

В.В. Романов, К.С. Мальский, А.И. Посеренин, А.Н. Дронов, А.А. Иванов

КОМПЛЕКС ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОЛИГОНОВ ТВЕРДЫХ ОТХОДОВ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Аннотация. Многие действующие и закрытые полигоны твердых отходов горнодобывающих предприятий являются источниками загрязнения окружающей среды. Вместе с тем, на территории России находится большое количество таких полигонов с истекшим сроком эксплуатации. Для снижения отрицательного воздействия на природные условия необходим монтаж систем дегазации и сбора фильтрата, определение устойчивости склонов полигонов. С целью повышения эффективности подобных систем необходимо выявить места скопления свалочного газа и фильтрата. Геофизические методы позволяют эффективно, быстро и за минимальное время решить эти задачи. Среди них особенное место занимают актуальные и быстроразвивающиеся методы, основанные на томографическом подходе. Томографические технологии измерений, в отличие от «классических» геофизических методов, предназначены на изучение сложнопостроенных, двух- и трехмерных сред, к которым относятся полигоны захоронения отходов — сложные, динамические техногенные объекты, существенно неоднородные по физическим свойствам. В рассмотренных примерах показывается эффективность геофизических исследований на полигонах ТБО горнодобывающих предприятий.

Ключевые слова: геофизические методы, электротомография, сейсмотомография, полигоны твердых отходов, горнодобывающие предприятия, физико-механические свойства, рекультивация полигонов ТБО.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-0-114-120

Введение

В настоящий момент, на территории России, находится большое количество полигонов твердых бытовых отходов горнодобывающих предприятий, срок эксплуатации которых истек [4]. Данные полигоны оказывают негативное воздействие на окружающую среду, являясь источником свалочного газа и фильтрата, утечек токсичных и радиоактивных отходов. Кроме того, в современных экономических условиях, когда разведанные запасы полезных ископаемых иссякают, возрастает необходимость к вовлечению в переработку техногенного сырья, представленного в виде лежащих хвостов и породных отвалов обога-

тельных комплексов для извлечения ценных ресурсов [3].

Для снижения этого воздействия проводятся рекультивационные работы [6], в число которых входит монтаж систем сбора газа и фильтрата. Для эффективной работы подобных систем необходимо локализовать положение свалочного газа и фильтрата в теле полигона, а для фильтрата еще и в окружающей геологической среде [4].

Современные геофизические технологии, к которым можно отнести методики электротомографии и сейсмотомографии, обладая объемным характером получаемой информации и высокой скоростью работ [8], позволяют в короткие

сроки решить эти задачи [1]. Основной проблемой для внедрения этих технологий является отсутствие нормативных документов, которые регулировали бы их применение при рекультивации полигонов. Следствием этого является малый практический опыт, отсутствие рекомендаций по технологии проведения как полевых, так и камеральных работ.

Методика исследований

Томографические технологии измерений, в отличие от «классических» геофизических методов, предназначены на изучение сложнопостроенных, двух- и трехмерных сред. Полигоны в силу их геометрии и неоднородности строения, наличия зон скопления биогаза и фильтрата, являются такими объектами.

Основными предлагаемыми авторами методиками геофизических исследований являются сейсмотомография [11] и электротомография [12].

Сейсмотомография позволяет по корреляционным связям выполнить оценку физико-механических свойств свалочных грунтов в естественном залегании [14]. Пониженные значения физико-механических свойств указывают на наличие разуплотненных зон в теле полигона, к которым могут быть приурочены скопления биогаза. Сейсмические работы необходимо проводить на продольных и поперечных волнах с частым шагом между пунктами возбуждений сейсмических волн [13].

Электротомография показывает высокую эффективность при изучении загрязненности окружающей среды [2]. Применение этого вида исследования в первую очередь позволяет выделить зоны скопления фильтрата, как в теле полигона, так и за его пределами в грунтах естественного основания. Образующийся фильтрат характеризуется низкими значениями удельных электрических сопротивлений из-за высокой его минера-

лизации, что является устойчивым поисковым признаком. Зоны разуплотнения грунтов, заполненные биогазом, наоборот, на геоэлектрических разрезах выделяются высокими значениями сопротивлений [10].

Особенностью геофизических наблюдений на полигонах захоронения ТБО является частое расположение профилей. Сейсмические исследования выполняются по методике сейсмотомографии с шагом 2–6 м между пунктами возбуждений сейсмических волн, на расстановке длиной 94 м с шагом 2 м между пунктами приема [7]. Электротомография выполняется 48-ми электродной расстановкой с шагом 3–5 м между электродами. В пределах выделенных аномальных зон шаг между электродами сгущается до 2 м с целью повышения детальности работ [5]. Рекомендуется трехэлектродная прямая и встречная установки, обладающая максимальной глубинностью и высокой чувствительностью к неоднородностям разреза.

Результаты томографических исследований полигонов

В волновом поле, в первых вступлениях были отмечены рефрагированные поперечные и продольные волны, распространяющиеся в свалочных грунтах со скоростью 100–400 м/с. Обработка материала осуществлялась по стандартному графу обработки, включающему регулировку амплитуд, фильтрацию, определение скоростного закона, увязку годографов и построение непрерывного распределения скоростей сейсмических волн в плоскости разреза (сейсмотомографический разрез). Для перехода к физико-механическим свойствам свалочных грунтов необходимо использовать корреляционные уравнения. Но для такого типа грунтов их не существует, поэтому использовались зависимости для песчано-глинистой толщи, как наиболее

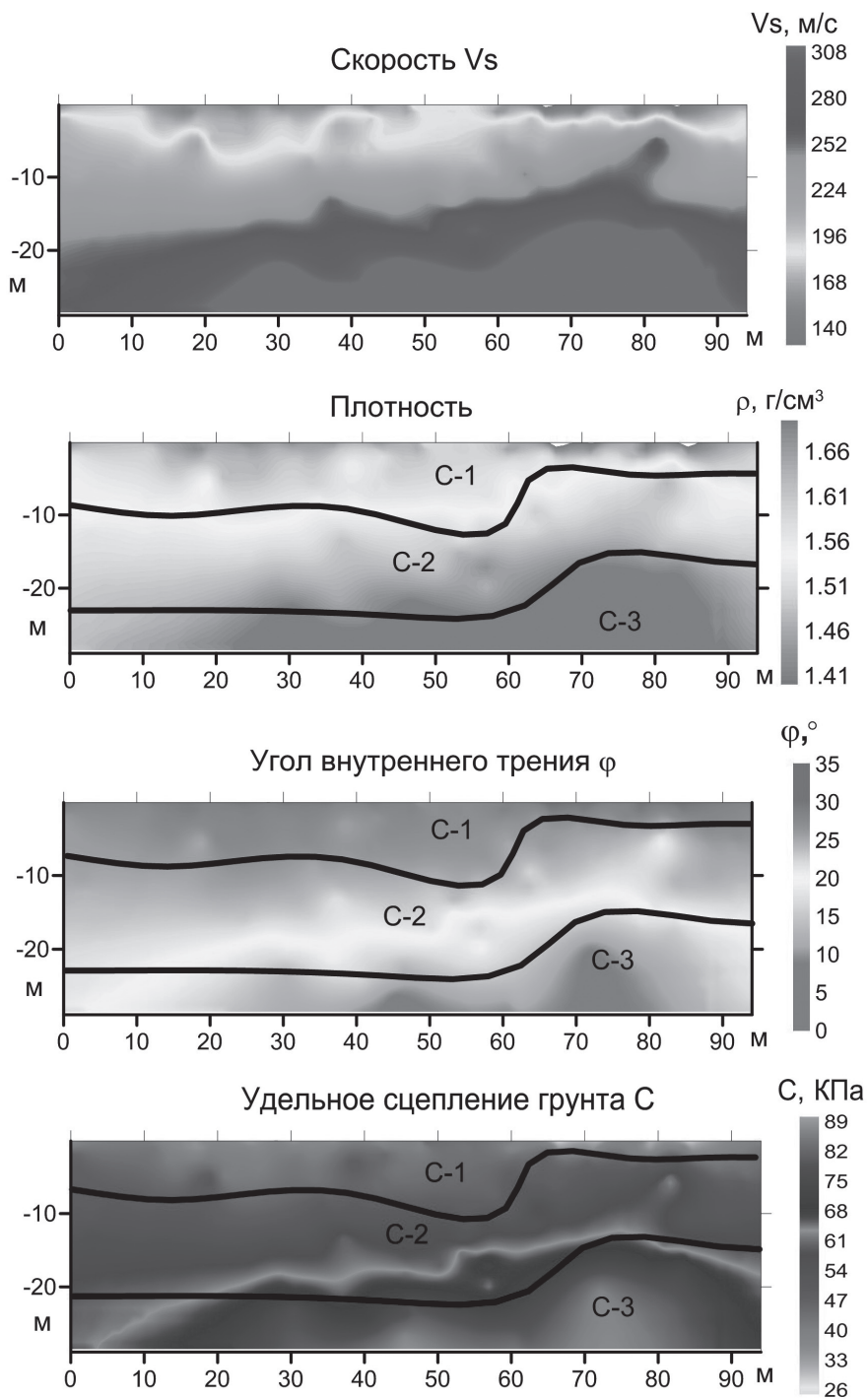


Рис. 1. Результат сейсмической съемки
 Fig. 1. Seismic survey result

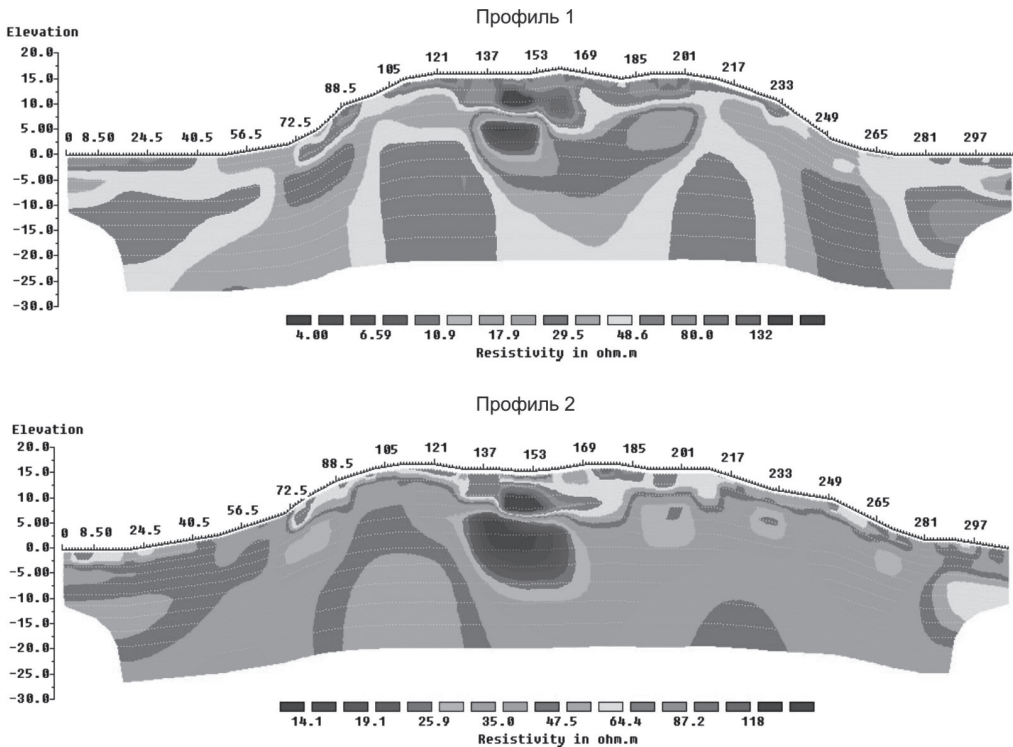


Рис. 2. Результаты инверсии данных электротомографии
 Fig. 2. Inversion of electric tomography data

близкой к массиву полигона [9]. Далее, при помощи корреляционных уравнений, были определены такие параметры, как внутреннее трение, удельный вес, удельное сцепление и плотность. На рис. 1 представлены результаты по одному из сейсмических профилей.

В результате толща полигонов захоронения ТБО в большинстве случаев была разбита на два-три более-менее однородных слоя. Мощность первого слоя составила около 1,5–2,0 м, плотность $\rho = 1,50\text{--}1,60$ г/см³, удельный вес $\gamma = 15\text{--}20$ кН/м³, угол внутреннего трения $\varphi = 25\text{--}30^\circ$, удельное сцепление $C = 40\text{--}50$ кПа. Мощность нижележащей толщи обычно составляла 10–12 м, плотность $\rho = 1,60\text{--}1,70$ г/см³, удельный вес $\gamma = 17\text{--}25$ кН/м³, угол внутреннего трения $\varphi = 20\text{--}27^\circ$, удельное сцепление $C = 55\text{--}80$ кПа.

На рис. 2 представлены примеры геоэлектрических разрезов, на которых выделяются локальные зоны низких и высоких значений сопротивлений, соответствующие участкам накопления фильтрата и «пустоты».

По данным электротомографии геоэлектрические разрезы полигонов ТБО достаточно сложные. Отмечаются аномальные зоны как низких значений удельных электрических сопротивлений, так и высоких. Низкие значения сопротивлений приурочены к основанию полигона. Высокие — к верхней части.

Такое расположение аномалий в разрезе полигона подтверждает природу выделенных зон. В нижней части полигона происходит накопление высокоминерализованного фильтрата. Сверху массив менее плотный и маловлажный с отдельными областями, в которых мо-

жет происходить накопление свалочного газа. В целом сам массив характеризуется относительно невысокими значениями сопротивлений, что указывает на достаточно высокую степень уплотнения и биоразложения отходов.

Профиль на рис. 2 характеризуется смещением области низких сопротивлений ниже поверхности грунтов естественного основания, что указывает на миграцию фильтрата из тела полигона в геологическую среду.

Выводы

Геофизические методы исследований показывают высокую эффективность для решения задач обнаружения зон скопления фильтрата и свалочного газа, позволяют выполнить экспресс-оценку физико-механических свойств свалочных грунтов.

При помощи сейсмотомографии возможно определение физико-механических свойств свалочных грунтов полиго-

нов захоронения грунтов. В то же время необходимо уточнение корреляционных зависимостей для свалочных грунтов и дальнейшие исследования в этом направлении. Полученные физико-механические свойства увеличиваются с глубиной. Выделяются отдельные области с пониженными значениями физико-механических и упругих свойств, указывающие на разуплотненное состояние в теле полигона, к которым могут быть приурочены зоны скопления биогаза.

По данным электротомографии выделяются области высоких и низких значений удельных электрических сопротивлений, указывающие на возможные места скопления биогаза и фильтрата. Отмечаются места миграции фильтрата в грунты естественного основания.

Получаемая при геофизических исследованиях информация позволяет существенно повысить безопасность и эффективность рекультивации полигонов ТБО горнодобывающих предприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Артемова А. И.* Использование комплекса геофизических методов для линейных изысканий // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2012. — Т. 2. — № 1. — С. 110–114.
2. *Боровский М. Я.* Свалочный газ: эколого-геофизические аспекты // Журнал экологии и промышленной безопасности. — 2014. — № 1–2. — С. 9–12.
3. *Кожонов А. К., Ногаева К. А., Молмакова М. С.* Обзор и классификация промышленных отходов рудных месторождений Кыргызской республики // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. — 2016. — № 4–1 (39). — С. 259–263.
4. *Куприенко П. С., Ашихмина Т. В., Овчинникова Т. В., Пинчук М. И.* Рекультивация закрытых полигонов ТБО // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. — 2017. — Т. 1. — № 8. — С. 445–447.
5. *Миронюк С. Г., Науменко Д. А., Винда А. А.* Применение методов сейсмо- и электротомографии для обнаружения зон повышенной трещиноватости при строительстве трубопроводов способом наклонно-направленного бурения в горно-складчатой области // Инженерные изыскания. — 2012. — № 9. — С. 18–24.
6. *Пугин К. Г., Ивенских О. В.* Материал для рекультивации полигонов ТБО и карьеров на основе отходов феррованадиевого производства // Фундаментальные исследования. — 2013. — № 10–9. — С. 1938–1941.
7. *Романов В. В.* Интерпретация сейсмической томографии на примере изучения геологического строения оползневого склона // Разведка и охрана недр. — 2015. — № 3. — С. 34–37.
8. *Романов В. В., Посеренин А. И., Дронов А. Н., Мальский К. С.* Обзор геофизических методов, применимых при поиске геомеханических нарушений вблизи горных выработок // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2016. — № 1. — С. 243–248.
9. *Романов В. В., Рахматуллин И. И., Грохольская С. А.* Определение модели физико-механических свойств вскрышных пород карьера при помощи сейсморазведки // Геоинформатика. — 2015. — № 2. — С. 63–67.

10. Фоменко Н. Е., Гапонов Д. А. Технологии пространственной фильтрации электрического поля при изучении техногенных и природных объектов // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. — 2013. — № 4. — С. 58–62.

11. Kouřalov I. et al. Rapid changes in magma storage beneath the Klyuchevskoy group of volcanoes inferred from time-dependent seismic tomography // Journal of Volcanology and Geothermal Research. — 2013. — Vol. 263. — P. 75–91.

12. Maślakowski M., Zbiciak A., Józefiak K. Tomografia elektrooporowa jako skuteczna metoda rozpoznawania nasypów antropogenicznych w warunkach budowy odcinka drogi S8 w okolicy Warszawy // Logistyka. — 2015. — №. 4. — P. 4792–4799, CD2.

13. Sjogren B. (ed.) Shallow refraction seismics / Springer Science & Business Media. 2013.

14. Wyering L. D. et al. Mechanical and physical properties of hydrothermally altered rocks, Taupo Volcanic Zone, New Zealand // Journal of Volcanology and Geothermal Research. — 2014. — Vol. 288. — P. 76–93. **ПЛАЭ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Романов Виктор Валерьевич¹ — кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой,

Мальский Кирилл Сергеевич¹ — кандидат технических наук, доцент, декан геофизического факультета, e-mail: sabbat@mail.ru,

Посеренин Алексей Игоревич¹ — старший преподаватель,

Иванов Андрей Александрович¹ — кандидат технических наук, доцент,

Дронов Андрей Николаевич — ведущий маркшейдер,

АНО «Аудит недропользования и консалтинг»,

¹ Российский государственный геологоразведочный университет

им. Серго Орджоникидзе (МГРИ-РГГРУ).

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 11, pp. 114–120.

Set of geophysical study methods for hard mining waste landfills

Romanov V.V.¹, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Head of Chair,

Malskiy K.S.¹, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Dean of the Geophysical faculty, e-mail: sabbat@mail.ru,

Poserenin A.I.¹, Senior Lecturer,

Ivanov A.A.¹, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,

Dronov A.N., Leading Mine Surveyor,

ANO «Subsoil Use Audit and Consulting», 105064, Moscow, Russia,

¹ Russian State Geological Prospecting University

named after Sergo Ordzhonikidze (MGRI-RSGPU), 117997, Moscow, Russia.

Abstract. Many operating and closed landfills of hard waste in mineral mining are the sources of environmental pollution. Meanwhile, Russia has many such landfills with the expired time of service life. In order to mitigate aggravating effect on nature, it is necessary to arrange systems of gas drainage and infiltrate accumulation, and to determine slope stability of landfills. It is also required to detect pockets of landfill gases and infiltrate to improve efficiency of such systems. The geophysical methods allow effective and fast solution of these objectives. Amongst them, specific place belongs to the current and advanced methods based on tomography. The tomographic measurements, as against the “classical” geophysical approaches, are meant for the analysis of complex-structured two- and three-dimensional media such as waste landfills—complicate and dynamic man-made objects having essentially nonuniform physical properties. The basic geophysical methods to solve the set objectives are seismic tomography and electric tomography. The seismic tomography enables assessment of physical-and-mechanical properties and density of landfills, which is required to determine slope stability of landfills and to locate weakened zones of possible gas pockets. The electric tomography makes it possible to identify zones of infiltrate pockets and hidden voids which can be filled with landfill gases and can induce ground surface subsidence. Physi-

cal-and-mechanical properties are assessed based on stable correlations between seismic wave velocities, density, unit weight, internal friction angle and specific cohesion as well as the other indexes of landfill stability. Pockets of infiltrate and landfill gases are detected based on lower and high values of electric resistivity, respectively. The case studies discussed demonstrate efficiency of geophysical studies implemented at landfills of hard mining waste.

Key words: geophysical methods, electric tomography, seismic tomography, hard waste landfills.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-0-114-120

REFERENCES

1. Artemova A. I. Ispol'zovanie kompleksa geofizicheskikh metodov dlya lineynykh izyskaniy [Use of a set of geophysical methods for route survey]. *Interesko Geo-Sibir'*. 2012, vol. 2, no 1, pp. 110–114. [In Russ].
2. Borovskiy M. Ya. Svalochnyy gaz: ekologo-geofizicheskie aspekty [Landfill gas: ecological and geophysical aspects]. *Zhurnal ekologii i promyshlennoy bezopasnosti*. 2014, no 1–2, pp. 9–12. [In Russ].
3. Kozhonov A. K., Nogaeva K. A., Molmakova M. S. Obzor i klassifikatsiya promyshlennykh otkhodov rudnykh mestorozhdeniy Kyrgyzskoy respubliky [Review and classification of ore mining waste in the Kyrgyz Republic]. *Izvestiya Kyrgyzskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. I. Razzakova*. 2016, no 4–1 (39), pp. 259–263. [In Russ].
4. Kuprienko P. S., Ashikhmina T. V., Ovchinnikova T. V., Pinchuk M. I. Rekul'tivatsiya zakrytykh poligonov TBO [Reclamation of closed hard waste landfills]. *Pozharnaya bezopasnost': problemy i perspektivy*. 2017. vol. 1, no 8, pp. 445–447. [In Russ].
5. Mironyuk S. G., Naumenko D. A., Vinda A. A. Primenenie metodov seismo- i elektrotomografii dlya obnaruzheniya zon povyshennoy treshchinovatosti pri stroitel'stve truboprovodov sposobom naklonno-napravlennoogo bureniya v gorno-skladchatoy oblasti [Application of seismic and electric tomography to finding increased fracturing zones in pipelining with inclined direction drilling in mountain folded regions]. *Inzhenernye izyskaniya*. 2012, no 9, pp. 18–24. [In Russ].
6. Pugin K. G., Ivenskikh O. V. Material dlya rekul'tivatsii poligonov TBO i kar'erov na osnove otkhodov ferovanadievoogo proizvodstva [Reclamation material for hard waste landfills and open pits based on ferovanadium production rejects]. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2013, no 10–9, pp. 1938–1941. [In Russ].
7. Romanov V. V. Interpretatsiya seismicheskoy tomografii na primere izucheniya geologicheskogo stroeniya opolznevogo sklona [Interpretation of seismic tomography in terms of studying subsurface geology of land sliding slope]. *Razvedka i okhrana nedr*. 2015, no 3, pp. 34–37. [In Russ].
8. Romanov V. V., Poserenin A. I., Dronov A. N., Mal'skiy K. S. Obzor geofizicheskikh metodov, primenimykh pri poiske geomekhanicheskikh narusheniy vblizi gornykh vyrabotok [Review of geophysical methods used in detection of geomechanical damage of rocks in the vicinity of underground excavations]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2016, no 1, pp. 243–248. [In Russ].
9. Romanov V. V., Rakhmatullin I. I., Grokhol'skaya S. A. Opredelenie modeli fiziko-mekhanicheskikh svoystv vskryshnykh porod kar'era pri pomoshchi seysmorazvedki [Determining model of physical and mechanical properties of open pit mine overburden by seismic exploration]. *Geoinformatika*. 2015, no 2, pp. 63–67. [In Russ].
10. Fomenko N. E., Gaponov D. A. Tekhnologii prostranstvennoy fil'tratsii elektricheskogo polya pri izuchenii tekhnogennykh i prirodnykh ob'ektov [Technology of spatial filtering of electric field in the studies of natural and man-made objects]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka*. 2013, no 4, pp. 58–62. [In Russ].
11. Koulakov I. et al. Rapid changes in magma storage beneath the Klyuchevskoy group of volcanoes inferred from time-dependent seismic tomography. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2013. Vol. 263, pp. 75–91.
12. Maślakowski M., Zbiciak A., Józefiak K. Tomografia elektrooporowa jako skuteczna metoda rozpoznawania nasypów antropogenicznych w warunkach budowy odcinka drogi S8 w okolicy Warszawy. *Logistyka*. 2015. no 4, pp. 4792–4799, CD2.
13. Sjogren B. (ed.) Shallow refraction seismics. *Springer Science & Business Media*. 2013.
14. Wyering L. D. et al. Mechanical and physical properties of hydrothermally altered rocks, Taupo Volcanic Zone, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2014. Vol. 288, pp. 76–93.

