

ПРАВИТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(СПбГУ)

МАРКОВ Евгений Александрович

Выпускная квалификационная работа

*Геофизические методы при исследовании полигона твердых бытовых
отходов в Новгородской области*

Уровень образования: бакалавр

Направление: 05.03.02 «География»

Основная образовательная программа: СВ.5019.2018

Научный руководитель:

Заведующий кафедрой геофизики,
профессор кафедры, д.г.-м. н,
Титов Константин Владиславович

Рецензент:

Инженер ООО «ТехноТерра»
Мингалёва Татьяна Андреевна

Санкт-Петербург

2023

Оглавление

1.	Общие положения.....	3
1.1.	Экологические угрозы полигонов ТБО.....	3
1.2.	Обзор использования геофизических методов при исследовании полигонов ТБО.....	5
2.	Объект исследования.....	7
2.1.	Климат.....	8
2.2.	Геоморфология.....	9
2.3.	Геология дочетвертичных отложений.....	9
2.4.	Четвертичная геология.....	11
2.5.	Гидрология.....	12
2.6.	Гидрогеология.....	13
3.	Экологическая ситуация.....	13
3.1.	Результаты анализа проб твёрдых отходов.....	15
3.2.	Результаты анализа проб фильтрата.....	16
3.3.	Результаты анализа проб поверхностных вод.....	17
3.4.	Результаты анализа проб подземных вод.....	17
3.5.	Результаты анализа проб грунта.....	19
3.6.	Результаты газогеохимических исследований.....	20
4.	Методы геофизических исследований.....	20
4.1.	Электротомография.....	21
4.2.	Метод естественного электрического поля.....	24
5.	Сбор и обработка данных.....	27
5.1.	Электротомография.....	27
5.2.	Метод естественного электрического поля.....	29
6.	Результаты.....	30
6.1.	Электротомография.....	30
6.2.	Метод естественного электрического поля.....	32
7.	Обсуждение.....	34

Введение

На территории Российской Федерации находится 4277 объектов размещения отходов, внесённых в государственный реестр федеральной службы РОСПРИРОДНАДЗОРа от 07.08.2017. И без того огромное их число может быть дополнено новыми полигонами ТБО, многочисленными стихийными, несанкционированными свалками. Каждый объект размещения отходов выступает источником потенциальной опасности для окружающей среды. Являясь зоной хранения и продуцирования многочисленных опасных элементов, при нарушении изоляции их содержания существует высокий риск загрязнения поверхностных и подземных вод, почв, воздуха.

Данное исследование направлено на изучение полигона ТБО в Новгородской области с целью оценки его воздействия на окружающую среду. Ставились задачи оценить целостность водоупорного слоя, дать характеристику фильтрату, идентифицировать возможные гидрогеологические окна. Для выполнения поставленных задач на полигоне работ были проведены геофизические изыскания

1. Общие положения

1.1. Экологические угрозы полигонов ТБО

Полигонный фильтрат – чрезвычайно опасная жидкость, образованная в теле свалки в результате химических и биохимических реакций, при контакте с инфильтрованными атмосферными осадками. Он представляет собой высокоминерализованный раствор разнообразных органических и минеральных, зачастую опасных для окружающей среды веществ. Фильтрат имеет тёмный цвет, резкий неприятный запах, также характеризуется высоким содержанием патогенных бактерий [Беяева Ю.Л. 2009]

Главная опасность фильтрата состоит в его возможном проникновении в естественную среду, и загрязнении почвы и грунтовых вод. Так, у села Подгорцы в Киевской области отмечено содержание Cu, превышающее ПДК более чем в 300 раз, Pb – в 30 раз, Zn – в 90 раз, Ni – в 5 раз, Cr – в 2 раза. Отравление вызвано влиянием местного полигона ТБО [Азимов А.Т. 2019]. При изучении несанкционированных свалок города Ульяновск отмечаются превышения ПДК по содержанию органического вещества, аммонийного азота, серы, фосфора, тяжёлых металлов [Иванова Ю.С. 2011].

Набор загрязнителей в грунтовых водах схож с тем, что фиксируется в почвах. При исследовании состава подземных вод в районе населённого пункта Красный Яр фиксируется наличие ранее отсутствовавших фенолов, повышенное содержание хлоридов, ионов аммония, нитратов, закисление вод

[Шарова О.А. 2014]. В подземных водах у полигона РУП МТЗ в Минской области обнаруживается превышение ПДК Na, NH₄, Fe, Mn, Pb, Cd, Ba, нефтепродуктов, фенолов, синтетических поверхностно-активных веществ, превышены показатели предельной жесткости, окисляемости, сухого остатка [Ерошина Д.М. 2012].

Указанные примеры демонстрируют широкое разнообразие загрязняющих веществ и отражают вредное воздействие полигонного фильтрата на естественную среду. В целях недопущения загрязнения производится изъятие фильтрата через дренажную систему. Механизм изложен в данной статье [Соломин И.А 2020]

Свалочный газ – одна из разновидностей биогаза, образованный в результате микробной деятельности в теле свалки. Он формируется из растворённых в воде сложных полиуглеродных соединений, подвергнутых ферментативному гидролизу, в процессе ацидогенеза образовывались CO₂ и H₂, при последующем восстановлении CO₂ молекулярным водородом, или при анаэробном разложении органики формируется CH₄ [Эшанкулов О.Д. 2019]

Помимо перечисленных газов, отмечается выделение NO₂, NH₃, SO₂, CO, H₂S, кислоты (C₆H₄(CH₃)₂), толуола (C₆H₅CH₃), формальдегида (CH₂O) и пр. Тем не менее, большую часть составляют метан и диоксид углерода. Свалочный газ, ввиду присутствия большого количества парниковых газов, при эмиссии в атмосферу приводит к нагреванию атмосферного воздуха, усугубляя сложившуюся тенденцию глобального потепления. Другой опасностью является пожароопасность. Присутствие в газовой смеси метана и других легковоспламеняемых веществ увеличивают риск возгорания полигона. Проблема заключается в том, что устранить пожар крайне непросто. Полигон – это слоеный «пирог», который состоит из отходов, пересыпанных землей или песком, а источник возгорания может находиться на достаточно большой глубине. Наконец среди газов присутствуют и высокотоксичные вещества, способные у живых организмов вызвать отравление при дыхании [Каверин А.В. 2018, Karapidakis E.S. 2010, Рамазанов Р.С. 2021].

Впрочем, опасная смесь может быть изъята из тела свалки. Газ выкачивается при помощи системы скважин и вакуумных установок, после чего сжигается (полигон «Ядрово» Московская область), или используется для выработки электроэнергии («Кучино» Московская область, «Преображенка» Самарская область) [Рамазанов Р.С. 2021].

1.2. Обзор использования геофизических методов при исследовании полигонов ТБО

История применения геофизических методов при изучении полигонов ТБО довольно обширна. Они использовались в целях выбора места размещения полигона [El-Kelani R 2019]; мониторинга состояния полигона [Kondracka M 2021, Genelle F 2014]; мониторинга состояния окружающей среды [Ramalho E.C. 2012, Zume J.T. 2006]. В рамках мониторинга производится решение широкого спектра задач, зачастую в специфических условиях. Это обуславливает широкое разнообразие применяемых геофизических методов.

Наибольшую популярность в изучении полигонов ТБО завоевали электрические и электромагнитные методы, ввиду их возможности улавливать изменения химического состава, температуры, содержания жидкости в грунте. Кроме того, данные методы требуют минимальных капитальных и трудовых затрат, необходимых для их использования в инженерных геофизических исследованиях [Meju M.A. 2000]. Среди них самыми распространёнными являются методы: электротомографии (ЭТ) [Kondracka M. 2021; Pomposiello C. 2012; Genelle F. 2014 и др.], вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) [Ramalho E.C. 2012; Pomposiello C. 2012; Гусев А.П. 2021 и др.], метод естественного электрического поля (ЕП) [Bavusi M. 2006; Ramalho E.C. 2012; Touzani M 2021 и др.], метод вызванной поляризации (ВП) [Bavusi M. 2006; Pierwoła J. 2013], георадиолокации [Kondracka M. 2021; Pomposiello C. 2012].

Методы ЭТ и ВЭЗ позволяют получить картину распределения удельного электрического сопротивления (ρ_{Σ}) в грунте. В результате формируется представление о строении грунта: глубине и мощности залегания слоёв, положении и целостности водоупорных горизонтов. Как результат - возможность осуществить выполнение таких задач как: определение потенциальных площадок для захоронения твердых отходов [Smith D. 2003]; обнаружение пожароопасных зон [Frid V. 2010]; зон скопления фильтрата и биогаза [Романов В.В. 2018]; идентификация и характеристика загрязняющего шлейфа [Ramalho E.C. 2012].

При исследовании целостности верхнего водоупорного горизонта иногда используется автоматическое профилирование удельного сопротивления (АРР), характеризующееся большей мобильностью, но способной изучить строение грунта до глубины не более 3м [Genelle F. 2014]. Это необычный метод, изобретённый в 2001 году и получивший распространение с 2004 в области археологических изысканий. Он, как и ранее упомянутые методы ВЭЗ и ЭТ является методом сопротивления. АРР представляет собой систему из 8

колёсных электродов, пары подающих и пары питающих, буксируемых техникой. Специальная техника способна снимать показания кажущегося сопротивления в режиме реального времени. В результате установка способна обеспечивать среднюю скорость исследования около 4 м/с [Dabas 2006].



Рис. 1 Буксировка установки ARP на квадроцикле [Dabas 2006]

Метод ЕП основан на регистрации естественного электрического поля. Данный механизм даёт возможность: определить зоны аккумуляции фильтрата [Bavusi M. 2006]; охарактеризовать целостность водоупорного горизонта [Genelle F. 2011]; обнаружить зоны утечки фильтрата из отводных каналов [Гусев А.П. 2021]; дать характеристику распределения грунтовых вод под полигоном, идентифицировать в них шлейф загрязнения [Ramalho E.C. 2012, Touzani M 2021]. В условиях сухого климата и низкого контраста электропроводности между фильтратом и грунтовыми водами является наиболее действенным методом прослеживания загрязнения [Touzani M 2021]. Может быть применён в рамках исследования по поиску подходящего места для полигона ТБО [Osra F. 2019]

Метод ВП основан на изучении накопленных или перераспределенных зарядов в грунте под действием электрического тока. Это позволяет обнаруживать в теле полигона металлические конструкции [Bavusi M. 2006], часто используется совместно с ЭТ, в целях обнаружения загрязнения на контакте с глинистой толщей [Pierwoła J. 2013].

Подповерхностное радиолокационное зондирование производится с использованием георадара. Его работа основана на регистрации отражённых от границ объектов электромагнитных волн. Метод используется для определения геологических границ, поиска пустот. Часто используются в сочетании с другими методами для картирования и мониторинга полигонов ТБО. В сочетании с электрическими методами, могут быть использованы для обнаружения ореолов загрязнения [Kondracka M. 2021; Pomposiello C. 2012; Porsani J. 2004].

Наряду с электрическими и электромагнитными методами используются методы, основанные на регистрации упругих волн: сейсмотомография и многоканальный анализ поверхностных волн (MASW). Сейсмотомография позволяет выполнить оценку физико-механических свойств грунта, может использоваться для определения мощности отходов и уровня грунтовых вод [Kondracka M. 2021], при поиске разуплотнённых зон [Романов В.В. 2018]; позволяет определить потенциальные площадки для захоронения твердых отходов [El-Kelani R 2019];. Исследование MASW обычно ограничивается небольшой глубиной, в следствии чего его используют для получения более полных данных о приповерхностных горизонтах, определения границ полигона и характеристики пространственного распределения отходов [Kondracka M. 2021].

Распространена практика совмещения различных методов исследования с геофизическими. Часто производятся: химический анализ фильтрата с целью корреляции его состава и геоэлектрических характеристик [Meju M.A. 2000]; проводится геологическое исследование для корреляции литологических особенностей горизонтов с электрофизическими [Pierwoła J. 2013]. Помимо этого, происходят совместные исследования с методами: геоинформационных систем (ГИС), в целях определения участка проведения геофизических изысканий [Osra F. 2019]; петрографических методов для изучения химического состава шлаков [Mendecki M.J. 2020].

2. Объект исследования

Данное исследование проводилось в Новгородском районе Новгородской области на полигоне ТБО промышленных неметаллических отходов 3-5 классов опасности. Участок работ имеет площадь примерно 30 000 м², периметр – около 800 м. Склоны полигона крутые, обильно поросшие травянистой и кустарничковой растительностью. На момент проведения исследований эксплуатация восточной части свалки продолжалась, ввиду чего она условно разделена на зоны старых и новых отходов. Последняя располагается на северо-восточной части полигона.

Естественный рельеф в окрестностях полигона претерпел значительные изменения в результате хозяйственной деятельности. По периметру участка проходит неглубокая канава, глубиной около 1,5 метров, частично заполненная водой.

Поверхностный водонепроницаемый слой отсутствует. По результатам бурения уточнено строение полигона: тело свалки представлено песками с обломками древесины, кирпичей со строительным мусором с гнездами заторфованного грунта; идентифицирован подстилающий тело полигона экран на глубинах 8-12 м. Пески обильно увлажнены фильтратом. Экраном является местный водоупор, представленный моренными лёгкими пылеватыми суглинками.

2.1. Климат

Климат района умеренно-континентальный, характеризуется как умеренно холодный, с достаточно большим количеством осадков. Среднегодовая температура составляет 6,3°C. Самый тёплый месяц – июль, в этот период средняя температура воздуха составляет 19,6°C. Среднемесячное значение относительной влажности колеблется от минимального в 63,36% в мае до 86,34% в ноябре.

Участок проведения изысканий характеризуется избыточным увлажнением. В регионе в течение года в среднем выпадает 840 мм осадков. Наибольшее количество приходится на июнь – 96 мм, наименьшее на март – 44 мм [climate-data.org].

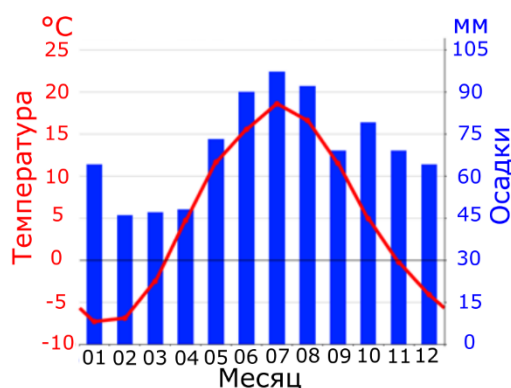


Рис. 2 Климатическая характеристика региона.[climate-data.org]

Регион характеризуется мягкими зимами. Снежный покров маломощен, на открытых полевых участках наибольшая декадная высота снега составляет 20 – 25 см [есоanaliz.ru]. Снег с равнин сходит уже в конце марта. Глубина промерзания почв колеблется от 40 см в районе развития торфяников, до 90 см в Мстинской впадине. Только в особенно суровые зимы глубина промерзания достигает полутора метров.

2.2. Геоморфология

Участок изысканий располагается в Восточно-Европейской стране, в пределах провинции аккумулятивного ледникового и водноледникового рельефа, возникшего в период последнего оледенения. Характеризуется распространением аккумулятивных и абразионных озерно-ледниковых и ледниковых равнин проксимальной зоны. Относится к Ильменско-Волховскому району.

Основными элементами рельефа в данной зоне выступают плоские или слегка волнистые озерно-ледниковые и ледниковые моренные слабо террасированные равнины. Холмисто-грядовые образования имеют обычно размытый облик и представлены комплексом моренных гряд и радиальными озами. Широко распространены крупные торфяники.

Геоморфологический район представлен плоской аккумулятивной озерно-ледниковой равниной, приуроченной к понижению доледниковой поверхности. Пониженные участки заняты озерно-аллювиальными и озёрными равнинами. Вдоль речных долин распространены размытые радиальные гряды.

Глубина залегания кристаллических пород в районе Новгорода составляет около 30-50 м. Они залегают сплошным покровом, обнажаясь только в районах Ильменского глинта, по рекам Тигоде и Крести. Молодые, голоценовые (аллювиальные, озёрные, озерно-аллювиальные) занимают наиболее низкие, центральные участки района. Ледниковые и озерно-ледниковые образования располагаются на относительно возвышенной периферии. В подошве четвертичного горизонта наблюдаются моренный осадок мощностью 2-6 м. Над мореной, имея мощность в несколько метров залегают ленточные глины [Разумихин Н.В. 1978].

2.3. Геология дочетвертичных отложений

Новгородская область находится на Восточно-Европейской платформе, в пределах северо-западной части Русской плиты, на территории Прибалтийского региона. Стабильный тектонический режим региона определил пологое залегание массивной толщи осадочных пород венда - верхнего девона на глубоко залегающем кристаллическом фундаменте.

Кристаллический фундамент северо-западной части Русской плиты образован сложно дислоцированными гнейсами, гранито-гнейсами, амфиболитами и сланцами. Древнейшие осадочные породы относятся к верхнему протерозою, наблюдаются в районе Крестецкого прогиба. Это песчаники и гравелиты с прослоями туфов и туфобрекчий, общей мощностью более 600 м.

Вендские отложения представлены котлинским и гдовским горизонтами валдайской серии. Первый представлен песками, песчаниками и аргиллитами мощностью 60-260 м. Второй – аргиллитоподобными тонкослоистыми глинами зеленовато-серого или красновато-коричневого цвета, мощностью 80-90 м.

Ломоносовская свита балтийской серии нижнего кембрия представлена кварцевыми песчаниками с прослоями и линзами аргиллитоподобных глин мощностью 20-55 м. Лонтоваская свита представлена аргиллитоподобными глинами с линзами песчаников, имеет мощность 50-150 м.

У кровли нижнекембрийских глин залегает толща песков и слабо сцементированных песчаников с тонкими прослоями и линзами глин и диктионемового сланца, общей мощностью от 30 до 140 м.

Над кембрий-ордовикскими песками залегает мощная (200-300 м) однородная толща известняков тонкозернистых, органогенно-обломочных, с прослоями мергелей и глин.

Девонские отложения представлены средними и верхними отделами, наровский горизонт живейского яруса состоит из пестроокрашенных глинисто-мергельно-доломитовых пород варьирующей мощности (6-140 м). Над ним залегает другой среднедевонский горизонт – старооскольский, представленный красноцветными косослоистыми песками, песчаниками, алевролитами мощностью 120-140 м.

Верхнедевонские отложения состоят из трёх литологических толщ. Нижняя представлена терригенными песчано-глинистыми породами, мощностью до 90-1000 м на юго-востоке и 10-15 м на северо-западе. Средняя – карбонатная толща глинистых и песчанистых доломитов, мергелей и известняков с прослоями глин, мощностью от нескольких десятков до 100 метров. Верхняя – преимущественно песчано-глинистая толща с прослоями мергелей, доломитов и известковых песчаников, достигает мощности в 350 м.

В восточной, возвышенной части области прослеживаются породы каменноугольного периода. Тульский горизонт составляют пески, чередующиеся с прослоями бурых углей и глин, мощностью от 2 до 65 метров. Алексинский и Михайловский горизонты формируют толщу переслаивания из чередующихся серых известняков и песчаноглинистых пестроцветных пород общей мощностью 15-25 м. Вышележащие горизонты образуют толщу известняков, иногда доломитизированных, Органогенные известняки содержат желваки кремния, маломощные прослои мергелей и песчано-глинистых пород. Мощность карбоновых известняков составляет 50-60 м. Над размытой кровлей залегает комплекс среднекарбоновых глин верейского

горизонта, и далее органогенные, местами доломитизированные известняки среднего карбона мощностью около 50м.

Самые молодые дочетвертичные отложения относятся к нижнеустыинскому горизонту верхней перми, представлены красноцветными песчаниками, алевритовыми глинами. Однако их мощность не превышает нескольких метров [Разумихин Н.В. 1978].

Индекс	Породы	Мощность
P3	Песчаники, алевритовые глины	До 10м
C2	Органогенные, местами доломитизированные известняки Глины	50м
C1	Толща переслаивания чередующихся серых известняков и песчаноглинистых пород	15-25м
	Пески, чередующиеся с прослоями бурых углей и глин	2-65м
D3	Песчано-глинистая толща с прослоями мергелей, доломитов и известковых песчаников	До 350м
	Карбонатная толща глинистых и песчаных доломитов, мергелей и известняков с прослоями глин	10-100м
	Терригенные песчано-глинистые породы	10-1000м
D2	Пески, песчаники, алевриты	120-140м
	Глинисто-мергельно-доломитовые породы	6-140м
O	Известняки тонкозернистые, органогенно-обломочные, с прослоями мергелей и глин	200-300м
Є-O	Пески и слабо сцементированные песчаники с тонкими прослоями и линзами глин и диктионемового сланца	30-140м
Є	Аргиллитоподобные глины с линзами песчаников	50-150м
	Кварцевые песчаники с прослоями и линзами аргиллитоподобных глин	20-55м
V	Аргиллитоподобные тонкослоистые глины	80-90м.
	Пески, песчаники и аргиллиты	60-260м
Pr3	Песчаники и гравелиты с прослоями туфов и туфобрекчий	Более 600м

Табл.1 – Последовательность залегания дочетвертичных отложений в районе работ.

2.4. Четвертичная геология

Четвертичные отложения распространены повсеместно на территории области, однако их мощность сильно варьируется в зависимости от рельефа. В районах крутых денудационных уступов, платообразных повышениях, в местах сильного флювиогляциального размыва они могут не превышать и 5 метров. При этом мощность четвертичных отложений, приуроченных к погребённым долинам могут достигать первых сотен метров. Наибольшая мощность в 226 м зафиксирована у ст. Неболчи. Наиболее хорошо развиты отложения плейстоцена.

Основная составляющая плейстоценовой толщи – отложения последнего ледникового максимума. Наиболее широко распространены валунные

песчано-глинистые моренные отложения. Локально распространены флювиогляциальные формы, по большей части в восточной части области где формируют крупные комплексы зандровых равнин. Они представлены гравийно-галечным материалом. В районе Валдайской возвышенности распространены озерно-ледниковые глинистые отложения, представленные звонцами и камами.

Четвертичные отложения не имеют столь широкого развития. Наибольшие площади слагаются верховыми болотными массивами. Меньше распространены озерно-аллювиальные отложения тонкозернистых песков и аллювиальные песчаные отложения. [Разумихин Н.В. 1978]

На территории проведения изысканий наиболее распространены нерасчленённые озерно-ледниковые отложения первого-второго ледниковых озёр. Осадки представлены песками, ленточными глинами, илами [Апухтин Н.И. 1969].

2.5. Гидрология

Участок изысканий относится к Шелонь-Волховскому гидрологическому району. Равнинный рельеф региона, сопряжённый с практически водоупорными подстилающими породами обусловили замедленные процессы поверхностного стока, слабое развитие грунтовых вод, однако широкое развитие верхнего водоносного горизонта – верховодки. Исключением являются немногочисленные участки, сложенные песками водноледникового происхождения.

Особенности региона обуславливают формирование поверхностного весеннего и дождевого стока, обильное увлажнение почво-грунтов. В понижениях рельефа развиваются торфяники. Распространены болота низинных и переходных типов. Коэффициент затопляемости для территории колеблется от 20 до 50%.

Густота речной сети составляет 0.81 км/км². Крупные реки имеют широко развитые поймы, распространены процессы меандрирования рек. Долины трапецеидальной формы, местами достигают в ширину 3 км, характеризуются слабым речным врезом – около 3 м. Крупные реки, протекающие в регионе: Волхов, Ловать, Мста, Шелонь, Пола, Вишера и др.

В дельтах рек наблюдается большое количество достаточно крупных озёр: Бол. Опархино, Мячино, Переклеп и др. Распространены старичные и другие пойменные озёра. Крупнейшее в регионе озеро – Ильмень является приледниковым озером.

В пойме оз. Ильмень и р. Волхов, в пределах региона, в результате весенних паводков затопляется около 70 тыс., иногда до 150 тыс. га.

Наивысший уровень воды в р. Волхов – 7,66 м, отмечен в 1966. Продолжительность весенних половодий около 50 дней. Только в отдельные годы дождевые паводки летне-осеннего периода способны составить 40% от весеннего.

В пределах района наблюдается относительно низкий годовой сток – 200-220мм (260мм на р. Волхов) по высоте слоя стока. Около 60% стока приходится на весенний сезон, до 31% на летне-осенний. Зимний сток ограничивается не более чем 10% годового стока. [Разумихин Н.В. 1978]

2.6. Гидрогеология

В Новгородской области подземные воды представлены верховодкой, горизонтами грунтовых и артезианских вод.

Первый горизонт подземных вод, грунтовых, поровых, безнапорных, широко представлен в отложениях аллювиального пойменного, болотного, водно-ледникового типов. Горизонт артезианских порово-трещинно-пластовых вод приурочены к верхнедевонским отложениям, к известнякам и доломитам, зачастую загипсованным [Разумихин Н.В. 1978], к песчаным прослоям[ecoanaliz.ru].

Наиболее характерный тип режима для подземных вод Новгородской области – междуречный и приречный (пойменный). Питание происходит через зону аэрации за счёт инфильтрации атмосферных осадков [ecoanaliz.ru], однако приток затруднителен ввиду существования естественного водоупора. Инфильтрационный тип питания обуславливает сезонные и годовые колебания уровня грунтовых вод, которые, исходя из условий залегания, характеризуются невысокими амплитудами без выделения резких пиков. Куда более значительным колебаниям подвержены воды пойменного типа, зависящие от режима рек [Балобаненко А.А. 2012].

Химический состав грунтовых вод Новгородской области преимущественно сульфатно-гидрокарбонатные кальциево-магниевонатриевые, гидрокарбонатно-сульфатные кальциево-натриевые, соленоватые (1-25 г/кг) и пресные, от очень мягких до очень жёстких, с нейтральным и щелочным рН. [ecoanaliz.ru]. При этом в регионе проведения изысканий химический состав грунтовых вод преимущественно хлоридно-натриевый, соленоватый [Архангельский Б.Н. 1963].

3. Экологическая ситуация

В рамках исследования полигона, группой экологов были проведены инженерно-экологические изыскания. Были отобраны и изучены пробы почв, природных вод, атмосферного воздуха. Исследовались пробы отходов,

проводились исследования газовой смеси в теле полигона. Данные изыскания позволили подтвердить и уточнить данные геофизических изысканий.

В результате исследования было обнаружено загрязнение приповерхностной части почв, органическое загрязнение поверхностных вод, сильное загрязнение подземных вод. Изучен состав отходов и химический состав фильтрата. Проведённый химический анализ утвердил факт проникновения фильтрата в естественную геологическую среду и загрязнения им подземных вод.

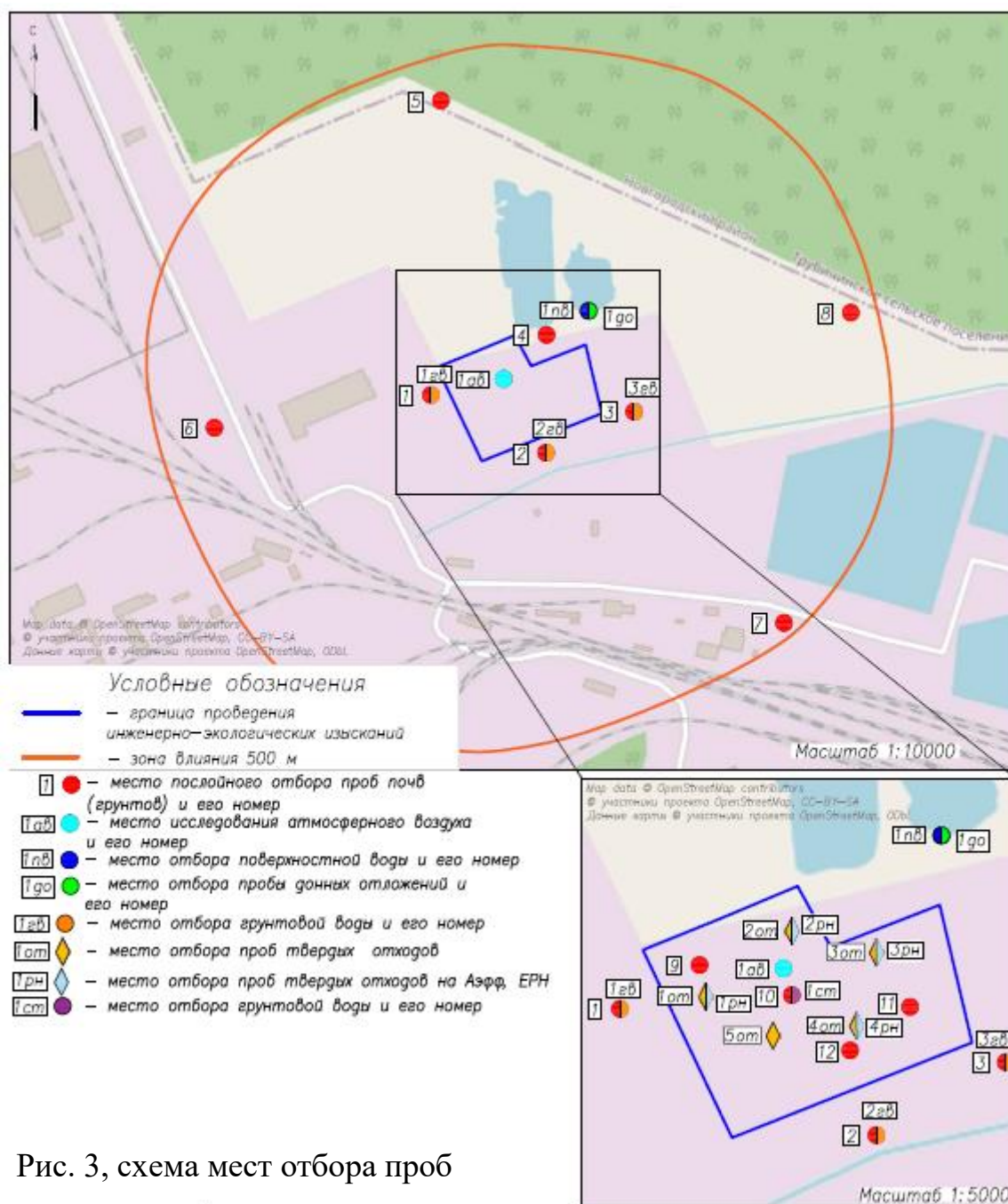


Рис. 3, схема мест отбора проб

3.1. Результаты анализа проб твёрдых отходов

Важной частью исследования полигона ТБО является характеристика складированных на нём отходов по морфологическому составу. При рекультивации полигона на основании характера отходов происходит выбор стратегии их переработки. Происходит реконструкция материальных потоков и оценка ресурсного потенциала. Кроме того, прямое исследование отходов, характеристика их морфологии, оценка увлажнённости даёт обоснование полученным ранее геофизическим данным.

Изучение проводилось группой экологов на 5 участках, два из которых (2от и 4от) относятся к зоне складирования новых отходов. Схема их расположения указана на рисунке 3. Основную массу отходов составляет песчаный отсев. Он превалирует над другими группами отходов на всех участках, а за пределами зоны складирования новых отходов может превышать и $\frac{3}{4}$ от всей массы пробы. Другими наиболее значимыми группами отходов являются древесина, пластмасса, резина, стекло и полиэтилен. Высока доля содержания камней. В зоне складирования новых отходов отсев хоть и составляет большую часть массы отобранных отходов, но не превышает и половины. Здесь содержание отходов наиболее значительно. Подробный морфологический состав каждого участка представлен на рисунке 4.

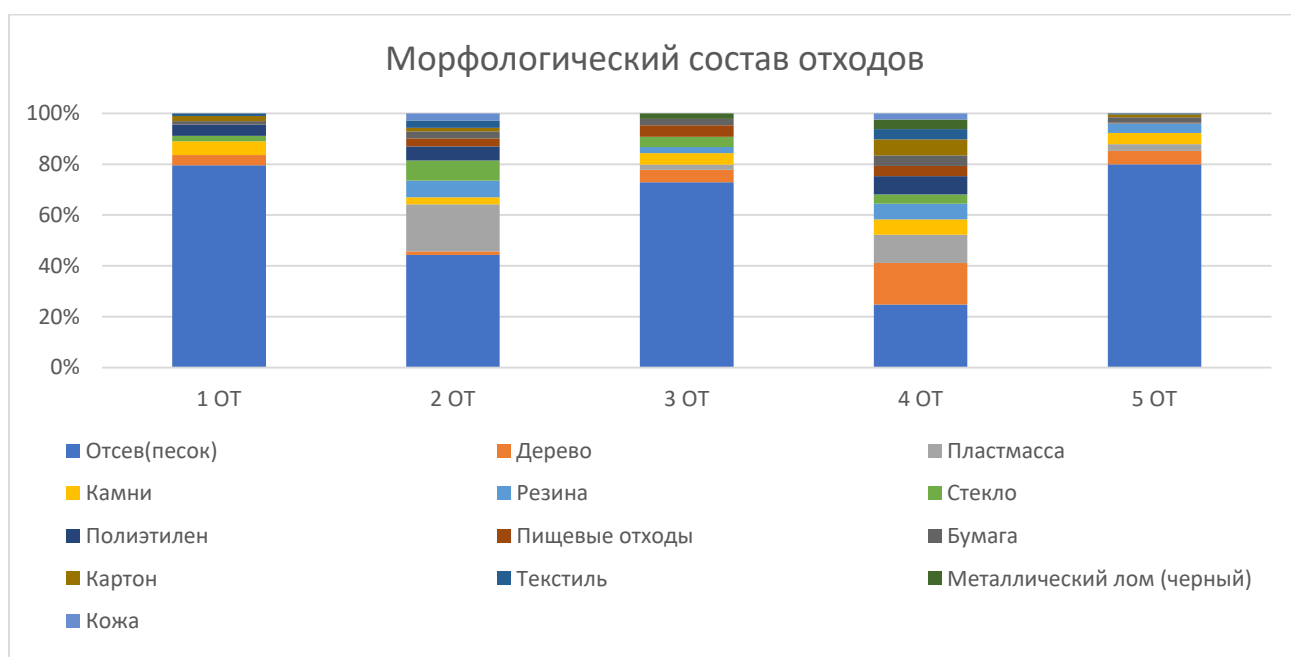


Рис. 4 Морфологический состав отходов.

Полученные данные очень полезны для обоснования геофизических исследований методом ЭТ. В местах проведения ЭТ магистрали насыпные грунты – песчаные. По степени увлажнённости охарактеризованы как влажные, насыщенные водой. В таблице 2 представлены ориентировочные величины расчётного удельного сопротивления грунта. УЭС сильно

увлажнённого песка довольно низкие показатели сопротивления. Следует также принять во внимание минерализацию фильтрата, что способствует большей электропроводности вмещающего его грунта, ввиду чего УЭС по данным геофизики местами может не достигать и 10 Ом*м. Это подтверждается и другими источниками [Bavusi M. 2006]. Подробнее об анализе проб фильтрата далее.

Грунт	Удельное сопротивление, среднее значение (Ом*м)
Песок, сильно увлажненный	10-60
Песок, умеренно увлажненный	60-130
Песок влажный	130-400
Песок слегка влажный	400-1500
Песок сухой	1500-4200

Табл. 2 ориентировочные величины расчётного удельного сопротивления грунта [zandz.com]

3.2. Результаты анализа проб фильтрата

В рамках инженерно-экологического исследования коллегами были отобраны образцы фильтрата. Информация о химическом составе раствора поможет идентифицировать возможное загрязнение почвы и поверхностных вод, источником которого выступает полигон ТБО. Анализ состава позволит установить конкретные неблагоприятные воздействия на живые организмы оказывает вода и почва, отравленная фильтратом. Информация о характере примесей, также, позволяет разработать наиболее эффективную стратегию обеззараживания фильтрата.

Отбор фильтрата производился на точке 1ст на глубине 7,2 метра, в зоне складирования новых отходов. Были произведены биотестирование фильтрата, и оценка его химического загрязнения. Ввиду отсутствия нормативов по содержанию загрязняющих веществ в фильтрате оценка загрязнённости воды проводилась на основе показателей ПДК водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования, воде плавательных бассейнов, аквапарков СанПиН 1.2.3685-21.

В отобранной пробе наблюдается превышение показателей ПДК по содержанию магния, лития, железа, марганца, кадмия, свинца, кремния, алюминия; превышено содержание растворённого кислорода, его биологического потребления, зафиксировано сильное загрязнение аммиаком. Минерализация воды составила 1834 мг/л, она является слабоминерализованной. Раствор несёт в себе угрозу для живых организмов близлежащих водоёмов. Большое количество разнообразных токсичных веществ может вызвать затруднение дыхания гидробионтов, стимулировать

развитие опухолей, деформацию скелета, нервнопаралитические заболевания, деструктивное генетическое воздействие [Грушко Я.М. 1982; azniirkh.vniro.ru] При попадании в природные воды такой раствор вызовет отравление и, возможно, массовую гибель живых организмов. При этом последствия такого загрязнения не могут быть устранены в короткие сроки.

Серьёзный характер загрязнения подтвердился и при биотестировании. Раствор оказал острое токсическое воздействие на ракообразных *Daphnia magna* и культуру водоросли *Chlorella vulgaris* Beijerinck.

3.3. Результаты анализа проб поверхностных вод

Основываясь на специфическом химическом составе фильтрата возможно установить его попадание в близлежащий водоём. С этой целью был проведён отбор воды и донных отложений и произведён их анализ на предмет химического и биологического загрязнения. ПДК определён в соответствии с «СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».

По результатам анализа выявлено превышение показателя биологического потребления кислорода. При этом, не наблюдается превышение показателей по другим параметрам. Загрязнение донных отложений оценивалось по методике идентификации загрязнения в почвах. Уровень загрязнения донных отложений допустимый.

3.4. Результаты анализа проб подземных вод

К сожалению, ситуация с загрязнением подземных вод гораздо тяжелее, нежели поверхностных. Отбор производился в трёх точках за границей полигона, у западной его окраины (скв. 1), южной (скв. 2) и юго-восточной (скв. 3), на глубинах 3,2; 3,3 и 3,4 метра соответственно.

По нормативам, установленным СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» зафиксировано загрязнение по многим пунктам. Кратность превышения результатов исследования проб грунтовой воды над ПДК представлена в Таблице 2 ниже.

Показатель	Сухой остаток, мг/дм ³	Растворенный кислород, мг/дм ³	ХПК, мгО ₂ /дм ³	БПК ₅ , мгО ₂ /дм ³	Аммиак и аммоний-ион, мг/дм ³	Нитрат-ион, мг/дм ³	Нитрит-ион, мг/дм ³	Сульфат-ион, мг/дм ³	Хлорид-ион, мг/дм ³	АПАВ, мг/дм ³	Нефтепродукты, мг/дм ³
ПДК	1000	4	30	4,0	1,5	4,5	3,0	500	350	0,5	0,3
Скв. 1	-	-	2,1	1,2	2,4	-	-	-	-	-	-
Скв. 2	1,7	-	-	1,2	5,1	-	-	-	3,7	-	-
Скв. 3	-	-	1,1	1,1	3,8	-	-	-	2,7	-	-

Показатель	Фенолы, мг/дм ³	Бенз(а)пирен, мг/дм ³	Цианиды, мг/дм ³	Магний, мг/дм ³	Литий, мг/дм ³	Барий, мг/дм ³	Железо, мг/дм ³	Марганец, мг/дм ³	Мышьяк, мг/дм ³	Кадмий, мг/дм ³	Медь, мг/дм ³
ПДК	0,001	0,00001	0,07	50	0,03	0,7	0,3	0,1	0,01	0,001	1,0
Скв. 1				2,0	1,8	-	34,3	99	-	4,6	-
Скв. 2				1,9	1,7	-	37,3	89	-	3,7	-
Скв. 3				1,8	2,0	-	47,7	111	-	6,4	-

Показатель	Ртуть, мг/дм ³	Никель, мг/дм ³	Свинец, мг/дм ³	Цинк, мг/дм ³	Хром, мг/дм ³	Кремний, мг/дм ³	Алюминий, мг/дм ³
ПДК	0,0005	0,02	0,01	5,0	0,05	20	0,2
Скв. 1	-	5,6	4,6	-	-	1,8	23,2
Скв. 2	-	5,5	3,7	-	-	1,5	22,8
Скв. 3	-	4,95	4,5	-	-	1,4	19,95

Табл. 3 Кратность превышения результатов исследования проб грунтовой воды над ПДК

Исследованные экологами грунтовые воды представляют собой опасный раствор. Характер загрязнения может указывать на нарушение целостности экранного горизонта и попадание фильтрата в естественную геологическую среду. В процессе геофизического исследования, проведённого при моём участии, удастся обнаружить несколько зон возможного просачивания влаги из тела полигона.

3.5. Результаты анализа проб грунта

С целью идентификации возможной утечки фильтрата и оценки экологической ситуации было взято несколько проб почв как за границами полигона ТБО, так и под телом свалки. Отбор производился в 12 точках, 4 места отбора под телом полигона, 4 вблизи его границы, 4 удалённые от границ полигона.

По результатам анализа экологами было обнаружено сильное, опасное загрязнение почв на глубине до метра на всех точках за пределами полигона. Главным загрязняющим элементом территории выступает кадмий, однако другие распространённые химические элементы, медь и цинк, наблюдаются в фильтрате и грунтовых водах в допустимых количествах. При этом загрязнение наблюдается и на удалённых от полигона участках. При этом грунты под самим полигоном имеют гораздо меньшее загрязнение и в большей части проб находится на допустимом уровне.

3.6. Результаты газогеохимических исследований

Вместе с отходами и фильтратом, неотъемлемой частью любых свалок является высокая концентрация загрязняющих газов. В результате анаэробного разложения захороненных на полигоне органических отходов возникает биогаз, представляющий собой смесь разнообразных веществ, среди которых превалирует метан, легко воспламеняемый, крайне опасный газ. Данные обстоятельства делают свалку крайне пожароопасным объектом. Возгорание полигона ТБО оказывает значительное негативное воздействие на экологию целого региона. В воздухе, в таких случаях образуется множество ядовитых веществ. Так, при горении полигона ТБО на Волхонском шоссе в Ленинградской области при низкотемпературном горении захороненного там пластика был образован ряд крайне токсичных соединений, в частности диоксид азота и диоксины [Алешина Т.А. 2014]. Биогаз оказывает воздействие и на глобальный парниковый эффект. Полигоны ТБО являются одним из крупнейших источников метана в атмосфере, чьё влияние на парниковый эффект в разы сильнее, нежели у углекислого газа.

Зоны наибольшей концентрации биогаза могут быть обнаружены с помощью геофизических методов. Газ аккумулируется в наименее плотных областях грунта: у поверхности, в локальных пустотах. Некоторые аномалии, которые могут соответствовать этим областям, были выявлены в рамках исследования полигона методом ЭТ, о чём подробнее будет сказано далее, в соответствующем разделе.

Экологи корпорации также проводили газогеохимическое исследование, оценивалось содержание основных компонентов биогаза в воздухе, на глубине 0,8 метра. В результате было установлено, что лишь на 5 точках концентрации опасных веществ являются безопасными. При этом 5 точек характеризуются крайне высоким содержанием метана, превышающим 5% от объёма пробы (при атмосферном содержании $1,7 \cdot 10^{-4}$ – $2,0 \cdot 10^{-4}$). Такие грунты были охарактеризованы как пожаровзрывоопасные.

Загрязнение атмосферного воздуха на полигоне находится в допустимых пределах.

4. Методы геофизических исследований

Исходя из целей работ выбор метода изысканий был сделан в пользу методов ЭТ и ЕП. Первый позволяет изучить структуру полигона, уточнить геологическое строение, определить глубину залегания водоупорного горизонта, идентифицировать развитие в нём опасных геологических процессов, определить увлажнённые горизонты, обнаружить локальные пустоты, являющиеся скоплениями биогаза. Ввиду необходимости изучения

достаточно больших пространств, предпочтение было отдано методу ЭТ, а не методу ВЭЗ. Методы ARP, MASW не обладают достаточной глубиной исследования. Использование георадара затруднительно ввиду обильного зарастания склонов свалки, зоны старых отходов. Помимо этого, использование метода затруднительно в условиях среды с высокой электропроводностью.

ЕП использовался для определения зон аккумуляции фильтрата, окон его просачивания в естественную среду. Данный метод предоставляет наиболее полную информацию о поведении жидкости внутри свалки. Помимо этого, он лёгок в использовании, не требует большого количества оборудования, достаточно прост в обработке результатов измерений.

Данные геофизических изысканий дополнительно сопоставлялись с результатами прямых методов. Проводилось бурение скважин с целью уточнения геологического строения, что упростило интерпретацию геоэлектрических профилей.

4.1. Электротомография

Электротомография методом сопротивлений основана на зависимости электрического поля от распределения удельного электрического сопротивления в прилегающей части грунта. Электрическое поле возникает при стекании электрического тока с питающих электродов (А, В). Напряжённость \vec{E} полученного поля фиксируется приёмными электродами (М, N). Измеряется разность потенциалов ΔU между приёмными электродами.

Далее происходит расчёт кажущегося удельного сопротивления ρ_k . Это параметр, созданный для облегчения анализа и интерпретации наблюдаемого электрического поля. Для его расчёта используют формулу (1)

$$\rho_k = K \frac{\Delta U_{MN}}{I_{AB}}. \quad (1)$$

ΔU_{MN} – измеренное значение разности потенциалов между приёмными электродами, I_{AB} сила тока в питающей линии, K – геометрический коэффициент установки, рассчитываемый по формуле (2)

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}}. \quad (2)$$

Распределение ρ_k в общем случае зависит от УЭС пород. Более того, в горизонтально-слоистой среде ρ_k примерно совпадает с осреднённым по некоторому объёму пород значению УЭС [Шевнин В.А. 2013].

Полученные данные проходят этап первичной обработки, в общем случае состоящий из 5 шагов:

1. Смещение данных по оси X. Выполняется с целью уточнения положения пикетов. Необходима при выполнении работ методом нагоняющей установки (roll-along)
2. Компиляция данных по различным расстановкам
3. Ввод высотных отметок
4. Отбраковка измерений
5. Построение псевдоразрезов кажущегося сопротивления с учётом высотных отметок.

Далее выполняется расчёт обратной задачи – инверсия. Расчёт производится в специализированных программах (в данном исследовании – осуществляющих 2D инверсию): Res2DInv, SensInv2D, DC2DInvRes, ZondRes2d (использующийся в данном исследовании), Earth Imager 2D. Результатом инверсии и интерпретации является построение результирующих геоэлектрических разрезов. [Шевнин В.А. 2013].

ЭТ осуществляется с помощью различных конфигураций питающих (А, В) и приёмных (М, N) электродов. Различают двухэлектродные (AM), трёхэлектродные (AMN, MAN), и четырёхэлектродные (AMNB, ABMN и др.) установки. Они различаются не только взаиморасположением питающих и приёмных электродов, но и расстояние между ними. При исследовании методом электротомографии, наиболее часто используются установки: осевая дипольная установка [Pomposiello C. 2012, Genelle F. 2014, Bavusi M 2006, Pierwoła J. 2013], Веннера [Zume J.T. 2006] и Шлюмберже [Zume J.T. 2006, Bavusi M 2006, Mendecki M.J. 2020, Kondracka M. 2021].

Осевая дипольная конфигурация, именуемая в иностранной литературе как “диполь-диполь” – четырёхэлектродная установка, питающие (А, В) и приёмные (М, N) электроды распределяются в два диполя. Характеризуется наибольшим разрешением среди приведённых установок. Однако, вследствие влияния объектов, расположенных на малых глубинах, установка характеризуется высокой чувствительностью. Чувствительность характеризует влияние изменения удельного сопротивления в точке на сигнал в приёмных диполях. Высокая чувствительность приводит к неустойчивости инверсии для этой конфигурации. Для устранения шумов требуется комбинирование с установкой Шлюмберже. Также, метод обладает минимальной глубиной исследования [Шевнин В.А. 2013].

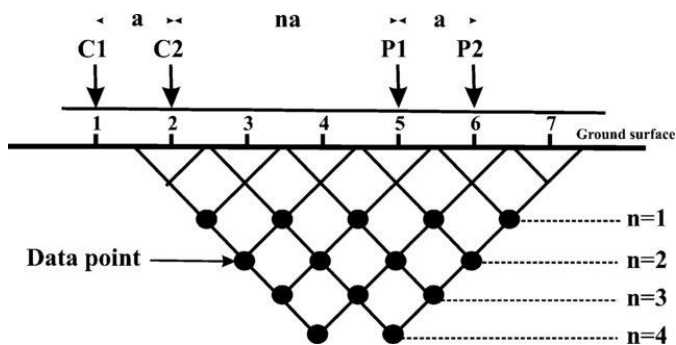


Рис. 5 Осевая дипольная установка (C1 и C2 — питающие электроды; P1 и P2 — приёмные; расстояние между электродами — a ; n — коэффициент расширения (целочисленные значения 1–6). числа 1–7 - положение электродов) [Adepelumi A.A. 2006].

Установка Веннера в исследовательских работах встречается значительно реже других представленных. Тем не менее, обеспечивает максимальный уровень сигнала при наименьшей потере глубинности среди представленных методов. Характеризуется низкой чувствительностью к помехам как в приповерхностной части разреза, так и на больших глубинах. [Шевнин В.А. 2013].

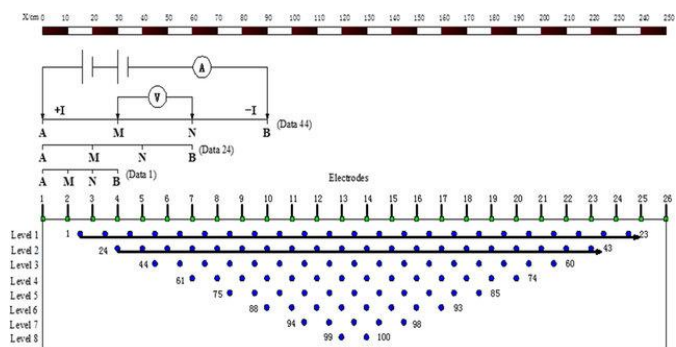


Рис. 6 Установка Веннера (A и B – питающие электроды; M и N – приёмные; числа 1-25 – положения электродов) [Zhan L.T. 2014].

Классическая установка электроразведки. Обладает средними параметрами глубинности и разрешения. Для использования с многоканальными станциями в установке Шлюмберже приемные и питающие электроды меняются местами (обращенная установка), что позволяет провести одновременные измерения на нескольких разносах при одном положении питающего диполя. Так как на первом разносе $MN=AB/3$, то сейчас в западной и отечественной литературе эту установку называют установкой Веннера–Шлюмберже. [Шевнин В.А. 2013].

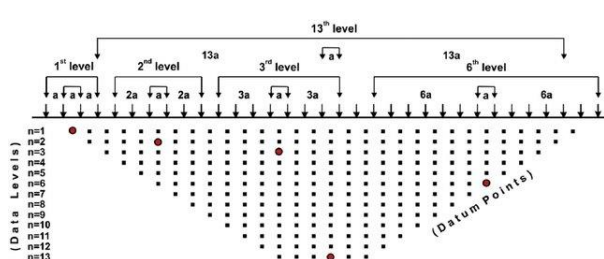


Рис. 7 Установка Шлюмберже (внешние электроды – питающие; внутренние – приёмные; a – расстояние между приёмными электродами; n – уровень – отношения расстояния AM или NB к a) [Zhan L.T. 2014].

Наиболее оптимальной принято считать комбинированную трёхэлектродную установку Шлюмберже. Главная особенность данной конфигурации с остальными – вынос 4-го питающего электрода в «бесконечность». В случае прямой установки (AMN) выносится электрод B,

встречной (MNB) – А. Измерения на данных установках часто совмещаются, повышая примерно в 3 раза число измерений, но и значительно увеличивая информативность. Благодаря этой особенности трёхэлектродная конфигурация способна обеспечить наибольшую глубинность исследования при довольно высоком разрешении. [Шевнин В.А. 2013].

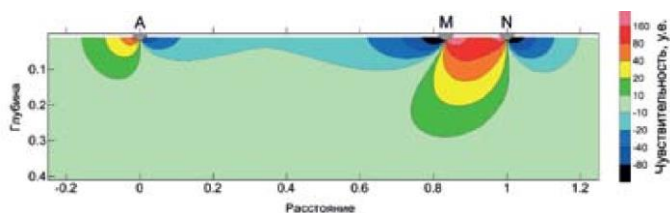


Рис. 8 Разрез чувствительности для установки прямой трёхэлектродной установки Шлюмберже. [Шевнин В.А. 2013]

Поскольку в рамках проекта необходимо было оценить целостность водоупора, располагающегося на глубине до 25 метров выбор был сделан в пользу метода с большей глубинностью нежели у осевой дипольной установки, большим разрешением нежели у установки Веннера. Наиболее предпочтительной оказалась классическая конфигурация Шлюмберже.

4.2. Метод естественного электрического поля

Метод ЕП основан на изучении постоянного электрического поля, возникающего вследствие спонтанной поляризации пород. Существует три механизма возникновения такого поля: посредством окислительно-восстановительных, диффузионно-адсорбционных и фильтрационных процессов.

Электрическое поле, возникающее в результате окислительно-восстановительных процессов, образуется в условиях контакта проводника с средами с электронной и с ионной проводимостями, а также в различных окислительно-восстановительных условиях на разных местах контакта.

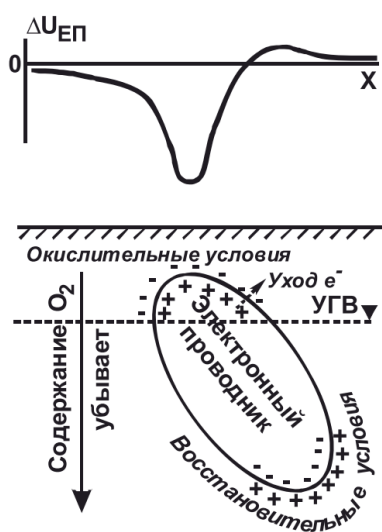


Рис. 9 Механизм образования естественного электрического поля в результате окислительно-восстановительных реакций. [Шевнин В.А. 2013].

На рисунке 9 представлена схема возникновения естественного электрического поля в условиях воздействия на проводник окислительной и

восстановительной обстановки. Область грунта находящаяся выше уровня грунтовых вод обладающая электронной проводимостью, насыщенная кислородом представляет собой область окислительных условий. Область с ионной проводимостью, находящаяся глубже, характеризующаяся меньшим количеством кислорода – область восстановительных условий.

В случае нахождения проводника в условиях воздействия обеих сред (окислительной у поверхности, восстановительной на глубине) происходит поляризация проводника, перемещение электронов с зоны контакта с восстановительными условиями в проводнике, в область окисления. В результате возникает электрическое поле. [Шевнин В.А. 2013].

Подобный механизм возникновения естественного электрического поля мало распространён на участке изысканий. Поскольку на участке захоронены неметаллические отходы, проводящие объекты не имеют широкого распространения в теле полигона.

Диффузионно-адсорбционный механизм образования электрического поля заключается в различной подвижности катионов и анионов в водонасыщенной пористой среде. Возникает на контакте раствора электролита с пористой средой. При возникновении неоднородной минерализации раствора запускается диффузионный процесс выравнивания концентраций. В ходе этого процесса происходит перераспределение ионов. Катионы за счёт большей подвижности быстрее покидают высокоминерализованную область, проходя через пористую среду формируют избыток положительно заряженных ионов на дальних окончаниях пор. Менее подвижные анионы формируют область отрицательно заряженных ионов в ближней части пор.

Кроме диффузии в среде происходит адсорбция анионов, которые притягиваются к двойному электрическому слою. Для возникновения ДА-поля в середине поры должно быть некоторое пространство, не занятое связанной водой. [Шевнин В.А. 2013]

Фильтрационный механизм – образование электрического поля происходит в результате движения водного потока через пористую среду. Стенки капилляров имеют отрицательный заряд, из-за чего вблизи неё образуется слой связанной воды, характеризующийся избытком катионов. В результате воздействия потока, рыхлосвязанная вода сдвигается вдоль капилляра вместе с остальным потоком, формируя избыток катионов на окончании капилляра. [Шевнин В.А. 2013]

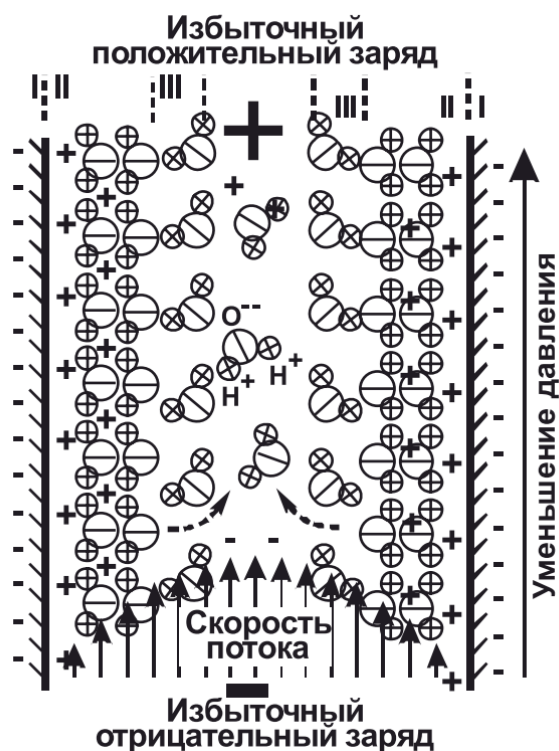


Рис. 10 Механизм образования естественного электрического поля в результате фильтрации. [Шевнин В.А. 2013].

Измерение поля на участке выполнялось методом потенциала. Исследование производится с использованием пары неполяризуемых электродов: первый - неподвижный электрод сравнения, второй – подвижный, перемещающийся вдоль линии профилей электрод. При такой методике потенциал пикета равен разности потенциалов между подвижным и неподвижным электродами.

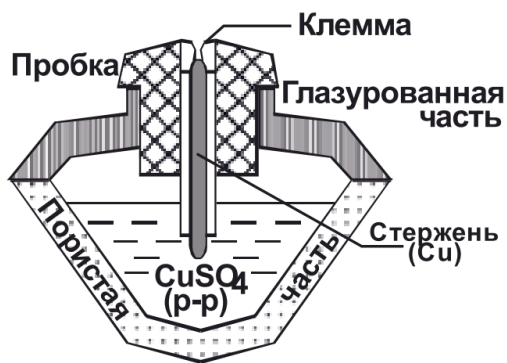


Рис. 11 Неполяризующийся электрод [Шевнин В.А. 2013].

Неполяризующийся электрод представляет собой проницаемую ёмкость с медным электродом внутри, заполненную раствором медного купороса. Использование неполяризуемых электродов позволит исключить ошибку измерения, происходящую вследствие собственной поляризации электрода.

Измерение производится при перемещении подвижного электрода вдоль профиля и фиксации разности потенциалов в каждой точке. [Шевнин В.А. 2013].

Формула для вычисления разницы потенциалов в точке i (4)

$$U_i = U_i^{\text{изм}} - U_3^{\text{сред}} + \frac{U_1^{\text{н}} - U_1^{\text{к}}}{n}, \quad (4)$$

где U_i – исправленный потенциал в i -ой точке профиля, $U_i^{\text{изм}}$ – измеренный потенциал в той же точке, $U_3^{\text{сред}}$ – среднее значение электродной разности потенциалов (по замерам в начале и конце съёмки), $\frac{U_1^{\text{н}} - U_1^{\text{к}}}{n}$ – поправка на изменение поля во времени где числитель – изменение поля на первой точке профиля за время съёмки, знаменатель – число точек наблюдения. [Светов Б.С. 2008]

Итоговое распределение потенциалов может быть представлена в виде карты естественного поля.

5. Сбор и обработка данных

5.1. Электротомография

Исследование методом ЭТ проводилось с использованием многоэлектродной станции «Скала-48к12». Технические характеристики устройства приведены в табл.2. Помимо станции в состав оборудования входили: две 24-канальные электроразведочные косы; титановые электроды; соединители коса-электрод.

Общие параметры	
Электроды	2 x 24
Степень защиты	IP67 (транспортировка), IP54 (эксплуатация)
Рабочая температура	-20 ÷ +50 °С
Габариты	464 x 366 x 176 мм
Масса	12 кг
Внутренняя память	До 2Гб
Встроенная батарея	12 В, 7 А*ч
Внешнее питание	12 В
Связь с ПК	USB 2.0
Измеритель	
Число измерительных каналов	1
Входное сопротивление	10 Мом
Ширина полосы пропускания	20Гц
Диапазон измеряемых напряжений	±0,1 мВ до ±250 В
Разрядность АЦП	24 бит
Подавление помех промышленных частот	Не более 90 дБ
Защита от перенапряжения	1 кВ
Внутренний генератор	
Рабочие частоты	3,33 0,86 0,78 0,74 0,69 0,66 0,60 Гц
Мощность максимальная	200 Вт
Выходной ток	1 ÷ 2000мА
Напряжение максимальное	500 В
Защита от КЗ	Есть

Режим работы	
Метод сопротивлений	Есть
Метод вызванной поляризации (ВП)	Есть
Подключение внешнего коммутатора	Нет
Подключение внешнего генератора	Нет

Табл. 4 – Технические характеристики станции «Скала-48к12».

При выполнении работ к электроразведочной аппаратуре подключалось две герметичные 24-х электродные косы. Шаг по профилю составлял 2-3 метра, что определялось присутствием почвенного покрова для заземления и возможностью проведения в целом. Длина профиля колеблется от 130 до 210 метров. Исследование проводилось с использованием метода нагоняющей расстановки (roll-along) Всего было выполнено 6 профилей электротомографии. Глубина исследования составила 30 м. Схема расположения профилей приведена на рисунке 12

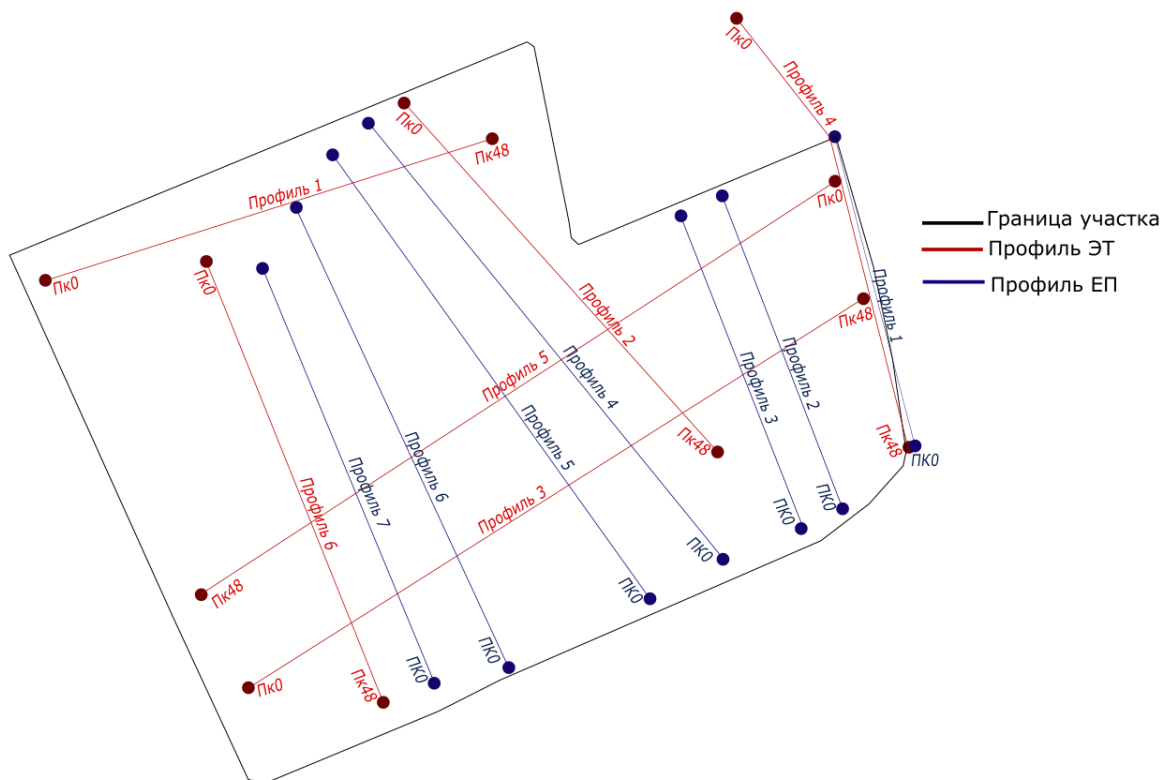


Рис. 12 Схема расположения профилей ЭТ и ЕП

Обработка данных ЭТ производилась в рамках двумерной модели. В рамках первичной обработки происходила очистка данных от заведомо ложных значений. Были отбракованы искажения приповерхностных неоднородностей, проявляющиеся в виде Р- и С-эффектов. Первые возникают при положении неоднородностей вблизи измерительного электрода, проявляющиеся в виде вертикальных сдвигов всей кривой или ее сегментов по оси сопротивления. Вторые - при положении неоднородностей вблизи

питающего электрода, и проявляющиеся в виде локальных искажений на 1-2 разносах по оси сопротивления. [Иванов 2019]

Дальнейшая обработка осуществлялась в программе ZondRes2D. Первым этапом обработки в программе был анализ качества измерений, произведённый с использованием модуля «контроль качества». Заключительной частью обработки являлось решение обратной геофизической задачи – инверсии. Расчёт производился через модуль «инверсия». Для получения геоэлектрических разрезов использовалась модификация Оссам, предназначенный для получения гладкого распределения удельного сопротивления. Инверсия производится методом наименьших квадратов с использованием сглаживающего оператора и дополнительной минимизацией контрастности. В формуле (5) представлено матричное уравнение данного варианта инверсии:

$$(A^T W^T W A + \mu C^T C) \Delta m = A^T W^T \Delta f - \mu C^T C m \quad (5) \quad [\text{Руководство ZondRes2D}]$$

где A – матрица частных производных измеренных значений по параметрам разреза (Якобиан), W – матрица относительных погрешностей измерений, C – сглаживающий оператор, μ – регуляризирующий параметр, m – вектор параметров разреза, Δf – вектор невязок между наблюдаемыми и рассчитанными значениями, X^T – матрица транспонирована.

По результатам обработки было составлено 6 геоэлектрических разрезов, отражающих распределение УЭС по профилю.

5.2. Метод естественного электрического поля

Исследование методом ЕП проводилось с использованием измерителя – мультиметра, катушки, двух неполяризуемых электродов, заполненных раствором медного купороса (CuSO_4) по ранее описанной методике. Электроды предварительно были очищены с помощью наждачной бумаги.

Измерение производилось с шагом в 5 метров по 7 профилям с расстоянием в 25 метров между ними. Для понижения переходного сопротивления лунки были обильно смочены водой. Фиксация местоположения пикета происходила при помощи GPS. Дополнительно были произведены контрольные измерения каждые 50 метров на обратном пути.

Полученные данные были обработаны в программе MS Excel с целью получения значения исправленного потенциала в каждой точке по формуле (4). Визуализация распределения разности потенциалов осуществлялась в приложении Surfer. По итоговым данным составлена карта.

6. Результаты

6.1. Электротомография

Итоговая картина распределения УЭС представляла собой двухслойную модель. Верхний слой – низкоомный (<30 Ом·м), нижний – высокоомный (30-150 Ом·м). Зона низких значений УЭС, в соответствии с данными бурения, соответствует насыпным грунтам. В пределах данной зоны повсеместно распространены участки с показателем УЭС менее 150 Ом·м. Подобные показатели могут быть достигнуты за счёт сильной увлажнённости грунта, или за счёт высокой минерализации фильтрата. В зоне высоких значений УЭС распространены низкоомные аномалии, отмеченные на рисунках геоэлектрических профилей специальным условным знаком.

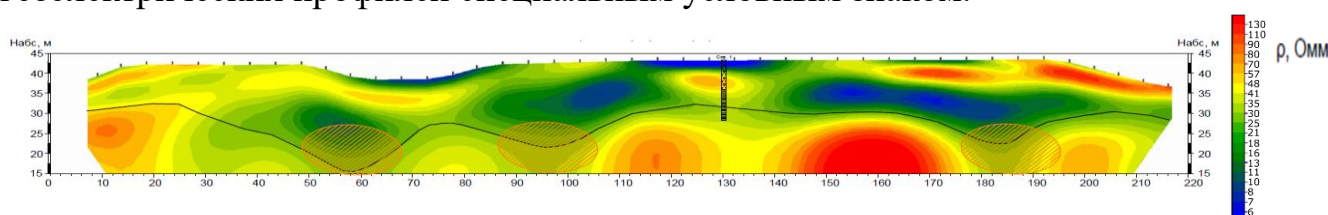


Рис. 13 Геоэлектрический профиль 5

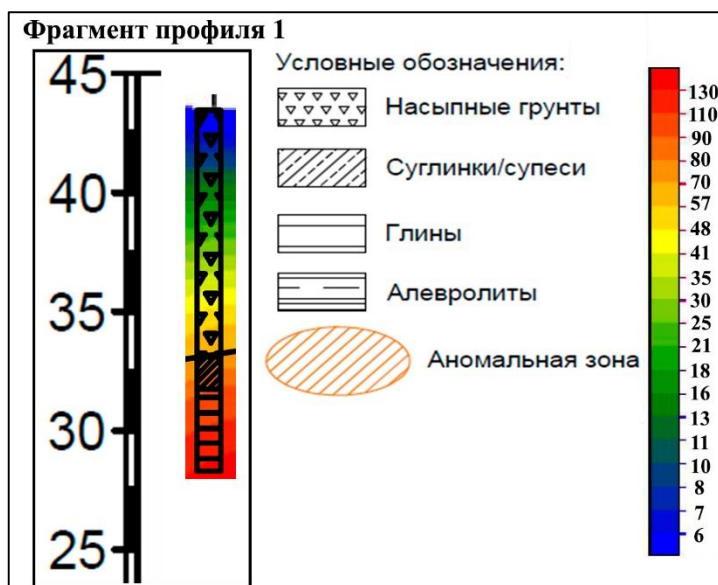


Рис. 14 Фрагмент геоэлектрического профиля 3, демонстрирующий область бурения, геологическое строение профиля; условные обозначения к геоэлектрическим профилям.

Картина УЭС отличается на разных участках полигона. Распределение электрических характеристик в нижней части восточного склона однородно, что по всей видимости свидетельствует о прохождении профиля за пределами досягаемости фильтрата. В пределах профиля (геоэлектрический профиль 4) отсутствуют области менее 15 Ом·м. Распределение на данном участке УЭС может отражать о наиболее характерные для насыпных грунтов полигона электрические свойства.

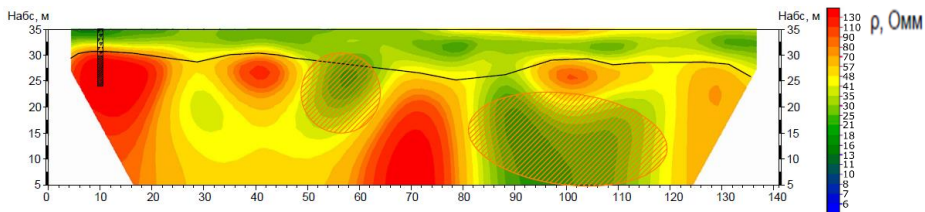


Рис. 15 Геоэлектрический профиль 4

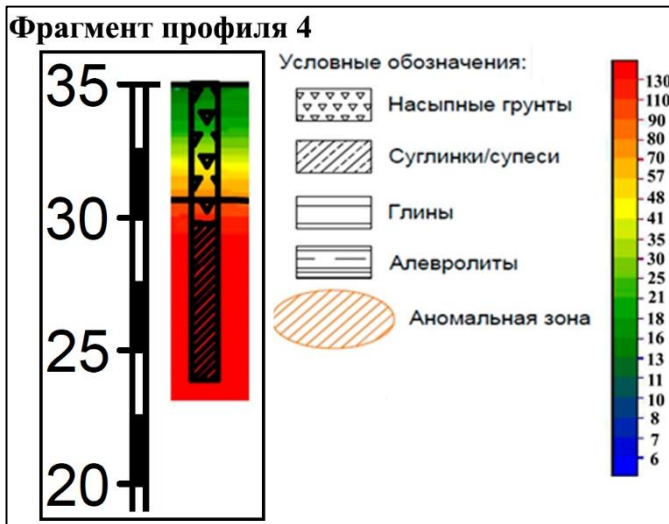


Рис. 16 Фрагмент геоэлектрического профиля 4, демонстрирующий область бурения, геологическое строение профиля; условные обозначения к геоэлектрическим профилям.

Наиболее низкие значения в верхнем слое зафиксированы на северо-западной окраине полигона (начало геоэлектрических профилей 1 и 6), в зоне складирования новых отходов (окончание геоэлектрического профиля 1, начало геоэлектрического профиля 2), на юго-западной окраине, (начало геоэлектрического профиля 3, окончание геоэлектрического профиля 6). Из этого можно сделать вывод, что фильтрат аккумулируется преимущественно у западной границы полигона. В центральной части полигона повышенной электропроводностью, характеризуется зона складирования новых отходов.

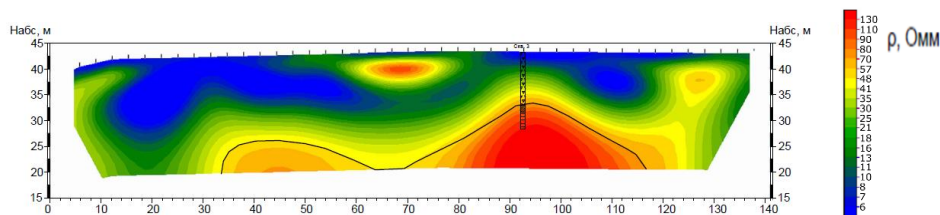


Рис. 17 Геоэлектрический профиль 1

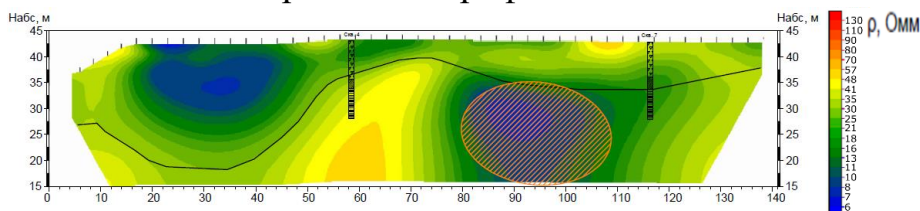


Рис. 18 Геоэлектрический профиль 2

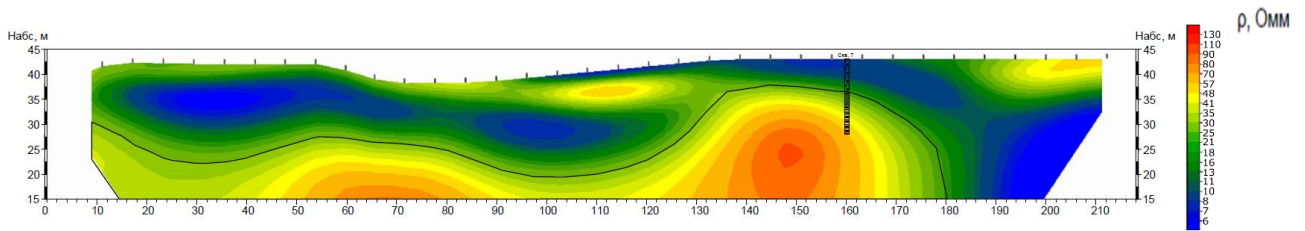


Рис. 19 Геоэлектрический профиль 3

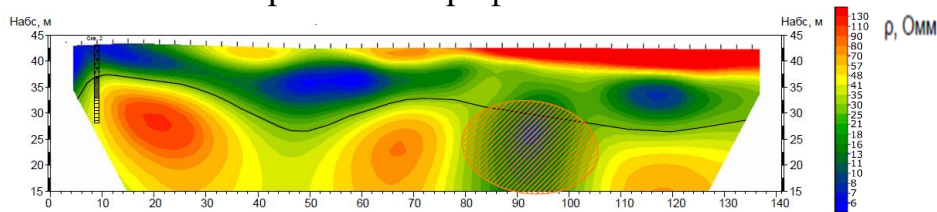


Рис. 20 Геоэлектрический профиль 6

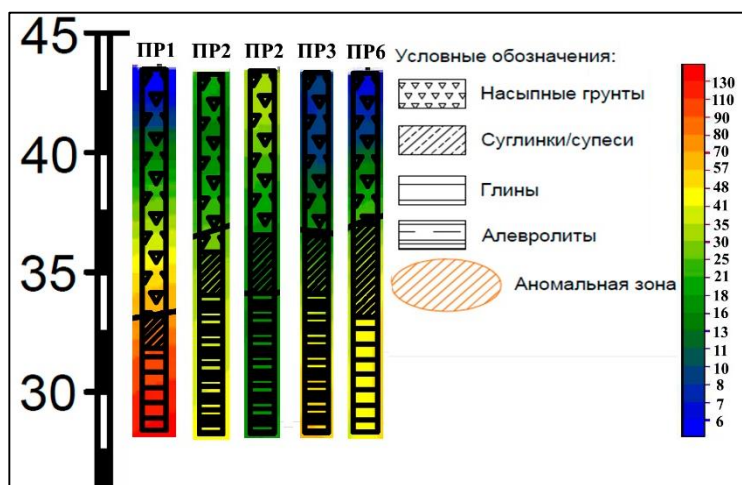


Рис. 14 Фрагменты геоэлектрических профилей 1, 2, 3, 6, демонстрирующие область бурения, геологическое строение профиля; условные обозначения к геоэлектрическим профилям.

Высокоомные аномалии (до 150 Ом·м) в верхнем слое распространены sporadически на всех участках полигона. Они, вероятно свидетельствуют о разуплотнении грунтов и, как следствие, о высоких содержаниях свалочных газов.

Нижний слой характеризуется повышенным значением УЭС, соответствует глинам и алевролитам, слагающим водоупорный горизонт. Глубина экрана колеблется от 7 до 12 (до 25 в аномальных зонах) метров. Ближе к поверхности водоупорный горизонт залегает на окраинах полигона.

В пределах нижнего слоя фиксируется множество низкоомных аномалий (рисунки 13, 15, 18, 20). Подобные зоны высокой проводимости могут являться маркерами нарушения целостности экрана и просачивания фильтрата в естественную геологическую среду. Локальные разрушения водоупора могут быть вызваны развитием суффозионных процессов.

6.2. Метод естественного электрического поля

Итоговая карта изолиний распределения естественного поля демонстрирует 7 профилей ЕП, пикеты на которых соответствуют каждой

второй точке наблюдения. Диапазон изменения потенциала лежит в пределах от -220 до 110 мВ.

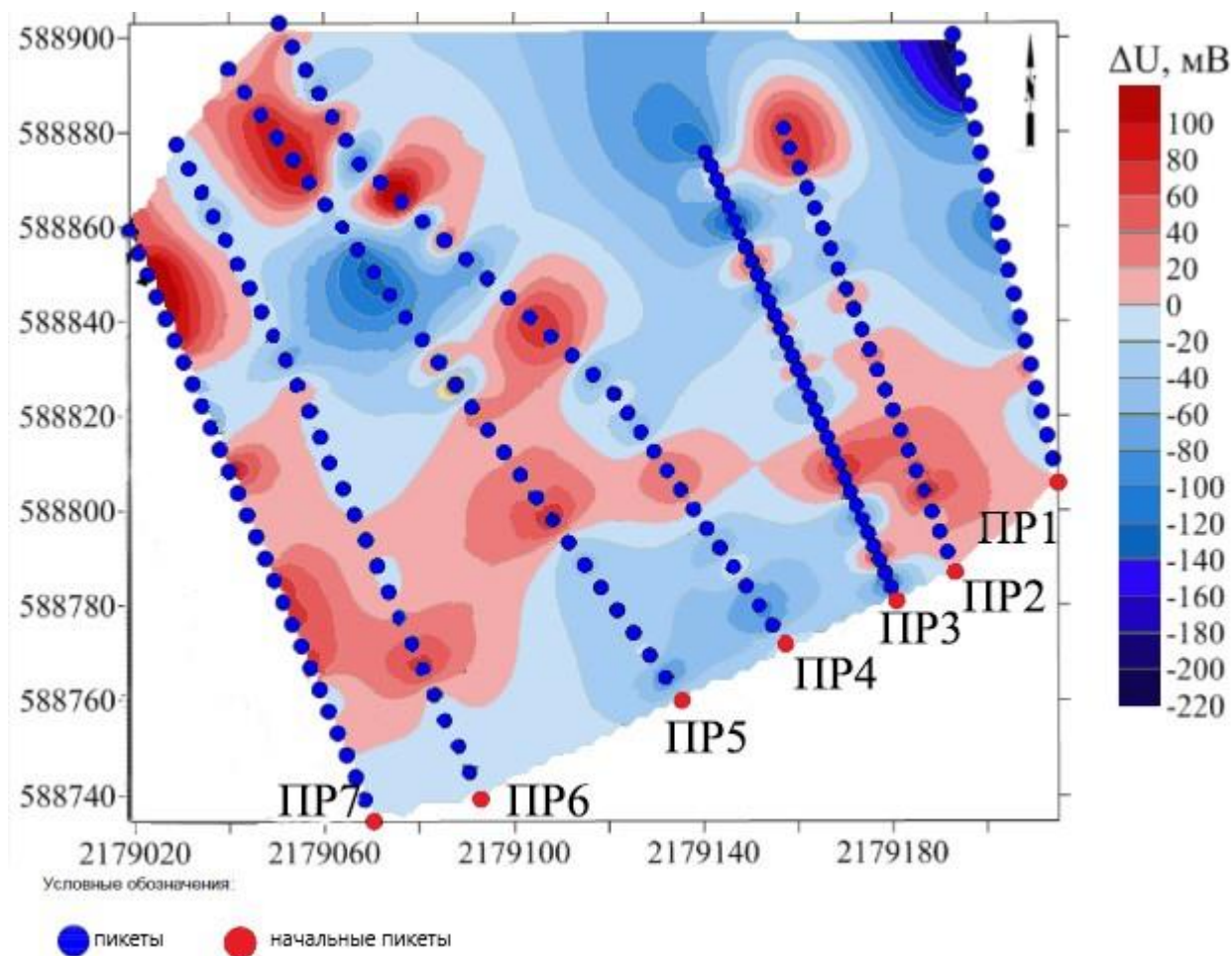


Рис. 21 Схема распределения потенциалов ЕП.

Отмечается, что в поле, образованном в результате окислительно-восстановительных процессов значения потенциала увеличиваются по направлению стока. Минимальные показатели отмечаются в области питания, максимальные – в области разгрузки. [Шевнин В.А. 2013; Bavusi M. 2006; Ramalho E.C. 2012 и др.].

Наибольшие показатели разности потенциалов отмечаются на западной окраине, что подтверждает данные ЭТ, отмечающие в этом районе низкоомные аномалии, свидетельствующие об аккумуляции фильтрата. Отдельные положительные аномалии прослеживаются в северо-восточной и юго-восточной частях участка. Все эти зоны могут являться гидрогеологическими окнами, потенциально представляют угрозу просачивания высокоминерализованного фильтрата в естественную среду.

7. Обсуждение

По результатам анализа проб установлено сильное загрязнение грунтовых вод, располагающихся под телом свалки. Идентифицировано органическое загрязнение близлежащего водоёма. Обнаружены превышения концентрации опасных веществ в грунтах как непосредственно у полигона, так и на удалении от него. Установлено наличие пожароопасных газовых смесей в теле свалки.

Места просачивания загрязняющего фильтрата в естественную среду и зоны аккумуляции свалочного газа были идентифицированы геофизическими методами.

По результатам ЭТ, при сопоставлении с данными бурения определено двухслойное слоение разреза. Обнаружены локальные разуплотнения. Установлены нарушения целостности нижнего из них, водоупорного горизонта. Таковые зафиксированы на основании развития низкоомных аномалий на профилях №2 (70-120м), №4 (45-65; 80-120), №5 (50-70; 85-110; 175-190), №6 (75-105).

По результатам ЕП удалось идентифицировать зону разгрузки и направление стока. В восточной части полигона многочисленные положительные аномалии ЕП, а также низкоомные аномалии ЭТ в пределах верхнего слоя, демонстрируют скопление фильтрата в данной зоне. В её пределах возможно наличие гидрогеологических окон, через которые осуществляется разгрузка вод.

Заключение

Геофизические методы продемонстрировали высокую эффективность в рамках изучения полигонов ТБО на предмет их воздействия на окружающую среду. По результатам комплексного исследования составлено представление об особенностях геологического строения тела полигона, об особенностях распределения внутри него жидкости. Полученная информация позволила идентифицировать ряд потенциальных угроз, что позволяет принять меры по нормализации экологической обстановки в рамках рекультивационных работ.

Благодарности

Выражаю благодарность инженеру геофизику компании ООО «Технотерра» Мингалёвой Татьяне Андреевне за осуществление руководства над ходом полевых работ, за помощь в их проведении, за рецензирование работы. Благодарю отдел экологии компании ООО «Технотерра» за предоставленные сведения об экологической обстановке на полигоне работ.

Благодарю преподавателей кафедры геоморфологии за поддержку по ходу написания работы.

Список литературы

Литературные источники:

1. Adepelumi A.A. Integration of surface geophysical methods for fracture detection in crystalline bedrocks of southwestern Nigeria / A.A. Adepelumi, M.J. Yi, J.H. Kim, B.D. Ako, J.S. Son // *Hydrogeology Journal* 2006 14(7): p.1284-1306
2. Bavusi M. Electromagnetic methods to characterize the Savoia di Lucania waste dump (Southern Italy) / M. Bavusi, E. Rizzo, V. Lapenna // *Environmental Geology* (2006) 51: p 301–308
3. Dabas M. Theory and practice of the new fast electrical imaging system ARP / Michel Dabas // XV International Summer School in Archaeology GEOPHYSICS FOR LANDSCAPE ARCHAEOLOGY Grosseto, 10-18 July 2006
4. Ekinci Y.L. Shallow and deep-seated regolith slides on deforested slopes in Çanakkale, NW Turkey / Yunus Levent Ekinci, Murat Türkeş, Alper Demirci, Ahmet Evren Erginal // *Geomorphology* 2013 201:70-79
5. El-Kelani R. Refraction seismic study over a proposed landfill site in south west bank, Palestine / Radwan El-Kelani, Abdelhaleem Khader // Springer Nature Switzerland AG 2019 p.99-101
6. Frid V. Geophysical-geochemical investigation of fire-prone landfills / Vladimir Frid, Dmitri Doudkinski, Gady Liskevich, Efim Shafran, Arie Averbakh, Nikolay Korostishevsky, Larisa Prihodko // *Environmental Earth Sciences* (2010) 60. p.787–798
7. Genelle F. Detection of landfill cover damage using geophysical methods / Fanny Genelle, Colette Sirieix, Joëlle Riss, Véronique Naudet, Michel Dabas, Philippe Bégassat // *Near Surface Geophysics*, 2014, 12, p.599-611
8. Karapidakis E.S. Energy efficiency and environmental impact of biogas utilization in landfills / E.S. Karapidakis, A.A. Tsave, P.M. Soupios, Y.A. Katsigiannis // *International Journal of Environmental Science and Technology* 7 (3) 2010, p.599-608.
9. Kondracka M. Evaluation of geophysical methods for characterizing industrial and municipal waste dumps / Marta Kondracka, Iwona Stan-Kłeczek, Sławomir Sitek, Dariusz Ignatiuk // *Waste Management* 125 2021 p.27–39
10. Meju M.A. Geoelectrical investigation of old abandoned, covered landfill sites in urban areas: model development with a genetic diagnosis approach / Maxwell A. Meju // *Journal of Applied Geophysics* 44 2000. P.115–150
11. Mendecki M.J. Geophysical and petrological studies of the former lead smelting waste dump in Sławków, Poland / Maciej J. Mendecki, Rafał

- Warchulski, Monika Szczuka, Dorota Środek, Jolanta Pierwoła // *Journal of Applied Geophysics* Volume 179, 2020, 104080
12. Osra F. Landfill site selection in Makkah using geographic information system and analytical hierarchy process / Faisal A Osra, George W Kajjumba // *Waste Management & Research* 2019 p.1-9
 13. Pierwoła J. Investigation of soil contamination using resistivity and induced polarization methods / Jolanta Pierwoła // *Polish Journal of Environmental Studies* 2013 22(6) p.1781-1788
 14. Pomposiello C. Application of Geophysical Methods to Waste Disposal Studies / Cristina Pomposiello, Cristina Dapeña, Alicia Favetto and Pamela Boujon // *Municipal and Industrial Waste Disposal* 2012 p.3-26
 15. Porsani J.L. The use of GPR and VES in delineating a contamination plume in a landfill site: a case study in SE Brazil / Jorge L. Porsani, Walter M. Filho, Vagner R. Elis, Fisseha Shimeles, João C. Dourado, Helyelson P. Moura // *Journal of Applied Geophysics* 55 (2004) 199– 209
 16. Ramalho E.C. Assessment of the leachate movement in a sealed landfill using geophysical methods / Elsa C. Ramalho, Amélia Carvalho Dill // *Environmental Earth Sciences* 2012
 17. Smith D. Application of electrical resistivity measurements to an evaluation of a potential landfill site in a karstic terrain / D. Smith, A. Randazzo // *Environmental Geology* (2003) 43(7), p.743–751.
 18. Touzani M. Mapping the Pollution Plume Using the Self-Potential Geophysical Method: Case of Oum Azza Landfill, Rabat, Morocco / Meryem Touzani, Ismail Mohsine, Jamila Ouardi, Ilias Kacimi, Moad Morarech, Mohamed Habib El Bahajji, Tarik Bouramtane, Abdessamad Tiouiouine, Suzanne Yameogo and Badr El Mahrard // *Water* 2021, 13, 961. p.1-10
 19. Zhan L.T. Use of electrical resistivity tomography for detecting the distribution of leachate and gas in a large-scale MSW landfill cell / Liang-tong Zhan, Hui Xu, Xiao-ming Jiang, Ji-wu Lan, Yun-min Chen, Zhen-ying Zhang // *Zhongguo Huanjing Kexue/China Environmental Science* 2014 34(8) p.2030-2039
 20. Zume J.T. Subsurface Imaging of an Abandoned Solid Waste Landfill Site in Norman, Oklahoma / Joseph T. Zume, Aondover Tarhule, and Scott Christenson // *Ground Water Monitoring & Remediation* 26, no. 2/ Spring 2006/pages 62–69
 21. Азимов А.Т. Анализ результатов комплексных геохимических исследований образцов компонентов ландшафта из зоны влияния мест захоронения твердых бытовых отходов / А.Т. Азимов, С.П. Кармазиненко, И.В. Кураева, Ю.Ю. Войтюк // *Отходы, причины их образования и перспективы использования. Краснодар, 26–27 марта 2019 года* с198-200

22. Алешина Т.А. Причины возгораний на свалках ТБО / Алешина Татьяна Анатольевна // **Вестник МГСУ 2014**
23. Балобаненко А.А. Колебания уровней подземных вод четвертичных отложений в южной и юго-восточной части западно-сибирского артезианского бассейна / А.А. Балобаненко // Проблемы геологии и освоения недр 2012, с.427-428
24. Беляева Ю.Л. Геологические процессы на полигонах. Образование фильтрата / Ю.Л. Беляева, Д.В. Беляков // Твердые бытовые отходы 2009 №6 с 32-33
25. Гусев А.П. Малоуглубинная геофизика при оценке состояния геологической среды промышленных зон (на примере полигона твердых отходов Гомельского химического завода) / А.П. Гусев, В.Л. Моляренко, А.И. Павловский, И.О. Прилуцкий, С.В. Андрушко // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2021, № 4, с.63–70
26. Ерошина Д.М. Влияние на подземные воды полигонов промышленных отходов, расположенных в отработанных карьерах на территории Минской области / Д.М. Ерошина, А.Л. Демидов, В.В. Ходин // Природные ресурсы №1 2012 с58-68
27. Иванов А.А. Электроразведка, учебное пособие для студентов дневного обучения / А.А. Иванов, П.В. Новиков, К.В. Новиков // МГРИ, Москва 2019
28. Иванова Ю.С. Эколого-геохимическая опасность локальных несанкционированных свалок на территории г. Ульяновска / Ю.С. Иванова // Ульяновский медико-биологический журнал. №1, 2011 с136-141
29. Каверин А.В. Свалочный газ как разновидность парниковых газов, образующихся на территории Мордовии / А.В. Каверин, Г.Р. Резаков // XXII научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов национального исследовательского мордовского государственного университета им. Н.П. Огарёва 2018 с 115-118
30. Разумихин Н.В. Природное районирование Новгородской области / Д.Б. Малаховский, Р.А. Филенко, А.А. Хантулев, ред. Н.В. Разумихин // Издание Ленинградского Государственного Университета, Ленинград, 1978 г., 250 стр., УДК: 551.4
31. Рамазанов Р.С. Свалочный газ как альтернативный источник энергии / Р.С. Рамазанов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(2): с 23-34.
32. Романов В.В. Комплекс геофизических методов исследований полигонов твердых отходов горнодобывающих предприятий / В.В. Романов, К.С. Мальский, А.И. Посеренин, А.Н. Дронов, А.А. Иванов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 11. с. 114–120.

33. Светов Б.С. Основы геоэлектрики / Б.С. Светов // Издательство ЛКИ 2008
34. Соломин И.А. Системы удаления и переработки фильтрата на полигонах захоронения ТКО / И.А Соломин // Природообустройство №3, 2020
35. Шарова О.А. Влияние полигона твердых бытовых отходов на состояние подземных вод (на примере полигона ТБО Р. П. Красный Яр Астраханской области) / О.А. Шарова // Вестник ТГУ, т.19, вып.5, 2014
36. Шевнин В.А. Электроразведка / А.А. Бобачев, Д.К. Большаков, И.Н. Модин, ред. В.А. Шевнин // Пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей, издательство Полипресс т.П 2013
37. Эшанкулов О.Д. Факторы влияющие на механизм образования биогаза / О.Д. Эшанкулов, С.Р. Абдуризаева // Фундаментальные основы инновационного развития науки и образования 2019 с 23-26

Картографические материалы

38. Апухтин Н.И. Геологическая карта Ленинградской, Псковской и Новгородской областей / Н.И. Апухтин, ред. И.И. Краснов, В.А. Селиванова // Геология СССР 1969
39. Архангельский Б.Н. Гидрогеологическая карта Ленинградской, Новгородской и Псковской областей / Б.Н. Архангельский / Гидрогеология СССР 1963

Руководства по эксплуатации

40. Руководство пользователя ZondRes2D

Интернет ресурсы

41. azniirkh.vniro.ru
42. climate-data.org
43. ecoanaliz.ru