-9,5)**	29,0 (15,0-44,0)	66,0 (44,0-95,4)	120,0 (70,0-200,0)
10	6,8 (5,7-12,6)	17,6 (8,2-27,1)	44,7 (41,0-49,1)	420 (120,0-800,0)
3	5,7 (3,5-8,2)	14,0 (4,4-26,3)	44,1 (43,0-45,5)	433 (180,0-662,0)

\* – среднее значение; \*\* – минимальное и максимальное значения.

На рис. 2 приведена карта изолиний кажущегося электрического сопротивления на эффективной глубине, соответствующей разному АВ=3 м. Видно, что область отвалов фосфогипса почти полностью находится внутри изолинии 10 Ом·м.

С западной, южной и восточной стороны располагаются области относительно высокого сопротивления (100-500 Ом·м и более), обусловленного песчаным составом почвогрунтов. В северо-западном направлении от отвалов четко выражен «язык» зоны низкого сопротивления, индицирующий направление поверхностного и грунтового стока загрязненных вод.

На рис. 2 отчетливо видно, что зона пониженного сопротивления (менее 10 Ом·м) существенно превышает по площади территорию самих отвалов и, вероятно, ограничивает ареал загрязнения почвогрунтов за счет миграции загрязняющих веществ от отвалов с поверхностным стоком.

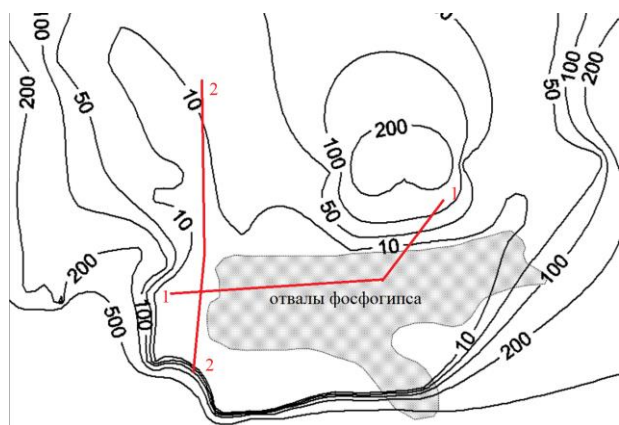
Изменения кажущегося электрического сопротивления на эффективной глубине, со-

ответствующей разному АВ=10 м, приведены для двух профилей, расположение которых указано на рис. 2.

Профиль 1 пересекает всю территорию отвалов (шаг наблюдений составляет 50 м). Вне отвалов (обе крайние части профиля) значения сопротивления изменяются в пределах 100-300 Ом·м. На территории отвалов фосфогипса сопротивление не превышает 50 Ом·м, местами снижаясь до 5-6 Ом·м (рис. 3). Несмотря на пестрый состав верхней части геологической среды (фосфогипс, пески, супеси, суглинки, строительный мусор, захороненные почвы) и колебания уровня грунтовых вод, аномалия низкого сопротивления в зоне отвалов прослеживается очень хорошо, что, вероятно, обусловлено высокой степенью засоления как поверхностных и грунтовых вод, так и грунтов.

Профиль 2 проходит в зоне влияния отвалов в направлении поверхностного и грунтового стока (шаг наблюдений 50 м). Почти на всем протяжении профиля значения кажущегося сопротивления не превышают 100

Ом·м, а на отдельных участках – 20 Ом·м (рис. 4). Здесь фактор неоднородности состава и влажности грунтов верхней части геологической среды сказывается в большей степени, чем в предыдущем случае.

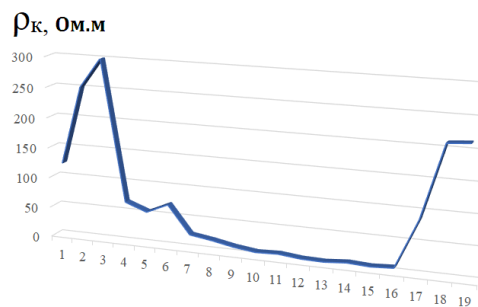


**Рис. 2.** Изолинии кажущегося электрического сопротивления (Ом м) на эффективной глубине, соответствующей разнесу  $AB=3$  м

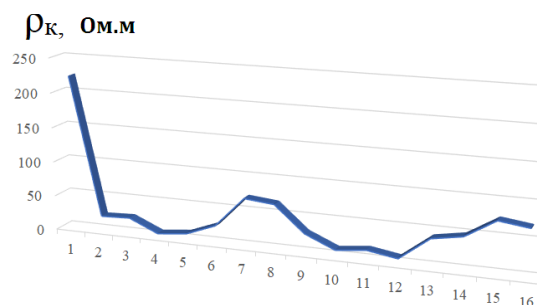
Таким образом, химическое загрязнение верхней части геологической среды на территории отвалов фосфогипса и в зоне их влияния фиксируется аномалиями низкого кажущегося электрического сопротивления, измеряемого на разносах питающих электродов 3-10 м.

Для изучения эффективности земляной дамбы, перекрывающей поверхностный сток с территории полигона в бассейн малой реки Рандовка (приток р. Уза), по профилю, проложенному перпендикулярно потоку поверхностных и грунтовых вод, было выполнено профилирование методом сопротивления на двух разносах линии АВ (30 и 10 м). Электрометрический профиль располагался ниже дамбы по потоку.

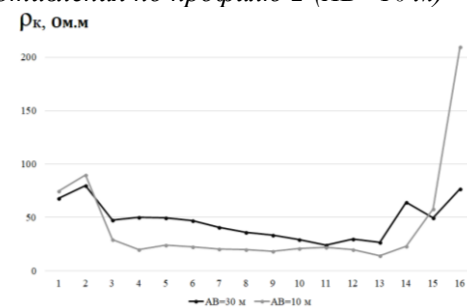
Поток грунтовых вод фиксируется в электрическом профилировании падением сопротивления (рис. 5). Причем, на разносах  $AB=10$  наблюдается снижение сопротивления с 50-70 до 20 Ом·м, на разносах  $AB=30$  м – с 60-70 до 20-40 Ом·м. Видно, что на разносе  $AB=10$  м аномалия пониженного сопротивления более выражена. Наблюдается падение сопротивления по всему фронту движения загрязненных грунтовых вод (с 3 по 14 пикеты). На разносе  $AB=30$  м аномалия наиболее выражена (кажущееся сопротивление ниже 30 Ом·м) в районе 10-13 пикетов.



**Рис. 3.** Изменения кажущегося электрического сопротивления по профилю 1 ( $AB=10$  м)



**Рис. 4.** Изменения кажущегося электрического сопротивления по профилю 2 ( $AB=10$  м)



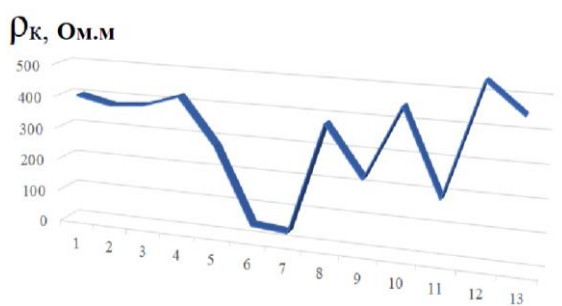
**Рис. 5.** Изменение кажущегося электрического сопротивления вдоль земляной дамбы

Отбор проб почв в центральной части профиля геоэлектрических исследований и последующий их химический анализ показали, что минерализация водной вытяжки составляет 1,3-1,5 г/дм<sup>3</sup> (при фоне 0,1-0,3 г/дм<sup>3</sup>), содержание сульфат-иона 0,6-0,9 г/дм<sup>3</sup> (при фоне 0,03-0,06 г/дм<sup>3</sup>).

Таким образом, геоэлектрические исследования показали низкую эффективность земляной дамбы, которая лишь частично перекрыла поток загрязненных вод.

Для отвода поверхностных вод с территории отвалы ограждены каналами (глубина – 3-5 м, ширина – около 10 м). В канале, ограждающем отвалы с южной стороны, минерализация воды составляет 4,2-13,7 г/дм<sup>3</sup>, содержание сульфат-иона – 0,7-1,6 г/дм<sup>3</sup>, фосфора фосфатного – 0,4-3,4 г/дм<sup>3</sup>. Для предотвращения распространения загрязненных вод внешний борт канала оборудо-

ван в качестве дамбы из уплотненного гравийно-щебнистого материала. Для выяснения мест утечек вод из канала в окружающую среду по дамбе было выполнено электропрофилирование ( $MN=3$  м,  $AB=10$  м, шаг 10 м). Для большей части профиля (общая протяженность 700 м) характерны высокие значения кажущегося электрического сопротивления (сотни и тысячи Ом·м), что объясняется составом грунтов верхней части насыпи (сухие пески, гравий, щебень). Обнаружены локальные участки (1-2 пикета), на которых имеет место снижение сопротивления от 50 Ом·м (рис. 6). Такие аномалии пониженного сопротивления могут быть обусловлены проникновением в тело дамбы засоленных вод из канала.



**Рис. 6.** Изменения кажущегося электрического сопротивления по профилю вдоль канала (фрагмент)

### Выводы

Химическое загрязнение (преобладающие вещества-загрязнители – сульфат-ион, фосфат-ион, фтор-ион) верхней части геологической среды на территории отвалов фосфогипса и в зоне их влияния индицируется аномалиями низкого кажущегося электрического сопротивления (менее 10 Ом·м), измеряемого на разносах питающих электродов 3-10 м. Изолиния кажущегося сопротивления 10 Ом·м может служить границей зоны распространения загрязненного поверхностного стока с отвалов.

Геоэлектрические исследования земляной дамбы, предназначенной для перекрытия потока загрязненных вод в речной бассейн, показали ее низкую эффективность. Проникновение загрязненных вод за дамбу фиксируется кажущимся электрическим сопротивлением ниже 25 Ом·м на эффективной глубине, соответствующей разносу  $AB=10$  м (фоновые значения 60-90 Ом·м).

Вероятные места утечек загрязненных

вод из водоотводного канала отмечаются аномалиями пониженного кажущегося сопротивления (менее 50 Ом·м) на фоне высоких значений этого показателя (500 Ом·м и более), характерных для верхней части ограждающей дамбы.

Таким образом, метод электропрофилирования на серии разносов  $AB$  3-30 м позволяет быстро и эффективно оценить химическое загрязнение верхней части геологической среды.

### Библиографический список

- Вахромеев Г.С.* Экологическая геофизика / ИрГТУ. Иркутск, 1995. 216 с.
- Гусев А.П., Шершнев О.В., Павловский А.И., Прилуцкий И.О., Акулевич А.Ф.* Особенности формирования ландшафтно-геохимических барьеров в зоне влияния отходов химических производств (Гомельский химический завод) // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2013. №2. С. 147-152.
- Гусев А.П.* Фитоиндикаторы техногенного подтопления в зоне влияния полигона промышленных отходов // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Геология. 2015. №1. С. 128-131.
- Матвеев Б.К.* Электроразведка. М.: Недра, 1990. 368 с.
- Огильви А.А.* Основы инженерной геофизики. М.: Недра, 1990. 501 с.
- Оценка засоления почв и грунтовых вод методами электрического сопротивления: учебное пособие / А.И. Поздняков, Е.В. Шеин, А.В. Федотова и др. / Астрах. гос. ун-т. Астрахань, 2013. 71 с.*
- Папырин Л.П., Пустозеров М.Г.* Изучение ореолов загрязнения подземных вод геофизическими методами // Охрана и разведка недр. 1998. Вып. 1. С. 36-41.
- Прохоров Н.Н.* Оценка состояния земляных дамб шламохранилищ по результатам геофизических исследований // Горный журнал. 2003. №7. С. 86-88.
- Прохоров Н.Н.* Взаимосвязь электрических параметров и фильтрационных характеристик грунтов дамб шламохранилищ Солигорского промрайона // Горная механика. 2007. №3. С. 76-86.
- Фоменко Н.Е.* Диагностика состояния прудовых плотин комплексом электроразведочных методов // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2015. №1. С. 26-32.
- Frohlich R.K., Urlich D.W., Fuller J., O'Reilly M.* Use of geoelectrical methods in groundwater pollution surveys in a coastal environment // Journal

of Applied Geophysics. 1994. Vol. 32 (2-3). P. 139-154.

Mazac O., Kelly W.E., Landa I. Surface geoelectrics for groundwater pollution and protection studies // Journal of Hydrology. 1987. Vol. 93 (3-4). P. 277-294.

Mycka M., Mendecki M.J. An application of geoelectrical methods for contamination plume recognition in Urbanowice waste disposal //

Contemporary Trends in Geoscience. 2014. Vol. 2. P.42-47.

Ofomola M.O. Mapping of Aquifer Contamination Using Geoelectric Methods at a Municipal Solid Waste Disposal site in Warri, Southern Nigeria // Journal of Applied Geology and Geophysics. 2015. Vol. 3 (3). P. 39-47.

## Geoelectric Diagnostics of Chemical Contamination of the Geological Environment in the Zone of Influence of the Toxic Waste Damp

A.P. Gusev, M.G. Verutin, P.A. Kaleychik, I.O. Prilutsky, I.A. Shavrin.

F. Skorina Gomel State University, 104 Sovetskaja Str., Gomel, 246019, Belarus

E-mail: andi\_gusev@mail.ru

The results of studying the resistance of the upper part of the geological section in the zone of influence of phosphogypsum dumps are considered. For the electrical profiling, a symmetrical array AMNB was used. The mapping of soil contamination on the territory of the dumps and in the zone of their influence (at AB = 3-10 m) is performed. Pollution of soils is indicated by anomalies of low apparent resistance (less than 10 Ohm.m). Assessment of the state of the dam, which separates the runoff of polluted waters from the dump site to the environment, was carried out. The probable places of leakage of contaminated water from the water-channel can be determined by an abnormal decrease in the apparent resistance of the soils of the upper part of the enclosing dam (less than 50 Ohm.m, against a background of 500 and more Ohm.m).

Key words: *geoelectrics; chemical pollution; dumps of phosphogypsum; apparent electrical resistance.*

### References

Vakhromeyev G.S. 1995. Ekologicheskaya geofizika [Environmental Geophysics]. IrGTU, Irkutsk, p. 216. (in Russian)

Gusev A.P., Shershnev O.V., Pavlovskiy A.I., Prilutskiy I.O., Akulevich A.F. 2013. Osobennosti formirovaniya landshaftno-geokhimicheskikh baryerov v zone vliyaniya otkhodov khimicheskikh proizvodstv (Gomelskiy khimicheskiy zavod) [Features of the formation of landscape-geochemical barriers in the zone of influence of chemical waste products (Gomel Chemical Plant)]. Geoekologiya, inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya. 2:147-152. (in Russian)

Gusev A.P. 2015. Fitoindikatory tekhnogenogo podtopleniya v zone vliyaniya poligona promyshlennykh otkhodov [Phytoindicators of technogenic flooding in the zone of influence of the industrial waste landfill]. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya, 1:128-131. (in Russian)

Matveyev B.K. 1990. Elektrorazvedka [Electrical Exploration]. Nedra, Moskva, p. 368. (in Russian)

Ogilvy A.A. 1990. Osnovy inzhenernoy geofiziki [Fundamentals of engineering geophysics]. Nedra, Moskva, p. 501. (in Russian)

Otsenka zasoleniya pochv i gruntovykh vod metodami elektricheskogo soprotivleniya [Assess-

ment of soil and groundwater salinity by electrical resistivity methods]. A.I. Pozdnyakov, Ye.V. Shein, A.V. Fedotova et al. (Eds.) 2013. AGU, Astrakhan, p. 71. (in Russian)

Papyrin L.P., Pustozarov M.G. 1998. Izucheniye oreolov zagryazneniya podzemnykh vod geofizicheskimi metodami [The study of halos of groundwater pollution by geophysical methods] Okhrana i razvedka nedr. 1:36-41. (in Russian)

Prokhorov N.N. 2003. Otsenka sostoyaniya zemlyanykh damb shlamokhranilishch po rezultatam geofizicheskikh issledovaniy [Assessment of the state of earth dams of slurry storage basins by the results of geophysical studies]. Gornyy zhurnal. 7: 86-88. (in Russian)

Prokhorov N.N. 2007. Vzaimosvyaz elektricheskikh parametrov i filtratsionnykh kharakteristik gruntov damb shlamokhranilishch Soligorskogo promrayona [Interrelation of electrical parameters and filtration characteristics of soils of dams of slurry storage facilities of Soligorsk industrial area]. Gornaya mekhanika. 3:76-86. (in Russian)

Fomenko N.E. 2015. Diagnostika sostoyaniya prudovykh plotin kompleksom elektro-razvedochnykh metodov [Diagnostics of the condition of pond dams by a complex of electrical meth-

ods]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka*. 1:26-32. (in Russian)

*Frohlich R.K., Ulrich D.W., Fuller J., O'Reilly M.* 1994. Use of geoelectrical methods in groundwater pollution surveys in a coastal environment. *Journal of Applied Geophysics*. 32(2-3):139-154.

*Mazac O., Kelly W.E., Landa I.* 1987. Surface geoelectrics for groundwater pollution and protection studies. *Journal of Hydrology*. 93(3-4):277-294.

*Mycka M., Mendecki M.J.* 2014. An application of geoelectrical methods for contamination plume recognition in Urbanowice waste disposal. *Contemporary Trends in Geoscience*. 2:42-47.

*Ofomola M.O.* 2015. Mapping of aquifer contamination using geoelectric methods at a municipal solid waste disposal site in Warri, Southern Nigeria. *Journal of Applied Geology and Geophysics*. 3(3): 39-47.