

## ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 550.837

**Диагностика утечек загрязненных вод с территории полигона отходов химического производства методом естественного электрического поля****А.П. Гусев, В.Л. Моляренко, А.И. Павловский, И.О. Прилуцкий, С.В. Андрушко**

Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

246019, Гомель, ул. Советская, 104. E-mail: andi\_gusev@mail.ru, molyarenko-vova@bk.ru, aipavlovsky@mail.ru, igorprilutsky@mail.ru, sandrushko@list.ru

*(Статья поступила в редакцию 18 октября 2022 г.)*

Цель исследований – диагностика утечек загрязненных вод с территории полигона отходов химического производства методом естественного электрического поля в комплексе с другими методами. Решаемые задачи: выяснение зон утечек загрязненных вод из отводных каналов; диагностика утечек загрязненных вод из шламонакопителя; определение участков разгрузки загрязненных грунтовых вод в прилегающие к отвалам болота. Для полевых работ использованы измерительный прибор (электроразведочная аппаратура ERA-MAX) и неполяризующиеся электроды системы ВИРГ. Применялись две разновидности метода: способ потенциала (шаг измерений 5 м) и способ градиента потенциала (измерительная линия MN=5 м). В качестве дополнительных методов использовались: геомагнитная микросъемка и фитоиндикация. Установлено, что зоны инфильтрации загрязненных вод из каналов и шламонакопителя диагностируются по отрицательным аномалиям потенциала или градиента потенциала естественного электрического поля, которые характеризуются амплитудой 10–40 мВ. Участок разгрузки загрязненных подземных вод в поверхностные горизонты индицируется положительной аномалией естественного электрического поля (+20–47 мВ), пространственно сопряженной с зоной деградации болотной растительности.

Ключевые слова: *естественное электрическое поле, электрофильтрационное поле, отвалы химических отходов, зона инфильтрации, зона разгрузки, загрязненные воды.*

DOI: 10.17072/psu.geol.21.1.90

**Введение**

Метод естественного электрического поля (ЕЭП) используется для поисков сульфидных, графитовых, антрацитовых и железорудных месторождений, при геологическом картировании, при гидрогеологических и инженерно-геологических исследованиях (Семенов, 1980; Матвеев, 1990; Огильви, 1990).

Метод ЕЭП зарекомендовал себя при мониторинге геологической среды, в том числе при изучении опасных геологических процессов и техногенного загрязнения (Огильви, 1990; Прохоров, 2003; Фоменко, 2015; Гусев и др., 2018).

В основе использования метода ЕЭП при диагностике зон поступления загрязненных вод в окружающую геологическую среду лежит связь между геофильтрационным и геоэлектрическим полями: движение воды в горных породах вызывает возникновение электрического поля фильтрации. Интенсивность электрофильтрационного поля зависит от свойств фильтрующих пород (гранулометрический состав, проницаемость, форма поровых каналов), от химического состава и минерализации фильтрующихся вод, от электрических свойств вмещающей среды. Сравнительно интенсивные электрофильтрационные поля наблюдаются на склонах гор, на берегах рек и

озер, над карстовыми воронками, вблизи скважин, из которых откачивают воду. Движение подземных вод снизу вверх, т.е. их разгрузка, вызывает возникновение электрических потенциалов, характеризующихся максимумом, спадающим более или менее равномерно во всех направлениях. По мере приближения к зоне разгрузки значения потенциалов увеличиваются. Величина максимумов зависит от скорости движения и глубины залегания подземных вод. Участки инфильтрации (т.е. просачивания вод с поверхности в грунтовые горизонты) выделяются по отрицательным аномалиям потенциалов. В однородной геологической среде электрофильтрационные потенциалы отражают структуру гидроизогипс: они увеличиваются в направлении движения потока, а их интенсивность пропорциональна гидравлическим градиентам. Соответственно карты равных потенциалов ЕЭП показывают пространственную структуру фильтрационного потока, направление его движения и скорость (Огильви, 1990; Матвеев, 1990).

Основной проблемой использования метода естественного электрического поля является сложный генезис формирования геоэлектрических аномалий по земной поверхности. Данные аномалии могут образовываться в результате действия различных факторов – колебания рельефа, особенности растительного покрова, утечки блуждающих токов, окислительно-восстановительных процессов на подземных металлических объектах (Хачатрян, 1986; Огильви, 1990). В то же время применение метода ЕЭП позволяет осуществлять оперативную диагностику состояния опасных инженерных систем, не прибегая к бурению скважин, химическим опробованиям, без нарушения растительно-почвенного покрова горными выработками.

### Объект и методика исследований

Объект исследований – полигон отходов Гомельского химического завода, который является крупнейшим в Беларуси предприятием химической промышленности. Здесь произво-

дится более 20 видов химической продукции (фосфорная и серная кислоты, суперфосфат, аммофос, азотно-фосфорно-калийные удобрения, фтористый алюминий и т.д.). На заводе применяется технология обработки апатитового концентрата, которая обуславливает образование твердых отходов фосфогипса, накапливающихся на территории специального полигона. Жидкие отходы направляются в специально оборудованные шламонакопители. За время функционирования предприятия накоплено более 17 млн т. отходов, которые занимают территорию около 100 га. Фосфогипс, складированный в отвалах, содержит до 40% влаги. Его состав: 97% гипс, 3% фосфаты железа и алюминия, ортофосфорная кислота, фторсиликаты калия и натрия, фториды кальция. Терриконы фосфогипса представляют собой постоянно действующий источник поступления загрязняющих веществ в поверхностные и грунтовые воды, почвы, являющийся причиной деградации растительного покрова (Гусев и др., 2013; Гусев, 2015).

На территории полигона отвалов фосфогипса в поверхностных водах 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 являлась диагностика утечек загрязненных вод с территории полигона отходов химического производства методом ЕЭП в комплексе с другими методами. Решались следующие задачи:

- выяснение зон утечек загрязненных вод из отводных каналов;
- диагностика утечек загрязненных вод из шламонакопителя;
- определение участков разгрузки загрязненных грунтовых вод в прилегающие к отвалам болота.

В методе ЕЭП использованы измерительный прибор (электроразведочная аппаратура

ERA-MAX) и неполяризуемые электроды системы ВИРГ. Применялись две разновидности метода: способ потенциала (шаг измерений 5 м) и способ градиента потенциала (измерительная линия MN=5 м). Погрешность измерений  $\pm 1,5$  мВ.

В качестве дополнительных методов использовались: геомагнитная микросъемка и фитоиндикация. Геомагнитная микросъемка выполнялась протонным магнитометром Geometrics G-857. Микросъемка производилась по профилям с шагом между пикетами 2 м.



**Рис. 1.** Полигон химических отходов (по материалам Google Earth)

### Результаты и их обсуждение

Выполненные геоэлектрические исследования на территории объекта позволили уточнить пространственную структуру естественного электрического поля, на которую влияют совокупность таких факторов, как: а) рельеф отвалов отходов (обуславливает относительно обширные отрицательные аномалии потенциала или градиент потенциала естественного электрического поля амплитудой до 20 мВ, соответствующие склонам отвалов фосфогипса); б) пространственная неоднородность растительного покрова (высокочастотные – на 1–2 пикета – отрицательные и положительные аномалии небольшой амплитуды до 5 мВ); в) захороненные металлические конструкции, металлический мусор (высокочастотные – на

1–2 пикета – отрицательные и положительные аномалии небольшой амплитуды до 10–15 мВ); г) разгрузка грунтовых вод (положительные аномалии потенциала или градиента потенциала естественного электрического поля амплитудой более 10 мВ, отмечаемые на 3 и более соседних пикетах); д) инфильтрация поверхностных вод (отрицательные аномалии потенциала или градиента потенциала естественного электрического поля, амплитудой более 10 мВ, отмечаемые на 3 и более соседних пикетах).

Первые три фактора являются помехами, создавая «шум». В двух последних случаях аномалии потенциала или градиента потенциала естественного электрического поля имеют геофильтрационную природу и, соответственно, важное индикационное значение с точки

зрения оценки направления миграции потоков загрязненных вод в зоне влияния отвалов отходов.

**Отводной канал.** Отводные каналы полигона предназначены для захвата поверхностного стока с территории отвалов. Воды этих каналов характеризуются высокой минерализацией ( $5\text{--}10\text{ г/м}^3$ ) и низким рН (3–4). Ложе каналов оборудовано защитным слоем для предотвращения инфильтрации загрязненных вод в грунтовые горизонты. Зоны утечек загрязненных вод из отводного канала устанавливаются по отрицательным аномалиям потенциала ЕЭП (амплитуда  $10\text{--}30\text{ мВ}$  и более), пространственно совпадающим с отрицательными аномалиями кажущегося электрического сопротивления на профиле ЭП (в зависимости от литологических особенностей вмещающих техногенных грунтов – в 1,5–3 раза относительного фона).

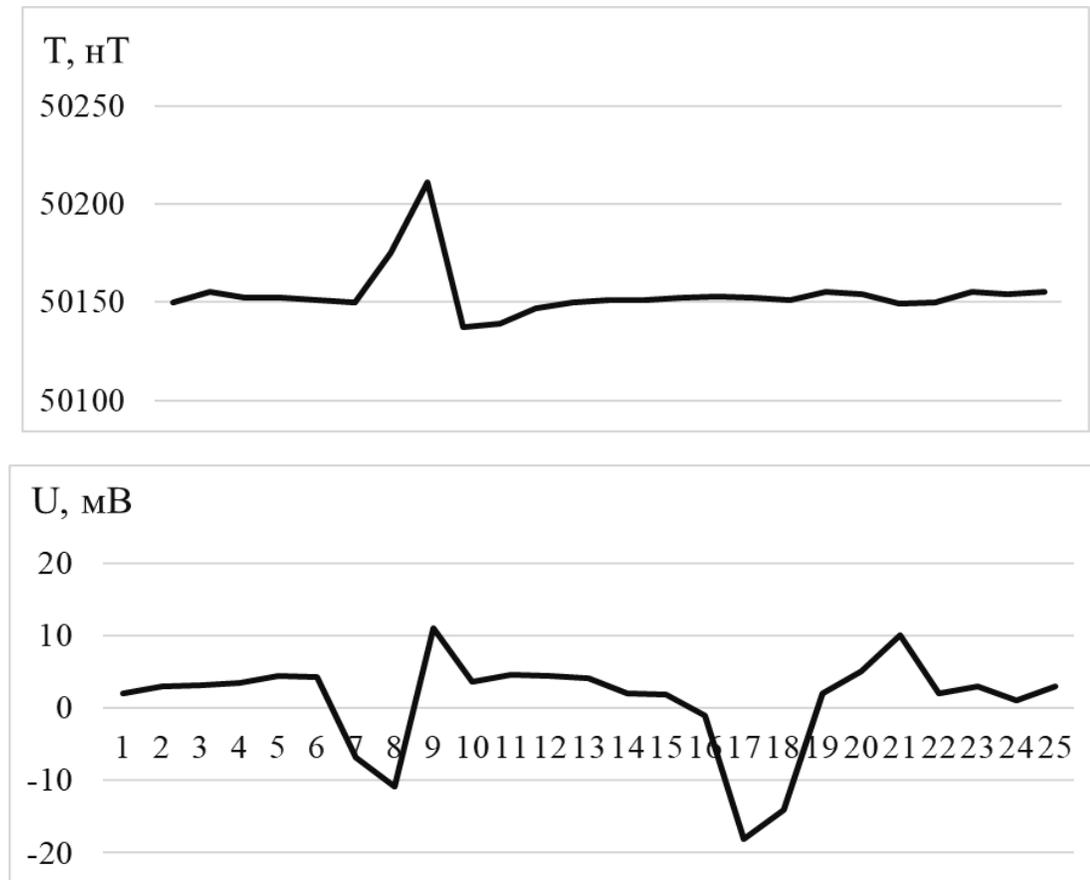
Ложные аномалии потенциала ЕЭП могут отбраковываться с помощью геомагнитной микросъемки. В данном случае ложной считается аномалия указанных показателей, связанная не с движением вод, а с металлическим мусором. Так, на рис. 2 приводятся результаты геомагнитной микросъемки и измерения потенциала ЕЭП по профилю вдоль канала. Совпадающие аномалии геомагнитного поля и потенциала ЕЭП (в районе 7–9 пикетов), вероятно, обусловлены неким металлическим объектом, захороненным на небольшой глубине (до 2–3 м). В районе 17–21 пикетов четко прослеживается аномалия потенциала ЕЭП (амплитудой  $10\text{--}30\text{ мВ}$ ), при этом в геомагнитном поле никаких отклонений нет. Здесь, вероятно, наблюдается эффект, вызванный движением поверхностных вод из канала в горизонты подземных вод (рис. 2).

**Шламонакопитель.** Для мониторинга утечек загрязненных вод из шламонакопителя был использован метод ЕЭП способом гради-

ента потенциала. Воды шламонакопителя характеризуются повышенной минерализацией ( $2,1\text{--}2,9\text{ г/м}^3$ ), высоким содержанием сульфат-иона ( $1\text{--}1,1\text{ г/м}^3$ ) и щелочным рН (8,9–9,2). Шламонакопитель находится за пределами промышленной площадки завода, окружен с трех сторон заболоченной местностью, возвышаясь на ней на 3–5 м. Профиля ЕЭП прокладывались в верхней части шламонакопителя. Всего проложено 4 профиля: северная, южная, западная и восточная стороны шламонакопителя. На большей части профилей градиент потенциал ЕЭП колебался в пределах от  $-10$  до  $+5\text{ мВ}$ . На профиле, проходящем по восточной стороне шламонакопителя, была обнаружена отрицательная аномалия значений градиента потенциала ЕЭП, имеющая амплитуду  $30\text{--}40\text{ мВ}$ . Аномальные значения зафиксированы в 10 точках, что соответствует 50 м протяженности профиля (рис. 3). Обнаруженная аномалия градиента потенциала ЕЭП имеет предположительно геофильтрационную природу и индицирует место просачивания загрязненных вод из шламонакопителя в окружающее болото. На других профилях такие хорошо выраженные аномалии отсутствовали, амплитуда колебаний значений градиента потенциала ЕЭП не превышала  $15\text{ мВ}$ .

**Зона разгрузки загрязненных вод.** Под отвалами химических отходов формируется зона высокого загрязнения почвогрунтов и грунтовых вод.

В почвогрунтах наблюдаются засоление, выраженное в повышенной минерализации водных вытяжек ( $1,5\text{--}2\text{ г/м}^3$ ). В грунтовых водах минерализация достигает  $10\text{--}20\text{ г/м}^3$  (преобладает сульфат-ион, фтор-ион, фосфат-ион), а рН снижается до 3–4. В зоне влияния отвалов происходит разгрузка загрязненных грунтовых вод в прилегающий озеро-болотный комплекс.



**Рис. 2** Геомагнитная микросъемка и измерения потенциала ЕЭП по профилю вдоль отводного канала полигона химических отходов



**Рис. 3** Изменения градиента потенциала ЕЭП по профилям на шламонакопителе

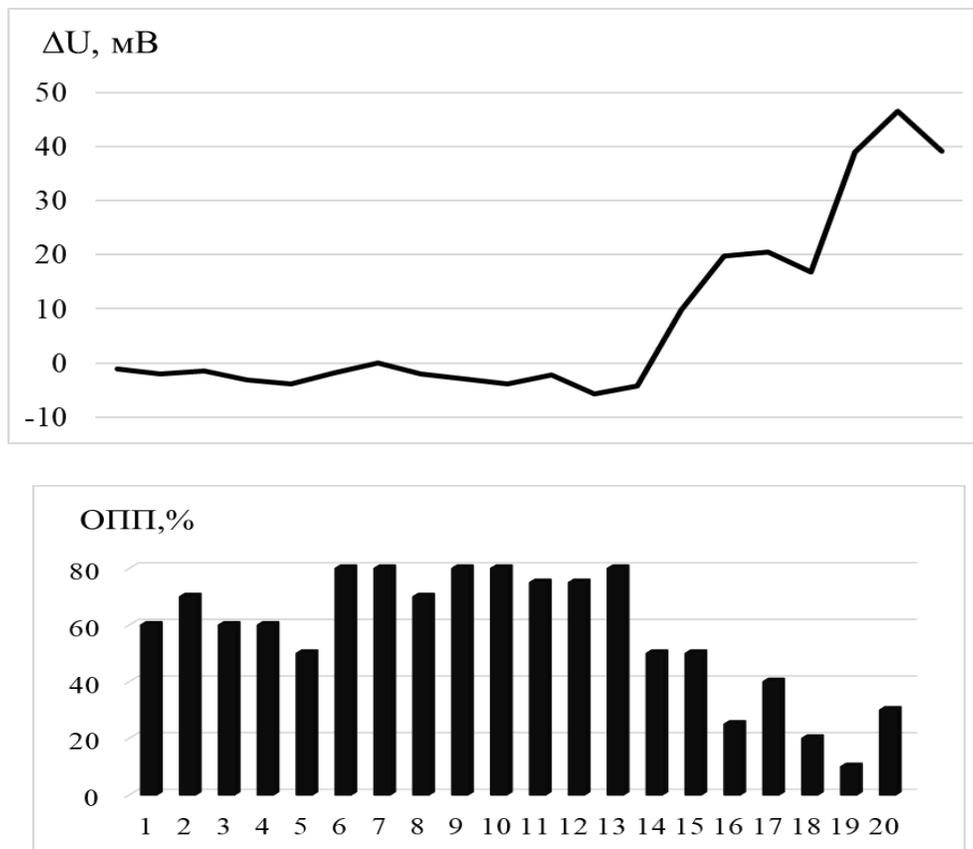
Участок, на котором загрязненные грунтовые воды вызывают подтопление территории, был обнаружен с помощью комплекса методов, состоящего из метода ЕЭП (способом

градиента потенциала) и фитоиндикации (Гусев, 2015; Гусев, Шпилевская, 2020).

Прилегающая к отвалам фосфогипса заболоченная территория характеризуется развитием фитоценозов, в которых доминирует

тростник обыкновенный (в небольшом количестве присутствуют также рогоз широколистный, иван-чай узколистный, вербейник обыкновенный, дербенник ивоволистный и другие влаголюбивые виды растений).

Исследования проводились по профилю, проложенному по границе отвала-болото. В районе 14–20 пикетов значения градиента потенциала ЕЭП резко возрастают – до +20–47 мВ (рис. 4).



**Рис. 4.** Изменения градиента потенциала ЕЭП и общего проективного покрытия растительности на участке разгрузки загрязненных грунтовых вод

Здесь же наблюдается существенно снижение общего проективного покрытия тростниковых зарослей: с 60–80% до 10–50%. Кроме того, повышается доля сухих стеблей (до половины от их общего числа). Резко сокращается видовое богатство болотного фитоценоза: остается только один вид – тростник обыкновенный.

Угнетение болотной растительности в данном случае объясняется негативным воздействием минерализованных кислых грунтовых вод.

Пространственно сопряженные положительная аномалия потенциала ЕЭП и снижение покрытия болотной растительности индици-

руют зону разгрузки загрязненных подземных вод.

### Выводы

Таким образом, вышерассмотренные исследования на территории полигона химических отходов и его зоны влияния установили, что участки инфильтрации загрязненных вод из каналов и шламонакопителя диагностируются по отрицательным аномалиям потенциала или градиента потенциала естественного электрического поля, которые характеризуются амплитудой 10–40 мВ.

Участок разгрузки загрязненных подземных вод в поверхностные горизонты индицируется положительной аномалией естественного электрического поля (+20–47 мВ), пространственно сопряженной с зоной деградации болотной растительности (снижение общего проективного покрытия и видового разнообразия, усыхание доминантов).

Ложные аномалии, т.е. не связанные с инфильтрацией или разгрузкой вод потенциала или градиента потенциала ЕЭП, могут отбраковываться в зависимости от ситуации с помощью геомагнитной микросъемки или фитоиндикации.

Таким образом, метод естественного электрического поля позволяет быстро и эффективно выявить участки утечек загрязненных вод в окружающую геологическую среду.

#### Библиографический список

Гусев А.П., Шеринев 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. Серия: Геология? 2015. № 1. С. 128–131.

Гусев А.П., Калейчик П.А., Федорский М.С., Шаврин И.А. Динамика естественного электрического поля как индикатор оползнеопасных участков в техногенном ландшафте (на примере Беларуси) // Вестник Пермского университета. Геология? 2018. Т. 17. № 2. С. 120–127.

Гусев А.П., Шпилевская Н.С. Фитоиндикаторы техногенного химического воздействия на луговые экосистемы // Экосистемы, 2020. Т. 22. С. 53–59.

Матвеев Б.К. Электроразведка. М.: Недра, 1990. 368 с.

Огильви А.А. Основы инженерной геофизики. М.: Недра, 1990. 501 с.

Прохоров Н.Н. Оценка состояния земляных дамб шламоохранилищ по результатам геофизических исследований // Горный журнал, 2003. № 7. С. 86–88.

Семенов А.С. Электроразведка методом естественного электрического поля. Л.: Недра, 1980. 446 с.

Фоменко Н.Е. Диагностика состояния прудовых плотин комплексом электроразведочных методов // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка, 2015. № 1. С. 26–32.

Хачатрян Д.А. О характере локальных естественных электрических полей водоемов, каналов и рек // Доклады академии наук Армянской ССР, 1986. Т. 83. № 3. С. 122–126.

## Diagnostic Assessment of Polluted Water Leaks from the Site of a Chemical Production Waste Landfill Using the Self-Potential Method

A.P. Gusev, V.L. Molyarenko, A.I. Pavlovsky, I.O. Prilutsky, S.V. Andrushko

Francisk Skorina Gomel State University, 104 Sovietskaya str., Gomel 246019, Belarus

E-mail: andi\_gusev@mail.ru, molyarenko-vova@bk.ru, aipavlovsky@mail.ru, igorprilutsky@mail.ru, sandrushko@list.ru

The main goal of the research is a diagnostic assessment of polluted water leaks from the chemical waste landfill site using the self-potential method integrated with other methods. The following tasks were to be solved: locating zones of contaminated water leakage from the drainage canals; detecting polluted water leaks from the sludge reservoir; identifying the discharge zones of contaminated groundwater into the swamps adjacent to the landfill. Electrical prospecting equipment ERA-MAX with non-polarizable electrodes of the VIRG system was used for field measurements. Two measuring techniques of the self-potential method were used: the fixed-base method (the measurement interval was 5 m) and the potential gradient method (measuring line MN = 5 m). The additional methods

were as follows: geomagnetic microsurvey and phytoindication. The following diagnostic indicators were established for the zones of infiltration of contaminated waters from canals and sludge reservoirs: negative fixed-base potential anomalies or negative potential gradient anomalies of the natural electric field, which are characterized by the amplitude of 10-40 mV. The area of discharge of polluted groundwater into the surficial unit is indicated by a positive anomaly of the natural electric field (+ 20-47 mV), spatially associated with the zone of degradation of swamp vegetation.

*Key words:* natural electric field; electric filtration field; chemical waste landfills; infiltration zone; discharge zone; polluted water

## References

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)

Gusev A.P., Kaleichik P.A., Fedorskiy M.S., Shavrin I.A. 2018. Dinamika estestvennogo elektricheskogo polya kak indikator opolzneopasnykh uchastkov v tekhnogenom landshafte (na primere Belarusi) [The dynamics of the natural electric field as an indicator of landslide-prone areas in the technogenic landscape (by the example of Belarus)]. *Bulletin of Perm University. Geology*. 17(2):120-127. (in Russian) doi: 10.17072/psu.geol.17.2.120

Gusev A.P., Shpilevskaya N.S. 2020. Fitoindikatory tekhnogenogo khimicheskogo vozdeystviya

na lugovye ekosistemy [Phytoindicators of technogenic chemical impact on meadow ecosystems]. *Ecosystems*. 22:53-59. (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)

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)

Semenov A.S. 1980. *Elektrorazvedka metodom estestvennogo elektricheskogo polya* [Electrical prospecting using the natural electric field method]. Leningrad, Nedra, p. 446. (in Russian)

Fomenko N.E. 2015. Diagnostika sostoyaniya prudovykh plotin kompleksom elektrorazvedochnykh metodov [Diagnostics of the condition of pond dams by a complex of the electrical prospecting methods] *Izv. vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka*, 1:26-32. (in Russian)

Khachatryan D.A. 1986 O kharaktere lokalnykh estestvennykh elektricheskikh poley vodoemov, kanalov i rek [On the nature of local natural electric fields of reservoirs, canals and rivers]. *Dokl. Academy of Sciences of the Armenian SSR*. LXXXIII(3):122-126. (in Russian)