

Рациональное природопользование

DOI 10.34828/UdsU.2020.26.81.003

УДК 661.185

М.Я. Боровский, С.В. Шакуро, А.С. Борисов, В.И. Богатов

ПОЛИГОНЫ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ И СВАЛКИ КАК ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ УГЛЕВОДОРОДНОГО СЫРЬЯ И ОБЪЕКТЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Аннотация. Рассмотрены аспекты промышленного использования свалочного газа (биогаза) в качестве альтернативного источника энергии в западных странах и в России. Подчеркнуты негативное влияние полигонов ТБО на окружающую среду и необходимость ведения экологического мониторинга. Для определения тенденции развития загрязнения окружающей среды сформулирована стадийность геофизических исследований свалок и полигонов твердых бытовых отходов. Приведены примеры использования электротомографии. Продемонстрирована возможность использования карт площадного распределения электрических свойств для оценки защищенности геологической среды от негативного воздействия процессов, происходящих в теле полигонов ТБО и свалок.

Ключевые слова: полигоны ТБО, свалочный газ, альтернативный источник энергии, экология, мониторинг, электротомография.

Для цитирования: Боровский М.Я. Полигоны твердых бытовых отходов и свалки как дополнительные источники углеводородного сырья и объекты экологического мониторинга / М.Я. Боровский, С.В. Шакуро, А.С. Борисов, В.И. Богатов // Управление техносферой: электрон. журнал, 2020. Т.3. Вып.2. URL: <http://f-ing.udsu.ru/technosphere>. С.191 – 206.

DOI 10.34828/UdsU.2020.26.81.003

Свалочный газ (биогаз) – побочный продукт анаэробного разложения органических веществ отходов. По теплоте сгорания 1 м³ биогаза эквивалентен 0,8 м³ природного газа, 0,7 кг мазута или 1,5 кг дров, что дает основание говорить о целесообразности извлечения биогаза на полигонах ТБО (У.А. Баданова, О.А. Савватеева, С.П. Каплина, 2014).

Одним из важных секторов возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в мире является производство и энергетическое использование биогаза. Лидером в производстве биогаза по праву можно считать Евросоюз в целом и Германию в частности. Общее производство биогаза в ЕС в 2010 г. составило 10,9 млн т н.э. (эквивалент 13,5 млрд м³ природного газа), из них 6,7 млн т н.э. – произведено в Германии. При этом прирост по отношению к 2009 г. составил 31,3 %» [1].

Как видно, имеются резервы по освоению нетрадиционных скоплений углеводородов, к которым относятся техногенные источники в виде свалочного газа (биогаза). С распределением этих видов горючих «ископаемых» тесно связан и экологический аспект.

В Российской Федерации ежегодно образуется (А.С. Кузьмичев и др.) [1, 2] около 7 млрд т отходов, из которых используется лишь 2 млрд т или 28,6 %. На территории страны в отвалах и хранилищах накоплено около 80 млрд. т только твердых отходов.

Рядом организаций рассматриваются (А.С. Кузьмичев и др.) [1, 2] реальности и перспективы энергетического использования свалочного газа.

В 2011 году в Европейском Союзе 56,7 % биогаза произведено на биогазовых установках, использующих в качестве сырья отходы агропромышленного комплекса (АПК) и специально выращенное растительное сырье. Около трети биогаза (31,3 %) получено на полигонах ТБО. Оставшаяся часть (12 %) произведена на станциях очистки сточных вод. Биогаз полигонов ТБО играет главную роль в Великобритании, Франции, Италии и Испании, в то время как биогаз из сельскохозяйственных отходов и растительного сырья доминирует в Германии, Нидерландах, Чехии, Австрии, Бельгии, Дании и Восточной Европе. Биогаз преимущественно используется для производства электроэнергии и/или тепла. Доминирующая часть полезного использования энергии биогаза приходится на производство электроэнергии. В 2011 году

производство электроэнергии из биогаза в Евросоюзе возросло по сравнению с 2010 годом на 18,4 % и достигло 35,9 ТВт/ч [1, 2].

По определению [1] «Биогаз – горючий газ, образующийся при анаэробном метановом сбраживании биомассы и состоящий, преимущественно, из метана (55...75 %), двуокиси углерода (25...45 %) и примесей сероводорода, аммиака, оксидов азота и других (менее 1 %)». В качестве сырья для производства биогаза могут использоваться как органические агропромышленные или бытовые отходы, так и растительное сырье – силос кукурузы, травяной силос, зерно и силос злаковых культур.

Свалочный газ негативно влияет на окружающую среду. Выделяются следующие факторы: загрязнение атмосферного воздуха; содержание огромного количества токсичных и вредных веществ, крайне опасных для здоровья и жизни людей; биогаз оказывает губительное воздействие на растительный покров вокруг полигона и на его поверхности; в отсутствии управления его образованием и сбором происходит разрушение тела полигона вследствие сброса давления газа внутри него; свалочный газ является парниковым газом.

По мнению А.С. Кузьмичева и др.: «Именно добыча и дальнейшее использование газа полигонов являются наиболее приемлемыми, перспективными и обоснованными с экологической и экономической точек зрения» [2].

В скоплениях отходов активно протекает процесс окисления, сопровождающийся непрерывным выделением газов биологического происхождения, преимущественно метана, угарного и углекислого газов. Даже в сильные морозы зимой температура тела свалки не опускается ниже +30 °С. Из-за опасности самовозгорания на некоторых свалках в больших городах регулярно дежурят пожарные команды. В контуре свалки опасно бурить скважины, забивать в грунт металлические электроды и даже копать заступом,

поскольку эти воздействия могут привести к взрыву скопившихся внутри газов (Г.С. Вахромеев, 1995; [2]).

Для ряда регионов Российской Федерации разработаны [2, 3, 6] рациональные комплексы геофизических методов изучения свалок и полигонов твердых бытовых отходов. Минимально-достаточный набор геофизических исследований установлен [6] для объектов Хакасии и Красноярского края. По экспериментальным данным геофизический комплекс включает электроразведку ВЭЗ (вертикальное электрическое зондирование), СЭП (симметричное электропрофилирование), ЕП (естественная поляризация) в сочетании с газовой съемкой.

Для определения тенденции развития загрязнения окружающей среды сформулирована стадийность геофизических исследований свалок и полигонов твердых бытовых отходов [2, 3].

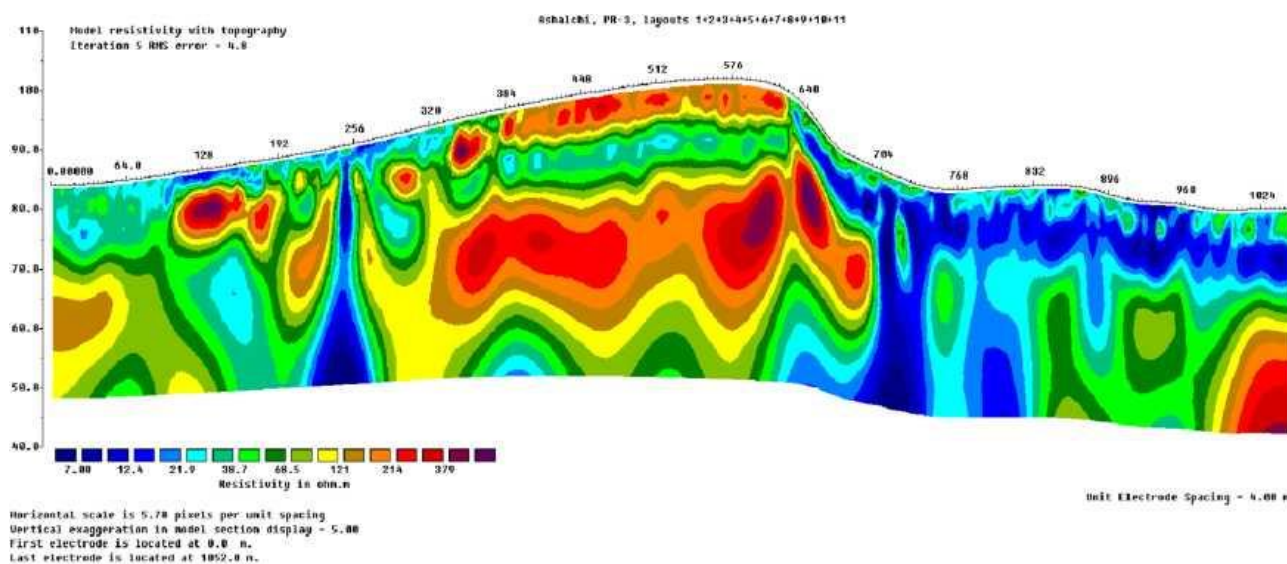
Существенна [2, 3] последовательность применения геофизических методов:

1. Предварительная оценка территории для прогнозирования санитарно-экологической обстановки и выбора оптимального расположения санкционированных свалок и полигонов ТБО, районирование земель по признаку чувствительности горных пород к различным видам загрязнения. Целевое назначение эколого-геофизических работ данной стадии – предотвращение или уменьшение негативных последствий влияния физико-химических процессов на окружающую среду. Имеются случаи (Г.В. Мамонова, В.В. Толмачев, 1997) строительства крупных полигонов промышленно-бытовых отходов в зонах интенсивного развития карстовых явлений.

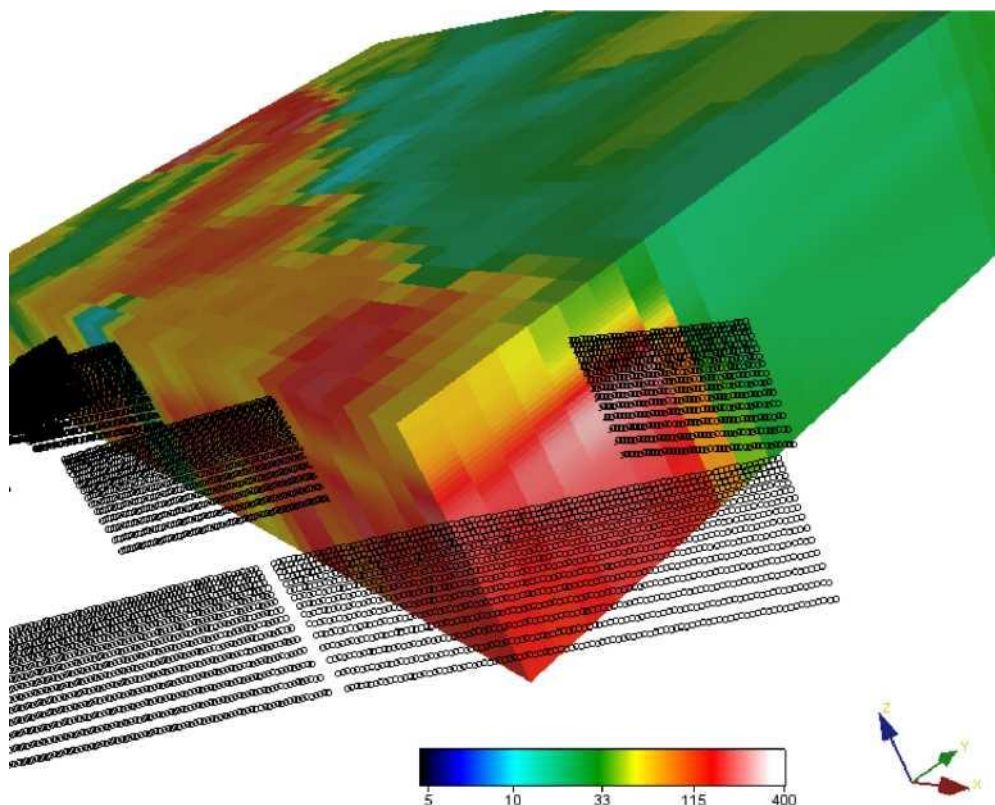
2. Определение нарушенных состояний недр и природы. Исследования проводятся в режиме мониторинга. Цель геофизического мониторинга – получение разносторонней информации о строении

геологической среды и влияния на литосферное пространство и атмосферу, техногенно-природной нагрузки. Решается важнейшая задача – оценка тенденций развития загрязнения с течением времени. При этом определяются границы распространения загрязнения и количественные показатели, характеризующие степень воздействия загрязнителей на окружающую среду.

Как известно, электроразведка методом сопротивлений остается одним из основных методов при малоглубинных геофизических исследованиях. До сих пор в геофизических предприятиях основной методикой проведения электроразведочных работ являются вертикальные электрические зондирования, нацеленные на изучение горизонтально-слоистых разрезов. Развитие компьютерной техники и программного обеспечения позволили перейти к двумерным (рис. 1) и трехмерным (рис. 2) измерительным схемам. Важная особенность электротомографии – увеличение производительности и качества работ, а также применение эффективных алгоритмов инверсии для изучения двумерных и трехмерных объектов.



**Рис. 1. Двухмерное представление (2D).
Геоэлектрический разрез по профилю 3**



**Рис. 2. Трехмерное представление (3D).
Куб УЭС по северо-восточной части месторождения**

Использование метода электротомографии рекомендовано Госстроем России (СП 11-105-97, часть VI, 2004) при любых детальнейших геофизических исследованиях, выполняемых в ходе инженерно-геологических изысканий. Особенно этот метод эффективен в зонах тектонических нарушений, в зонах городской застройки: в условиях, когда геологический разрез заметно выходит за рамки горизонтально-слоистого.

С целью выбора оптимального местоположения санкционированных свалок на одном из участков Закамья Республики Татарстана проведено электрическое зондирование методом электротомографии.

Полевые работы выполнены комплектом аппаратуры ЭРП-1-48, включающим генератор ЭРП-1А, измеритель ЭРП-1А и 48-канальный коммутатор ЭРП-К48. 48-канальная электроразведочная коса состоит из двух сегментов по 24 канала; расстояние между соседними электродами на профиле

4 метра, общая длина расстановки $48 \times 4 = 192$ метра. При производстве работ после отработки всех 48 каналов ближние 24 канала остаются на месте, а дальние перекадываются вперёд по ходу профиля; таким образом, непрерывный профиль электротомографии обрабатывается с полуторным перекрытием (рис. 3).

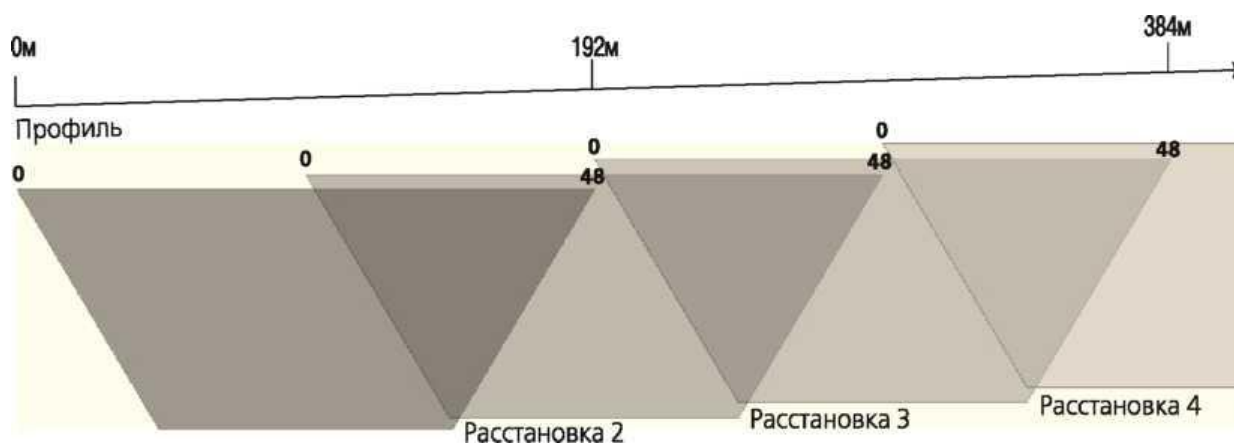


Рис. 3. Схема отработки непрерывного профиля электротомографии

Обработка данных электротомографии проведена в несколько этапов.

На первом этапе с помощью программы *x2iri* выполнен контроль качества полевых данных, выявлены бракованные замеры, объединены воедино отдельные сегменты профиля.

Дальнейшая обработка подготовленных таким образом полевых данных — двумерная инверсия — проведена с использованием программного обеспечения *Res2DInv*. При максимальном разnose питающей линии $AB=192$ м глубина изучения на данном типе разреза составляет 25-30 метров и более.

На рис. 4 показана условная модель, где на фоне разреза с удельным сопротивлением $25 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ имеется внедрение низкоомного ($5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) субстрата сложной конфигурации и расчётный разрез кажущегося сопротивления для предлагаемой дипольной установки зондирования (использована программа *Res2DMod*). На рис. 5 показан результат решения обратной задачи: восстановленный в результате автоматической 2D-инверсии (*Res2DInv*)

синтетических данных – геоэлектрический разрез. На полученном разрезе отрисована конфигурация низкоомных шлейфов, определена глубина их залегания. Место внедрения низкоомного субстрата снизу локализовано, несмотря на то, что в поле кажущегося сопротивления эпицентр низкоомной аномалии заметно смещён в сторону от него.

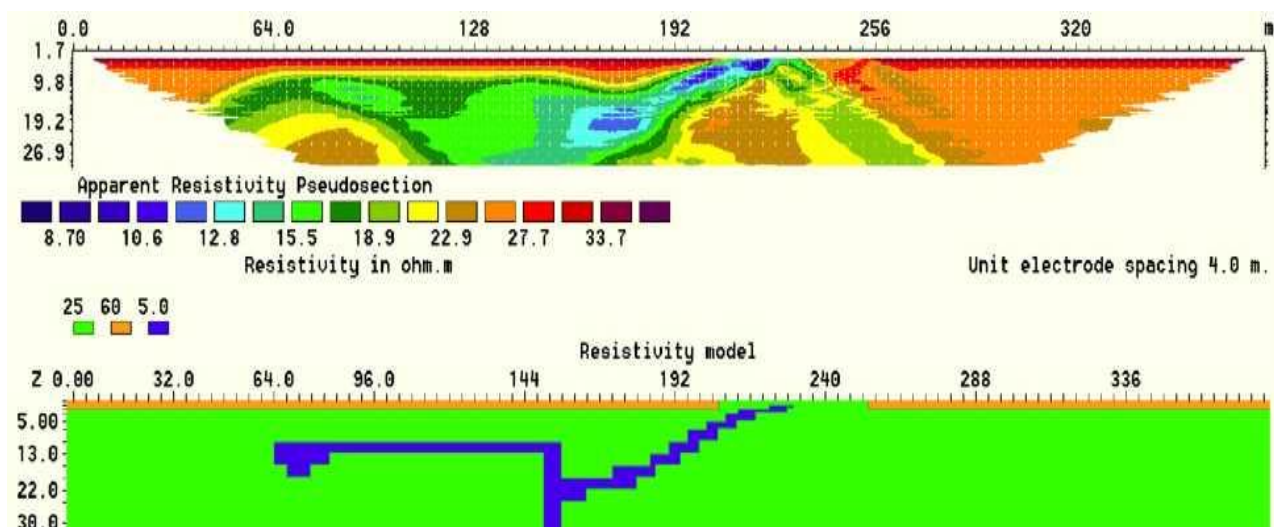


Рис. 4. Геоэлектрическая модель засоления (внизу) и расчётный разрез кажущегося сопротивления для дипольной установки зондирования (вверху)

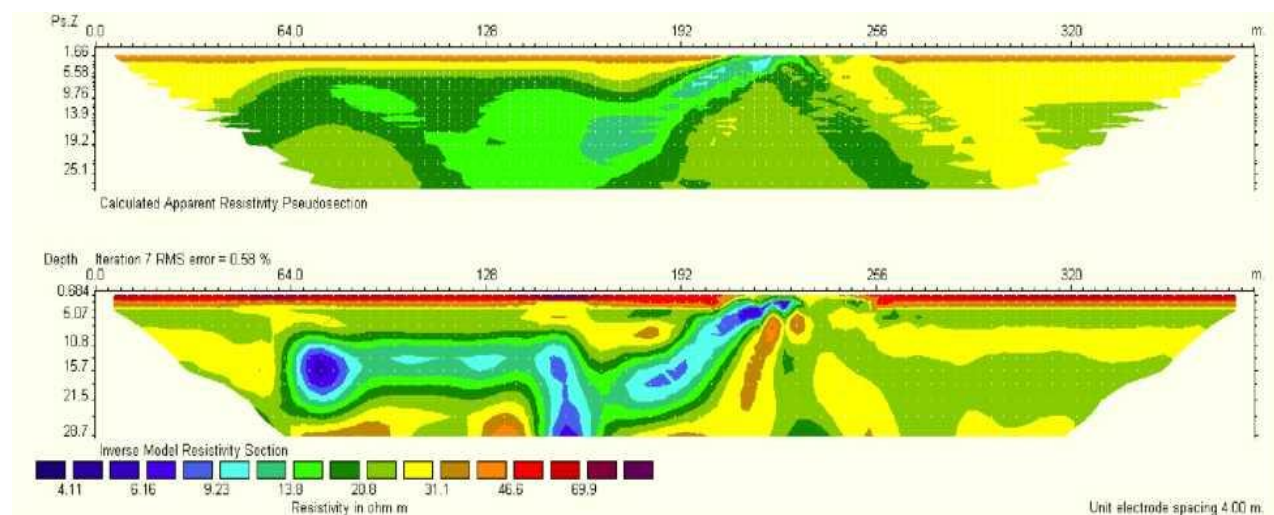


Рис. 5. Геоэлектрический разрез по результатам 2D-инверсии синтетических данных (внизу) и расчётный разрез кажущегося сопротивления (вверху)

Результаты моделирования позволяют утверждать, что в указанном интервале глубин электротомография позволяет детально закартировать низкоомные ореолы загрязнения (минерализованные воды, горячие воды, свалочный фильтрат) и локализовать их источники.

По каждому профилю составлены разрезы кажущегося сопротивления, по которым выполнена 2D-инверсия и составлены разрезы удельных электрических сопротивлений. Полученные по результатам обработки материалов профильной электротомографии данные использованы для формирования карт площадного распределения электрических физических свойств (удельного электрического сопротивления) отложений верхней части геологического разреза. Построения выполнены по осредненным величинам геофизического параметра ($U_{ЭС}$) для всей изученной толщи (интервал глубин 0-40 м) и для отдельных гипсометрических интервалов («срезы»: 70-90 м, 60-70 м).

Привлекает внимание возможность использования карт площадного распределения электрических свойств для оценки защищенности геологической среды от негативного воздействия процессов (указаны выше), происходящих в теле полигонов ТБО и свалок.

Под природной (естественной) защищенностью недр, в первую очередь, пресных подземных вод, понимают перекрытость водоносного горизонта слабопроницаемыми отложениями, препятствующими проникновению загрязняющих веществ с поверхности земли в глубокие слои. Фильтрация поллютантов возможна всегда, поскольку приповерхностная часть разреза, как правило, не сложена водопроницаемыми породами (водоупорами). Анализ условий защищенности подземных вод «сверху» территории Татарстана показывает (Боровский и др. 2016), что на 17 % площади они защищены от поступления загрязняющих веществ с поверхности земли, на 35 % – условно защищены, на 48 % не защищены.

Как известно, одним из условий успешного применения разведочной геофизики служит дифференцированность физических свойств горных пород. Важным физическим параметром является удельное электрическое сопротивление, которое изменяется в широких пределах и определяется рядом геолого-гидрогеологических факторов [2-5, 7].

Наиболее низкими и, в то же время, мало меняющимися сопротивлениями отмечаются глинистые породы. Глины морского происхождения имеют удельное сопротивление от 1-2 до 10 Ом·м. Оно возрастает с увеличением доли песчаных фракций. Для континентальных глин характерны величины сопротивлений 5-20 Ом·м, для суглинков 15-40 и для супесей 25-60 Ом·м. Сопротивление песков определяется в основном их водонасыщенностью и минерализацией воды, заполняющей поры. Последний фактор, как отмечает Г.П. Новицкий [4, 5], при картировании не имеет существенной роли, так как на небольших глубинах воды практически пресные. Однако не исключено, что в районах интенсивной добычи воды верхних горизонтов могут быть минерализованы.

В целом, для рыхлых осадочных пород установлена следующая закономерность: сопротивление их тем больше, чем больше размер зерен. При переходе от глин к суглинкам, супесям, пескам и гравийным отложениям значение геофизического параметра увеличивается от первых единиц до сотен омметров [4, 5]. Данное положение [4, 5], включено в основу составления карты оценки естественной защищенности верхней части геологического разреза проектного местоположения объекта (рис. 6). В качестве исходной использована полученная по данным электротомографии карта удельного электрического сопротивления в интервале глубин 0-40 м.

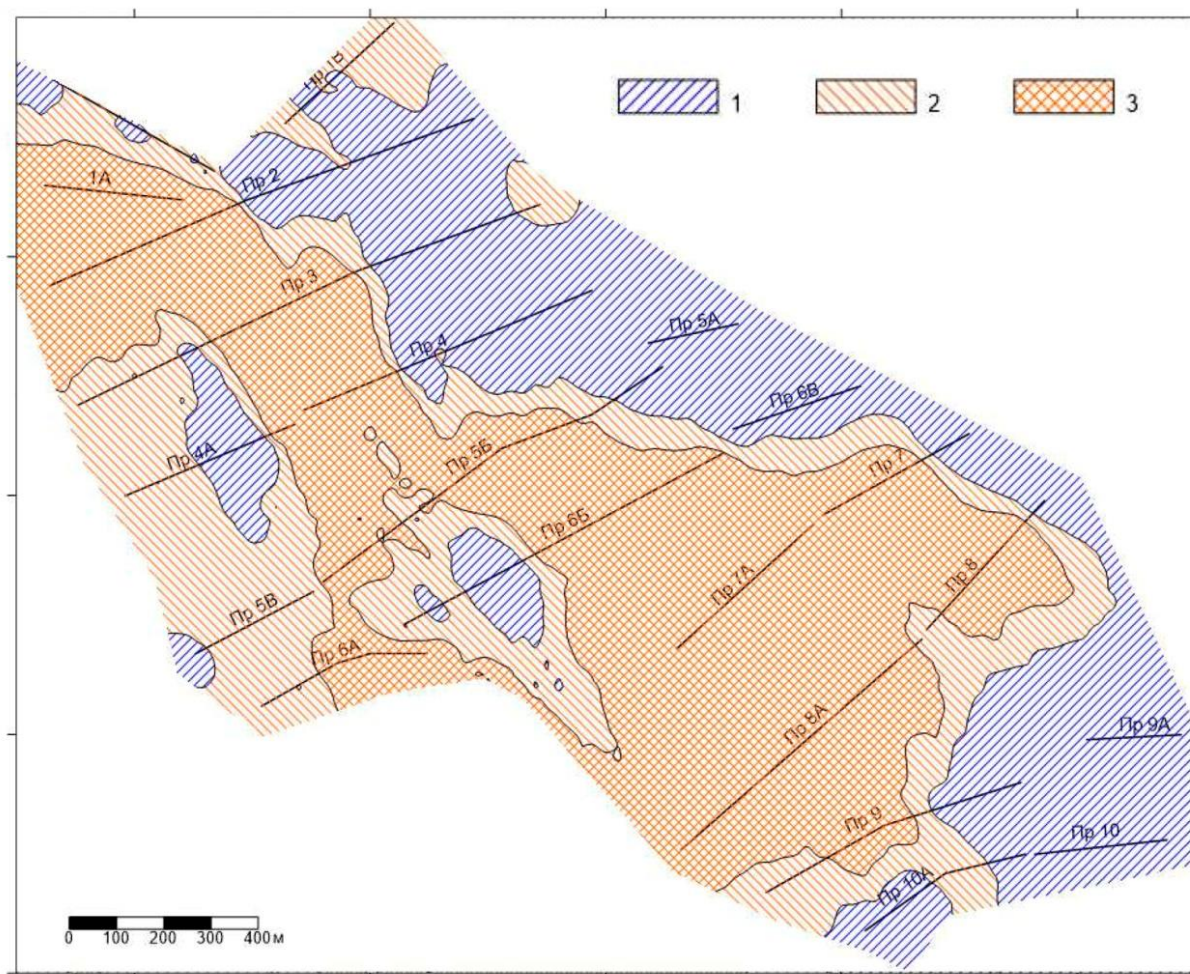


Рис. 6. Карта оценки природной защищенности приповерхностной части разреза (по данным электротомографии)

Условные обозначения: защищенность: 1 – хорошая, 2 – удовлетворительная, 3 – плохая

Принято, что наихудшими условиями естественной защищенности недр обладают участки, сложенные преимущественно песчаными породами. Для них характерны величины параметра более 60 Ом·м. Наилучшие условия защищенности свойственны участкам, где развиты преимущественно глины и отложения с повышенным содержанием глинистых фракций (суглинки и др.). Удельное электрическое сопротивление горных пород в этом случае не превышает 40 Ом·м. Удовлетворительной защищенностью характеризуются участки, где распространены горные породы с удельным электрическим

сопротивлением в пределах 40-60 Ом·м. Здесь вероятны различные соотношения плохо и хорошо проницаемых слоев.

Карта оценки природной защищенности (рис. 6) может использоваться как для определения уязвимости окружающей среды (воздух, земельные и лесные угодья, поверхностные воды и др.) как «снизу», так и естественной защищенности зоны пресных подземных вод «сверху».

Составление карты оценки природной защищенности приповерхностной части геологического разреза целесообразно при составлении проектов обустройства полигонов ТБО и санкционированных свалок, определения экологического ущерба и планирования природоохранных мероприятий на урбанизированных и окружающих территориях.

Свалочный газ представляет существенный резерв в общей системе нетрадиционных источников углеводородного сырья. Эффективное освоение этого вида горючих полезных ископаемых может быть осуществлено на основе геофизического изучения геологических и гидрогеологических условий их залегания. Существенна своевременная оценка экологической обстановки территории распространения этих техногенных объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гелетуха Г.Г. Перспективы производства и использования биогаза в Украине / Г.Г. Гелетуха, П.П. Кучерук, Ю.Б. Матвеев и др. // Промышленная теплотехника, 2013. № 6. С. 81.
2. Боровский М.Я. Свалочный газ: эколого-геофизические аспекты // Материалы IX Межрегиональной научно-практической конференции «Промышленная экология и безопасность». Журнал ЭиПБ. № 1-2, 2014. С. 9 – 12.
3. Боровский М.Я. Методология геофизической оценки влияния полигонов и свалок твердых отходов на окружающую среду // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы XXXVI

Сессии Международного семинара имени Д.Г. Успенского, г. Казань, 26-31 января 2009 г. Казань: Изд-во Казан. гос. ун-та, 2009. С. 69 – 72.

4. Боровский М.Я., Борисов А.С., Фахрутдинов Е.Г. Комплексное геолого-геофизическое изучение верхней части осадочного чехла. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2016. 216 с.
5. Боровский М.Я., Газеев Н.Х., Нургалиев Д.К. Геоэкология недр Республики Татарстан: геофизические аспекты. Казань: Экоцентр, 1996. 316 с.
6. Пустозеров М.Г. Возможности геофизических методов при изучении свалок твердых отходов / Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология, 2002. № 2. С. 182 – 191.
7. Шакуро С.В., Шакуро С.В., Боровский М.Я. Геофизическая оценка площадей, загрязненных нефтепродуктами, на урбанизированных территориях // Энергоресурсо-эффективность и энергосбережение в Республике Татарстан: труды X Международного симпозиума. Казань, 1-3 декабря 2009 г. Казань: Изд-во Печатный салон «Онегин», 2009. С. 202 – 212.

Поступила в редакцию 14.05.2020

Сведения об авторах

Боровский Михаил Яковлевич

Кандидат геолого-минералогических наук, Гендиректор ООО «Геофизсервис». г. Казань. Республика Татарстан, Россия.

Email: micbor1913@mail.ru

Шакуро Сергей Владимирович

Генеральный директор ООО «ФРОНТ Геология», г. Нижний Новгород, Россия.

Email: s.shakuro@gmail.com

Борисов Анатолий Сергеевич

Старший научный сотрудник, д.г.-м.н., профессор кафедры геофизики и геоинформационных технологий, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Республика Татарстан, Россия.

Email: basgeo49@mail.ru

Богатов Владимир Ильич

Ведущий геофизик ООО «Геофизсервис». г. Казань, Республика Татарстан, Россия.

Email: vladbogatoff@gmail.com

M.Ya. Borovsky, S.V. Shakuro, A.S. Borisov, V.I. Bogatov

SOLID WASTE LANDFILLS AND LANDFILLS AS ADDITIONAL SOURCES OF HYDROCARBON GAS AND ENVIRONMENTAL MONITORING FACILITIES

Annotation. Aspects of industrial use of landfill gas (biogas) as an alternative energy source in Western countries and in Russia are considered. The negative impact of landfills on the environment and the need for environmental monitoring are emphasized. In order to determine the development trend of environmental pollution, a stage-by-stage geophysical survey of landfills and solid waste landfills is formulated. Examples of using electrotomography within solid waste landfills are given. The possibility of using maps of the area distribution of electrical properties to assess the protection of the geological environment from the negative impact of processes occurring in the body of solid waste landfills and landfills is demonstrated.

Key words: solid waste, landfill gas, alternative source of energy, ecology, monitoring, electrical resistivity tomography.

For citation: Borovsky M.Ya., Shakuro S.V., Borisov A.S., Bogatov V.I. [Solid waste landfills and landfills as additional sources of hydrocarbon gas and environmental monitoring facilities]. *Upravlenie tekhnosferoj*, 2020, vol. 3, issue 2. (In Russ.) Available at: <http://f-ing.udsu.ru/technosphere> pp. 191 – 206. DOI 10.34828/UdsU.2020.26.81.003

REFERENCES

1. Geletukha G.G., Geletukha G.G., Kucheruk P.P., Matveev Yu.B. etc. *Perspektivy proizvodstva i ispol'zovaniya biogaza v Ukraine* [Prospects for the production and use of biogas in Ukraine]. *Promyshlennaya teplotekhnika* [Industrial heat engineering], 2013, no.6, pp. 81.
2. Borovsky M.Ya. *Svalochnyi gaz: ekologo-geofizicheskie aspekty* [Landfill gas: ecological and geophysical aspects]. *Materialy IX Mezhhregional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Promyshlennaya ekologiya i bezopasnost'»* [Proceedings of the IX Interregional scientific and practical conference «Industrial ecology and safety»]. *Eipb Magazine*, 2014, no.1-2, pp. 9 – 12.
3. Borovsky M.Ya. *Metodologiya geofizicheskoi otsenki vliyaniya poligonov i svalok tverdykh otkhodov na okruzhayushchuyu sredu* [Methodology of geophysical assessment of the impact of landfills and landfills of solid waste on the environment]. *Voprosy teorii i praktiki geologicheskoi interpretatsii gravitatsionnykh, magnitnykh i elektricheskikh polei: materialy XXXVI Sessii Mezhdunarodnogo seminara imeni D.G. Uspenskogo, (g. Kazan', 26-31 yanvarya*

- 2009 g). [Questions of theory and practice of geological interpretation of gravitational, magnetic and electric fields: Materials of the XXXVI Session Of the international seminar named after D.G. Uspensky]. Kazan: Kazan publishing House. state University, 2009. pp. 69 – 72.
4. Borovsky M.Ya., Borisov A.S., Fakhrutdinov E.G. *Kompleksnoe geologo-geofizicheskoe izuchenie verkhnei chasti osadochnogo chekhla* [Complex geological and geophysical study of the upper part of the sedimentary cover]. Kazan: Kazan publishing House. UN-TA, 2016, 216 p.
 5. Borovsky M.Ya., Gazeev N.H., Nurgaliev D.K. *Geoekologiya nedr Respubliki Tatarstan: geofizicheskie aspekty* [Geoecology of the subsoil of the Republic of Tatarstan: geophysical aspects]. Kazan: Ecocenter, 1996, 316 p.
 6. Pustoselov M.G. *Vozmozhnosti geofizicheskikh metodov pri izuchenii svalok tverdykh otkhodov* [Possibilities of geophysical methods in the study of solid waste disposal]. *Geoekologiya, inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya* [Geoecology, engineering Geology, hydrogeology, Geocryology], 2002, no.2, pp. 182 – 191.
 7. Shakuro S.V., Borovsky M.Ya. *Geofizicheskaya otsenka ploshchadei, zagryaznennykh nefteproduktami, na urbanizirovannykh territoriyakh* [Geophysical assessment of areas contaminated with oil products in urbanized territories]. *Energoresurso-effektivnost' i energosberezhenie v Respublike Tatarstan: trudy Kh Mezhdunarodnogo simpoziuma. Kazan', (1-3 dekabrya 2009 g.)* [Energy Resource-efficiency and energy saving in the Republic of Tatarstan: proceedings of the X International Symposium], 2009. Kazan: publishing house «Onegin», 2009, pp. 202 – 212.

Received 14.05.2020

About the Authors

Borovsky Mikhail Yakovlevich

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, General Director «Geofizservice». Kazan. Republic of Tatarstan, Russia.

Email: micbor1913@mail.ru

Shakuro Sergey Vladimirovich

General Director «FRONT Geology», Nizhny Novgorod, Russia.

Email: s.shakuro@gmail.com

Borisov Anatoly Sergeevich

Doctor of Geological and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Geophysics and Geoinformation Technologies, Senior Researcher. Kazan Federal University, Kazan, Republic of Tatarstan, Russia.

Email: basgeo49@mail.ru

Bogatov Vladimir Ilyich

Leading geophysicist «Geofizservice». Kazan. Republic of Tatarstan, Russia.

Email: vladbogatoff@gmail.com