

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева
Российской академии наук (ИГЭ РАН)**

БЕЗОПАСНОЕ ЗАХОРОНЕНИЕ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ В ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЕ

Под редакцией академика В.И. Осипова

**Москва
Российский университет дружбы народов
им. Патриса Лумумбы
2025**

УДК 628.4:504.06(035.3)

ББК 38.94+26.3

Б40

*Издание подготовлено по результатам
и при финансовой поддержке гранта РНФ № 22-17-00045*

Рецензенты:

доктор геолого-минералогических наук, профессор,
заведующий кафедрой урбоэкологии Российского государственного
геологоразведочного университета им. С. Орджоникидзе

А.А. Лаврусевич;

доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры прикладной экологии
института экологии Российского университета
дружбы народов им. П. Лумумбы *А.П. Хаустов*

Авторы:

В.И. Осипов, И.В. Галицкая, В.Г. Заиканов, И.В. Козлякова, О.Н. Еремина,
Н.Г. Анисимова, В.Н. Бурова, Е.В. Булдакова, И.Н. Заиканова,
И.А. Кожевникова, И.А. Костикова, Ю.А. Мамаев, Т.Б. Минакова,
В.С. Путилина, Т.И. Юганова, Е.Р. Романова, Е.С. Соломатина,
Ю.В. Трофимов, Е.С. Чуткерашвили, А.Г. Хайрединова

**Б40 Безопасное захоронение твердых коммунальных отходов в геологи-
ческой среде : монография / под редакцией академика В. И. Оси-
пова. — Москва : РУДН, 2025. — 506 с. : ил.**

ISBN 978-5-209-12588-4

Монография представляет собой обобщение результатов исследований в области безопасного захоронения твердых коммунальных отходов в геологической среде, выполнявшихся в 2022–2024 гг. при поддержке гранта Российского научного фонда (№ 22-17-00045). Рассматривается современное состояние вопроса обращения с отходами в России и зарубежных странах и дается оценка полигонной технологии захоронения ТКО как наиболее распространенного метода обращения с отходами в нашей стране. Излагаются научно-методические основы обеспечения геозологической безопасности полигонов ТКО и приводится обоснование концепции создания безопасного полигона. Подробно освещаются научно-методические подходы к выбору мест для оптимального размещения полигонов ТКО для разных масштабов исследования, основанные на оценке благоприятности геологической среды с помощью специального инженерно-геологического районирования и картографирования.

Книга предназначена для широкого круга специалистов в области обращения с ТКО, в том числе геозологии, гидрогеологии и инженерной геологии.

ISBN 978-5-209-12588-4

© Коллектив авторов; под ред. Осипова В.И., 2025
© Институт геологии им. Е.М. Сергеева РАН, 2025
© Оформление. Российский университет
дружбы народов, 2025

Оглавление

Введение (Осипов В.И., Еремина О.Н.).....	9
--	----------

Часть 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ОБРАЩЕНИЯ С ТВЕРДЫМИ КОММУНАЛЬНЫМИ ОТХОДАМИ В РОССИИ И ЗА РУБЕЖОМ

Глава 1.1. Состав и свойства твердых коммунальных отходов (ТКО) (Мамаев Ю.А., Соломатина Е.С.).....	17
1.1.1. Компонентный (морфологический) состав и свойства ТКО	18
1.1.2. Особенности морфологического состава ТКО Московского региона	22
1.1.3. Исследование морфологического состава отходов на некоторых полигонах ТКО в Московской области	28

Глава 1.2. Основные методы обращения с отходами (Мамаев Ю.А.).....	42
1.2.1. Методы биологического обезвреживания отходов	43
1.2.2. Технологии термического обезвреживания и ликвидации отходов.....	47
1.2.3. Размещение (захоронение) отходов на мусорных полигонах	51

Глава 1.3. Зарубежный опыт обращения с ТКО (Заиканов В.Г., Заиканова И.Н.).....	53
1.3.1. Общие направления стратегии и тактики стран ЕС в разработке концепции управления ТКО	55
1.3.2. Организационные меры решения проблемы управления отходами в некоторых странах Западной Европы	62
1.3.3. Законодательная база Республики Польша о составе ТКО и безопасности полигонов	71
1.3.4. Методы обращения со свалочными газами и фильтратом.....	75

Глава 1.4. Нормативно-правовое регулирование обеспечения геоэкологической безопасности полигонов ТКО в России (Заиканов В.Г., Заиканова И.Н.).....	81
1.4.1. Анализ законодательства РФ по обращению с ТКО.....	81
1.4.2. Законодательство РФ относительно геоэкологической безопасности	91
1.4.3. Проблемы размещения полигонов ТКО в РФ	99
1.4.4. Концептуальные предложения по планированию и размещению объектов хранения ТБО в РФ	107
Глава 1.5. Что лучше: сжигать или разлагать ТКО? (Осипов В.И., Заиканов В.Г.)	112

Часть 2. НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛИГОНОВ ТКО

Глава 2.1. Полигонная технология обращения с ТКО как природоподобный процесс (Осипов В.И., Заиканов В.Г., Заиканова И.Н.).....	127
2.1.1. Основные принципы и этапы функционирования полигонов ТКО	127
2.1.2. Процессы разложения отходов и воздействие полигона на окружающую среду	131
Глава 2.2. Процессы разложения ТКО и выщелачивание загрязняющих веществ из свалочных тел (Галицкая И.В., Путилина В.С., Юганова Т.И.)	137
2.2.1. Деградация отходов	137
2.2.2. Выщелачивание загрязняющих веществ из свалочного тела.....	142
Глава 2.3. Загрязнение компонентов природной среды на участках размещения полигонов ТКО (Галицкая И.В., Путилина В.С.).....	162

Глава 2.4. Примеры исследования влияния полигонов ТКО на компоненты природной среды (Галицкая И.В., Путилина В.С., Костикова И.А., Соломатина Е.С., Трофимов Ю.В.).....	178
2.4.1. Исследования состояния полигона ТКО «Дубна Правобережная» для обоснования мероприятий по обеспечению геоэкологической безопасности в пострекультивационный период	178
2.4.2. Защищенность подземных вод.....	192
2.4.3. Исследование отложений зоны аэрации на территории расположения полигонов ТКО как вторичного источника загрязнения	198
Глава 2.5. Принципы создания современного безопасного полигона ТКО (Заиканов В.Г., Мамаев Ю.А.).....	216
2.5.1. Задачи исследований по разработке природоподобных технологий захоронения ТКО	216
2.5.2. Основные принципы размещения безопасных полигонов ТКО	217
2.5.3. Инженерное обустройство безопасных полигонов ТКО	224
2.5.4. Обеспечение экологической безопасности полигонов ТКО	233
Глава 2.6. Современные методы обработки отходов перед захоронением (Юганова Т.И.).....	242
2.6.1. Механико-биологическая обработка – инновационный метод обращения с ТКО	242
2.6.2. Исследование выщелачивания загрязняющих веществ из обработанных отходов, захораниваемых на полигонах ТКО.....	262
2.6.3. Захоронение остатков от сжигания твердых коммунальных отходов (состав, выщелачивание загрязняющих веществ, обработка для уменьшения воздействия на окружающую среду).....	278

Глава 2.7. Принципы мультibarьерной защиты геологической среды от воздействия полигонов ТКО (Заиканов В.Г., Заиканова И.Н.)	292
2.7.1. Применение мультibarьеров при проектировании полигонов ТКО	293
2.7.2. Геохимические барьеры	296
2.7.3. Разновидности искусственных мультibarьеров	300

Глава 2.8. Внедрение принципов природоподобных технологий на современных полигонах ТКО (на примере полигона «Тимохово») (Еремина О.Н.)	308
---	-----

**Часть 3. НАУЧНО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ
ПОДХОДЫ К ВЫБОРУ МЕСТ ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО
РАЗМЕЩЕНИЯ ПОЛИГОНОВ ТКО.
ОЦЕНКА ОПАСНОСТИ И РИСКА**

Глава 3.1. Современные методы выбора мест размещения объектов ТКО (Еремина О.Н., Козлякова И.В., Мамаев Ю.А.)	320
3.1.1. Направления научных исследований для оптимального размещения объектов ТКО	320
3.1.2. Применение ГИС в информационной системе управления ТКО	324
3.1.3. Многокритериальная оценка территорий для выбора мест оптимального размещения объектов ТКО	328
3.1.4. Учет инженерно-геологических условий в электронной модели территориальной схемы обращения с ТКО	336

Глава 3.2. Методологические основы оценки геоэкологических и социально-экономических условий размещения полигонов для субъектов РФ на федеральном уровне (Заиканов В.Г., Минакова Т.Б., Булдакова Е.В.)	342
3.2.1. Проблемы размещения полигонов ТКО	344
3.2.2. Методика оценки благоприятности территорий субъектов РФ для размещения полигонов ТКО	347

3.2.3. Оценка благоприятности территории модельных регионов для размещения полигонов ТКО.....	351
3.2.4. Анализ социально-экономических условий регионов РФ для оптимального размещения полигонов ТКО.....	365
3.2.5. Оценка благоприятности территорий субъектов России для размещения полигонов ТКО.....	371

Глава 3.3. Принципы районирования платформенных территорий по степени естественной защищенности геологической среды на примере ЦФО РФ (Козлякова И.В., Еремина О.Н., Анисимова Н.Г., Кожевникова И.А.)	378
3.1.1. Проблемы захоронения ТКО на территории Центральной России и особенности ее геологического строения	378
3.3.2. Концептуальная модель оценки территории Центральной России для размещения полигонов и предприятий утилизации ТКО	383
3.3.3. Оценка естественной защищенности геологической среды.....	386
3.3.4. Применение обзорной карты оценочного инженерно-геологического районирования	394

Глава 3.4. Оценка благоприятности геологической среды на региональном уровне для территориальной схемы (на примере Московской области) (Козлякова И.В., Еремина О.Н., Романова Е.Р., Хайрединова А.Г., Чуткeraшвили Е.С.)	397
3.4.1. Геолого-геоморфологические условия Московской области.....	398
3.4.2. Типизация грунтовых толщ Московской области	405
3.4.3. Оценочное инженерно-геологическое районирование территории Московской области	410
3.4.4. Применение карты районирования для анализа геологической обстановки в окрестностях полигона ТКО (на примере полигона Непейно)	419

Глава 3.5. Оценка геологической опасности и риска при размещении полигонов ТКО на основе оценочного инженерно-геологического районирования для территории ЦФО (Бурова В.Н., Козлякова И.В.)	423
3.5.1. Принципы и подходы к оценке риска	426
3.5.2. Оценка природно-техногенно-социального риска ЦФО России	435
 Глава 3.6. Комплексная поэтапная оценка инженерно-геологических условий платформенных территорий при исследованиях на региональном и локальном уровнях для размещения полигонов ТКО (Осипов В.И., Еремина О.Н., Козлякова И.В., Мамаев Ю.А.)	443
3.6.1. Комплексная региональная оценка инженерно-геологических условий платформенных территорий для размещения полигонов ТКО на примере Владимирской области	445
3.6.2. Сравнительная оценка инженерно-геологических массивов по степени их пригодности для размещения объектов ТКО на локальном уровне исследований	458
3.6.3. Характеристика участков, различающихся по условиям размещения отходов	463
 Заключение (Осипов В.И., Козлякова И.В.)	469
 Литература	477

Введение

В настоящее время обращение с отходами производства и потребления в целях предотвращения их вредного воздействия на окружающую среду и здоровье человека, а также вовлечение таких отходов в хозяйственный оборот в качестве дополнительных источников сырья является актуальнейшей проблемой не только в России, но и во всем мире. Особое внимание специалистов уделяется разработке способов безопасной утилизации и захоронения отходов, оценке экологического состояния территорий и влияния объектов размещения отходов на окружающую среду и социум (Осипов, 2019). Согласно Федеральному закону РФ «Об отходах производства и потребления» № 89-ФЗ от 24.06.1998 г. с внесенными в последующие годы изменениями и дополнениями¹, *«под объектом размещения (захоронения или хранения) отходов понимается специально оборудованное сооружение, которое обустроено в соответствии с требованиями законодательства в области охраны окружающей среды и обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия населения и предназначено для долгосрочного (более 11 месяцев) складирования отходов в целях их последующей утилизации, обезвреживания, захоронения»*. Хранение отходов потребления (ТКО) производится на санитарных полигонах, на которых обеспечивается соблюдение технологии складирования,

¹ Федеральный закон «Об отходах производства и потребления» № 89-ФЗ от 24.06.1998 (ред. от 29.07.2018). URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/12555>.

предусмотрено наличие инженерных сооружений и осуществляется контроль влияния на объекты окружающей среды в соответствии с требованиями нормативных документов². Однако на практике в России, помимо таких специально оборудованных полигонов ТКО, отвечающих нормативным требованиям, существуют иные категории объектов размещения ТКО (Погорелов, Липилин, 2014):

1) санкционированные необорудованные захоронения ТКО, которые хотя и введены в эксплуатацию с соблюдением нормативов размещения объекта по санитарным и геолого-гидрологическим критериям (при размещении отходов проводится послойное уплотнение, в некоторых случаях без изоляции слоев, окончательная засыпка рабочей поверхности захоронения завершает эксплуатацию объекта), но при этом регулярных наблюдений за полигоном не проводится;

2) стихийные свалки, образованные без проведения инженерно-экологических изысканий на территории, отведенной под размещение отходов, и минимальными экономическими затратами на этапах эксплуатации и закрытия объекта; отходы размещены насыпью без уплотнения и изоляции, а само захоронение и зона его влияния в течение длительного времени не контролируются;

3) замусоренные территории, часто возникающие стихийно в понижениях рельефа.

По данным Росприроднадзора, число специально обустроенных полигонов захоронения ТКО в 5 раз меньше, чем

² СП 320.1325800.2017. Полигоны для твердых коммунальных отходов. Проектирование, эксплуатация и рекультивация. М.: Стандартинформ, 2018. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293739/4293739224.htm> (дата обращения: 15.08.2022).

санкционированных свалок. Число несанкционированных свалок в 2,5 раза превышает количество санкционированных объектов захоронения отходов (Малышевский, Хабиров, 2012; Слюсарь, 2016). По подсчету аналитической службы аудиторско-консалтинговой сети FinExpertiza, только в 2021 г. количество несанкционированных свалок ТКО увеличилось в России на 9,1%, или на 1,33 тыс. объектов в 56 из 85 российских регионов³.

Проблема экологически безопасного обращения с отходами производства и потребления является одной из важнейших в Российской Федерации, что обусловлено быстрыми темпами накопления их объемов, в том числе твердых коммунальных отходов (ТКО). К последним относятся отходы, образующиеся в жилых помещениях в процессе потребления физическими лицами, а также товары, утратившие свои потребительские свойства в процессе их использования физическими лицами в жилых помещениях в целях удовлетворения личных и бытовых нужд (Осипов, 2019; Постановление Правительства РФ от 12.07.2016).

По данным Минприроды РФ, ежегодно в стране с населением около 146 млн человек образуется до 65 млн т (130 млн м³) ТКО (Гос. доклад «О состоянии и охране окружающей среды РФ», 2018). Из этого объема 30% приходится на пищевые отходы, 10% — на отходы из пластика, 7% — на стекло, 3% — на металл. Прочие отходы, включающие камни, древесину, кости, резину, кожу, бумагу и другие компоненты, составляют 28% общего объема. Около 60% объема ТКО подвергается обработке — сортировке, дроблению,

³ URL: <https://finexpertiza.ru/press-service/researches/2022/kol-stikh-sval-yroslo/> (дата обращения: 15.08.2022).

обезвреживанию, уплотнению, пакетированию, компостированию. Из них только 5–7% идет на переработку и повторное использование. Основная масса ТКО (до 93%) вывозится на объекты размещения ТКО: полигоны, свалки, отвалы, отстойники.

Масса образования отходов на одного человека в год по территории РФ в среднем составляет 450 кг (Осипов, Мамаев, Козлякова, 2020). При этом нормативы накопления отходов по субъектам РФ варьируют в широких пределах, например: Амурская область – 671 кг/чел. в год; Камчатский край – 567 кг/чел. в год; Еврейская АО – 153 кг/чел. в год; Пермский край – 158 кг/чел. в год (Промежуточные итоги..., 2020).

Под полигоны ТКО ежегодно отводится 7–10 тыс. га земель, из которых на земли населенных пунктов приходится до 53% площадей, на земли сельскохозяйственного назначения – 15%, на земли лесного фонда – 7%, на земли иных категорий – 25% (ФЗ-89 от 24.06.1998; ФЗ-136 от 25.10.2001).

Размещение отходов на полигонах, не подготовленных к эксплуатации, ухудшает экологические условия прилегающих территорий, снижает качество жизни людей, вызывает социальную напряженность и протесты населения. По-видимому, данная проблема может быть полностью закрыта только тогда, когда мощности мусороперерабатывающих предприятий приблизятся к объемам образующихся отходов.

С захоронением ТКО связан целый комплекс серьезных экологических проблем. В районах расположения участков депонирования ТКО атмосферный воздух, почвы, растительность, подземные и поверхностные воды, донные отложения испытывают различные негативные воздействия. В настоящее время как действующие, так и закрытые свалки

и полигоны ТКО являются источниками загрязнения природной среды. В течение длительного периода времени происходит постоянный вынос веществ за границы участка захоронения ТКО и образование ареалов загрязнения, размеры и характер которых в существенной степени зависят как от интенсивности техногенного воздействия, так и от устойчивости к нему компонентов природной среды.

Одним из наиболее опасных последствий воздействия объектов захоронения ТКО является загрязнение водных систем, особенно подземных вод, поскольку не только многие свалки, но и полигоны были построены без инженерных барьеров и без учета природных (геологических) барьеров. Загрязнение подземных вод наблюдается не только в период эксплуатации, но и после закрытия полигонов. Один из наиболее острых аспектов — длительность загрязнения свалочного фильтрата как источника воздействия на качество водных систем на участках размещения свалок и полигонов ТКО.

Значительный спектр высокотоксичных неорганических и органических веществ, поступающих из свалочного тела в окружающую природную среду, постоянное поступление в атмосферу метана и легколетучих высокотоксичных соединений ставят полигоны в число опаснейших источников загрязнения природных сред и отрицательного воздействия на живые организмы. Серьезную угрозу здоровью людей представляет загрязнение питьевых вод органическими соединениями и тяжелыми металлами, поступающими с мест складирования отходов. Не менее опасно загрязнение воздуха в районе свалок газообразными продуктами процессов брожения органического вещества (метаном, диоксидом азота, углеводородными газами и др.). Процессы продуцирования

высокотоксичных и экологически опасных веществ протекают десятки лет при функционировании свалки и многие годы после ее рекультивации, что создает реальную угрозу окружающей среде и здоровью населения.

Исследования, результаты которых изложены в данной монографии, направлены на решение проблемы обращения с твердыми коммунальными отходами (ТКО) и их воздействия на геологическую среду. Эта проблема имеет два аспекта. С одной стороны, экологически безопасное и экономически эффективное размещение новых полигонов и предприятий утилизации ТКО. С другой стороны, оценка уже существующих полигонов твердых коммунальных отходов и обеспечение их экологической безопасности в пост-эксплуатационный период.

На сегодняшний день одним из основных способов утилизации ТКО в России и многих странах мира является их захоронение в верхних горизонтах геологической среды. В России большинство действующих свалок не были оборудованы для не наносящего ущерба геологической среде приема ТКО, а местоположение их до сих пор негативно сказывается на окружающей природной среде и жизнедеятельности человека. Свалки и полигоны занимают огромные территории и относятся к наиболее масштабным объектам накопленного экологического вреда.

Размещение полигонов ТКО требует комплексного анализа всех компонентов природной среды. Для этого необходимо оценивать геоморфологические, геологические и гидрогеологические, климатические (микроклиматические), гидрологические условия территории, а также социально-экономические условия, наличие особо охраняемых природных территорий и др.

Существует большое количество исследований, показывающих необходимость проведения многокритериального анализа при выборе мест для размещения отходов. В последние годы во многих странах мира решение вопроса о выборе мест размещения объектов обращения с отходами базируется на мультикритериальном подходе с использованием ГИС-технологий. Такой подход хорошо зарекомендовал себя, доказав свою высокую эффективность в нахождении разумного решения.

Для территорий расположения закрытых, в том числе рекультивированных, свалок и полигонов твердых коммунальных отходов необходимо получение новых знаний о трансформации состава почвенного покрова и подземной гидросферы с целью научного обоснования эффективной стратегии управления данными территориями.

Несмотря на значительное количество публикаций по проблеме воздействия свалок и полигонов ТКО на природные среды, до сих пор существует еще ряд недостаточно исследованных вопросов, связанных с влиянием закрытых и рекультивированных свалок и полигонов ТКО на изменение химического состава депонирующих и миграционных сред на данных территориях. К таким вопросам относятся: трансформация состава почв, пород, подземных вод в постэксплуатационный период; условия развития двух разнонаправленных процессов активизации поступления загрязняющих веществ из почв и пород — вторичного источника загрязнения подземных вод и самоочищения загрязненных сред.

Особенности геологической среды — один из критериев, который на практике в сфере обращения с ТКО учитывается в самую последнюю очередь. При размещении объектов

ТКО в приоритете стоит удаленность от населенных пунктов поверхностных водоемов, особо охраняемых природных территорий. Деградация геологической среды, безусловно, происходит значительно медленнее, чем изменения поверхностных объектов. В то же время геологическая среда (горные породы и подземные воды) способна накапливать вредные компоненты в течение длительного времени, создавая тем самым предпосылки экологической катастрофы для будущих поколений. Недооценивая сейчас опасность изменения геологической среды при размещении отходов, мы создаем угрозу экологической безопасности будущего.

Между тем существуют литологические комплексы горных пород, способные практически полностью изолировать помещаемые в них отходы, исключая риск загрязнения окружающей среды. Исследование природной защищенности геологической среды при выборе мест захоронения ТКО – важнейшее направление обеспечения геоэкологической безопасности при обращении с отходами.

В монографию включены результаты многолетних работ коллектива сотрудников Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН. Основу книги составляют исследования, выполненные под руководством академика В.И. Осипова в рамках проекта РНФ №22-17-00045 «Безопасное захоронение твердых коммунальных отходов в геологической среде».

Часть 1. Современное состояние проблемы обращения с твердыми коммунальными отходами в России и за рубежом

Глава 1.1. Состав и свойства твердых коммунальных отходов (ТКО)

(Ю.А. Мамаев, Е.С. Соломатина)

Создание современной эффективной индустриальной отрасли обращения с отходами производства и потребления является важной государственной задачей на современном этапе развития Российской Федерации. С 2019 г. в России проводится реформа системы обращения с ТКО, целью которой является повышение эффективности управления обращением с отходами, и превращение данного вида хозяйствования в доходную отрасль экономики (Промежуточные итоги реальных реформ в сфере ТКО, 2020). Важным вопросом стратегического планирования мероприятий по реализации реформы на региональном и муниципальном уровнях является повсеместное внедрение и совершенствование структурных (территориальных) схем обращения с ТКО, которые обычно включают разноплановые мероприятия, направленные на осуществление на территориях субъектов РФ и муниципальных образований деятельности по сбору, транспортированию, обработке, утилизации, обезвреживанию и размещению ТКО, образующихся на данной территории

или поступающих из других административно-территориальных образований. Мероприятия осуществляются в соответствии с приоритетностью решаемых задач. К ним относятся:

- максимальное использование потребительских качеств товаров, материалов и услуг, уменьшение количества образующихся отходов в местах их образования (сбора);
- обработка, сортировка, утилизация ТКО в целях получения из них вторичных ресурсов, возвращаемых в хозяйственный оборот;
- обезвреживание и захоронение не утилизируемых остатков с минимальным воздействием на окружающую среду и здоровье человека.

1.1.1. Компонентный (морфологический) состав и свойства ТКО

При разработке территориальных схем обращения с ТКО любого масштаба важно определение количества образующихся ТКО, их компонентного (морфологического) состава, а также физико-химических свойств. Необходимыми являются данные о ежегодном образовании отходов, систематизированные по категориям отходов согласно федеральному классификационному каталогу отходов (ФККО) и классам опасности от I до VI¹. Обычно к ТКО относятся отходы IV и V классов опасности, но при этом в них могут содержаться более опасные компоненты и включения. Любые новые виды производств, технологий и продукции обуславливают постоянное расширение перечня отходов, вносимых в ФККО (Приказ Росприроднадзора от 22.05.2017 № 242).

¹ URL: <https://rpn.gov.ru/fkko/>

Виды и способы поступления загрязняющих веществ в окружающую среду напрямую связаны с видами коммунальных отходов, поступающих на свалку. В городской среде около 70% отходов поступают из жилого фонда, остальные 30% распределяются между прочими объектами городского хозяйства (Негуляева, 2005). Условно выделяются 13 компонентов, из которых состоят российские ТКО: бумага, картон, пищевые отходы, дерево, металл, текстиль, кость, стекло, кожа и резина, камень, полимерные материалы, неклассифицируемые отходы и отсев (ПНД Ф 16.3.55-08 ФР). Часто на практике морфологическое разделение ТКО на большое количество компонентов оказывается излишним, и тогда ограничиваются укрупненным кратким перечнем отходов (Постановление Правительства РФ №1156 от 12.07.2016).

Морфологический состав — это основной параметр, позволяющий качественно оценить ТКО. Знание компонентного состава ТКО позволяет оценивать их как сырье для последующей переработки и использования содержащихся в них компонентов. Эта характеристика непостоянна и сильно зависит от времени года, конкретного региона и валового регионального продукта (ВРП), отраслей промышленности, характера застройки, типа сортировки мусора. В разных регионах этот показатель существенно изменяется в зависимости от географического положения и особенностей природных условий территорий, количества населения, исторически сложившегося уклада его (населения) жизни, структуры потребления продуктов и товаров, торговых и производственных связей с другими регионами и странами. Кроме того, состав отходов закономерно меняется вместе с технологическими изменениями. Так, за последние десятилетия количество и разнообразие полимеров значительно выросло. Основные компоненты ТКО, наносящие вред окружающей

среде за счет биodeградации, это — пищевые отходы и загрязненные ими бумага и картон, дерево, садовые отходы, часть текстиля (Жилинская, 2010). Суммарное количество таких отходов составляет порядка 50–60%, и они в свою очередь разлагаются в естественных условиях (брожение, гниение, тление) и являются питательной средой для патогенной микрофлоры и средой обитания гельминтов, цист, грызунов, птиц, насекомых, бродячих животных.

К показателям физических и физико-химических свойств ТКО относятся: плотность, влажность, теплоемкость, зольность, теплотехнические характеристики, агрохимические показатели и др. Плотность коммунальных отходов изменяется в широких пределах — от 60–120 до 350–530 кг/т. Например, плотность ТКО в контейнерах из многоквартирных домов благоустроенного жилого фонда Московской области в весенне-летний сезон колеблется от 0,18 до 0,22 т/м³, а в осенне-зимний — от 0,2 до 0,25 т/м³. Плотность ТКО г. Москвы меняется от 0,11 до 0,42 т/м³. При этом для разных городов среднегодовое значение плотности ТКО составляет 0,19–0,23 т/м³. Влажность ТКО колеблется в широких пределах и зависит от сезонов года, соотношения содержащихся в них основных компонентов и условий кратковременного хранения на месте сбора.

Теплоемкость наиболее широко представленных компонентов ТКО варьирует в следующих пределах: стекло — 1160, бумага — 1260, текстиль — 1300, древесина — 1360, резина — 1590, пищевые отходы — 1715 и пластик — 1300–2300 Дж/кг/К. Теплоемкость рабочей массы ТКО, вывозимых из Москвы, составляет в среднем 8259,7 Дж/кг/К. ТКО обладают свойством слеживаться, т.е. при длительной неподвижности и без какого-либо внешнего воздействия терять сыпучесть и уплотняться с выделением фильтрата и

биогазов. Свойства ТКО существенно зависят не только от морфологического состава отходов, но и от методов и технологий их обработки, условий размещения, климатических воздействий и активности протекающих в них физико-химических и биологических процессов: разложения и деградации компонентов, гумификации, формирования фильтрата и биогазов, выщелачивания и миграции химических веществ и др.

С геологической точки зрения значительные объемы ТКО в местах их размещения (захоронения) можно отнести к современному антропогенному типу отложений, а именно одному из геологических образований, связанных с жизнедеятельностью человека (рис. 1.1.1).



Рис. 1.1.1. Мусорная свалка — новый тип антропогенных отложений
(Источник: URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/
%D0%A1%D0%B2%D0%B0%D0%BB%D0%BA%D0%B0](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B2%D0%B0%D0%BB%D0%BA%D0%B0))

Свалочное тело представляет собой современное геологическое тело, сложенное техногенным грунтом, основным отличием которого от природных объектов являются скорость формирования, состав и динамические характеристики процесса биогеохимического разложения. Закрытый полигон (прекративший работу) есть скопление «осадка», преобразующегося в осадочную горную породу. Стадия диагенеза протекает в виде процесса растворения веществ и минерализации органической составляющей (Подлипский, 2010). Принципиальным отличием свалочных грунтов от природных является то, что органические компоненты находятся в неразложившемся или неполностью разложившемся состоянии, причем такие органические вещества, как полимеры, практически стабильны.

1.1.2. Особенности морфологического состава ТКО Московского региона

Наиболее детальный анализ ТКО Московской области проводился в рамках программы «Чистая страна» на этапе планирования территориальной схемы обращения с отходами в 2017–2019 гг.

К основным факторам, влияющим на состав отходов, можно отнести следующие:

- высокую плотность населения;
- ярко выраженную сезонность в образовании отходов в связи с увеличением численности проживающих в Московской области в летний период;
- неравномерное территориальное распределение ТКО, сконцентрированное внутри Малого Московского бетонного кольца (далее – ММБК);

- запрет на захоронение отходов внутри г. Москвы;
- дефицит свободных земель, отвечающих требованиям экологической безопасности при размещении объектов по обращению с отходами;
- относительно высокий уровень жизни населения.

Основные источники образования отходов:

- многоквартирный дом;
- индивидуальный жилой дом (группа индивидуальных жилых домов);
- административное учреждение;
- предприятие общественного питания;
- дошкольное или общеобразовательное учреждение;
- гостиница, другое место временного размещения;
- кладбище;
- садоводческое, дачное, огородническое некоммерческое товарищество;
- спортивный объект;
- производственный объект;
- объект культуры;
- объект торговли;
- автосервис, автостоянка;
- службы быта: ремонт обуви, ремонт техники, парикмахерская, прачечная;
- химчистка, баня;

и другие виды организаций.

Основная масса ТКО образуется на северо-востоке, востоке и юго-востоке Московской области (в районах, прилегающих к городу). При этом наименьшее количество отходов образуется на западе Московской области, на границе с другими областями.

В Московской области по данным 2016 г. ежегодно образуется порядка 9,3 млн т отходов производства и потребления. Данные о количестве образующихся отходов представлены по их видам в табл. 1.1.1 (Постановление Правительства Московской области, 2016). Усредненный морфологический состав отходов представлен на рис. 1.1.2.

Таблица 1.1.1

Количество отходов различных видов, образующихся на территории Московской области*

№ п/п	Наименование вида отхода	Количество, тыс. т/год
1	Твердые коммунальные отходы	3 835
2	Другие отходы производства и потребления, всего	5 424
2.1	Отходы сельского, лесного хозяйства, рыбоводства и рыболовства	877
2.2	Отходы от добычи полезных ископаемых	34
2.3	Отходы обрабатывающих производств	1 528
2.4	Отходы потребления, производственные и непроизводственные	1 006
2.5	Отходы обеспечения электроэнергией, газом и паром	414
2.6	Отходы при водоснабжении, водоотведении	1 019
2.7	Отходы строительства и ремонта	527
2.8	Отходы при выполнении прочих видов деятельности	19

*Источник: Территориальная схема обращения с отходами, в том числе с твердыми коммунальными отходами Московской области. URL: <https://люберцы.рф/files/JKH/Regoper/Территориальная%20схема.pdf>

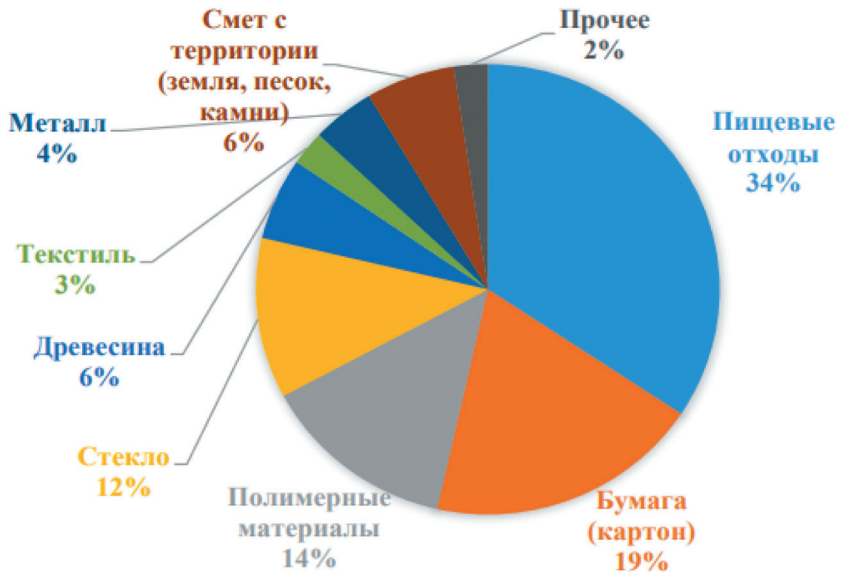


Рис. 1.1.2. Морфологический состав отходов, поступающих на полигоны ТКО
(Постановление Правительства Московской области, 2016)

Ретроспективный анализ структуры ТКО Московского региона

До середины XX в. отходы в основном представляли собой пищевые, которые утилизировали в выгребных ямах за пределами города или в оврагах, а часть мусора сжигали в печах и каминах. Характерными особенностями ТКО Москвы являются низкое содержание бумаги и пищевых отходов и преобладание фракции отсева (табл.1.1.2). После 1930-х гг. исчезает фракция уголь, шлак, что связано с модернизацией системы отопления города (Козлов, Ивахнюк, 2014).

Проблемой утилизации и захоронения мусора озаботились уже в начале 1950-х гг. В Москве в ноябре 1952 г. Моссовет своим решением № 79/35 учредил при Московском жилом управлении контору по вывозу бытовых отходов. Предлагалось ввести отдельный сбор мусора для пищевых и твердых отходов, к которым относятся бумага, текстиль, металл, древесина, стекло и другие подобные материалы. Пищевые отходы планировали вывозить в подмосковные свиноводческие хозяйства для откорма животных. Твердые отходы должны были отправлять на фабрики по производству вторсырья. Однако не все ответственно относились к отдельному сбору вторсырья. Поэтому вместе с непригодными для переработки отходами попадали макулатура, стеклянная тара и т.д., в результате чего вторсырье быстро становилось непригодным.

Первые крупные мусорные полигоны стали появляться в 1960-х гг., как правило, в отработанных карьерах по добыче песка. Основу составляли пищевые отходы (около 40%), более 70% вторичных материалов уходило в переработку (Якшилов и др., 2010). Стоит отметить, что именно в 1960-х гг. появляются изделия из полимерных материалов.

Начиная с 1990-х гг. повсеместное использование упаковочных материалов, потребление полуфабрикатов в повседневной жизни большинством населения привели к значительному росту доли макулатуры и полимеров в общем объеме отходов и практически полному исчезновению некоторых традиционных категорий, например, «кости». По данным исследования, проводимого Ассоциацией рециклинга отходов в 2011 г. (Отходы в России, 2014), доля пищевых отходов снизилась с 40 до 31–34 % (рис. 1.1.3).

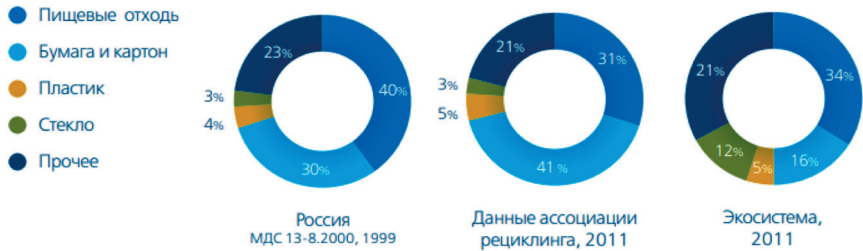


Рис. 1.1.3. Экспертная оценка структуры ТКО в России
(Отходы в России, 2014)

При изучении современных бытовых отходов создается впечатление, что они состоят в основном из полимерной упаковки, бумаги и картона. Такой эффект связан с относительно большими объёмами и малой плотностью (20–70 кг/м²) отходов XXI в. по сравнению с отходами века предыдущего. Полиэтиленовая плёнка, бумага и картон, повсеместно используемые как упаковочные материалы, составляют от 25 до 40% от массы ТКО. Значительную часть современных бытовых отходов (25–35%) составляют пищевые отходы. Они имеют высокую плотность (около 500 кг/м³) и характеризуются значительной влажностью (70–92%). В табл. 1.1.2 приведены данные об изменении состава отходов в Москве в период с 1928 по 2007 г. (Романов, 2016).

Таблица 1.1.2

**Морфологический состав отходов ТКО в г.Москве
в период 1928–2016 гг., %**

Компонент	1928	1952	1975	1986	1996	2002	2007	2016
Бумага, картон	18	16	28	39	41	31	28	19
Пищевые отходы	12	31	36	31	26	20	22	34
Дерево	4	1	3	2	1	3	3	6

Окончание табл. 1.1.2

Компонент	1928	1952	1975	1986	1996	2002	2007	2016
Металл	2	2	2	3	2	2	2	4
Текстиль	3	1	2	3	4	4	5	3
Кости	3	1	5	1	1	-	-	-
Стекло	4	1	4	5	5	5	5	12
Кожа, резина	-	1	1	2	2	5	5	
Камни	5	6	2	1	2	1	1	6
Полимеры	-	-		3	8	13	18	14
Уголь, шлак	4	-	-	-	1	-	-	-
Отсев размера менее 16 мм	45	40	17	10	7	20	17	2

1.1.3. Исследование морфологического состава отходов на некоторых полигонах ТКО в Московской области

Е.С.Соломатиной было проведено подробное исследование морфологического состава отходов на 8 полигонах ТКО в Московской области, что позволило оценить распределение этого параметра по площади области, по глубине свалочного тела, а также выявить изменение состава отходов в зависимости от возраста полигона.

Полигон № 1 на севере Московской области, недалеко от г. Москвы вблизи промышленной зоны, представленной предприятиями и организациями машиностроительного, оборонного, химического, перерабатывающего направлений, производства строительных материалов. Также вблизи полигона расположен крупный научно-образовательный комплекс. Высота складирования достигает 30 м, крутизна склонов равна 40–60°. Полигон эксплуатировался с 1981 по 2014 г. Основная геометрия полигона была сформирована к 2003 г., далее отсыпка новым мусором велась частично. Про-

бы мусора отбирались в 2015 г. На момент проведения изысканий поверхность полигона была задернована.

Полигон № 2 расположен на севере Московской области, недалеко от Дмитровского шоссе. Имеет небольшую высоту. Активно отсыпался с 2004 по 2018 г. Полигон был открыт в 1975 г. и выведен из эксплуатации в 2019 г. Свалочное тело представляет собой насыпь, частично заросшую сорной растительностью и кустарниками. Наиболее развитые отрасли района: легкая и текстильная промышленность, машиностроение и строительная индустрия, сельское хозяйство. Отходы на полигон поступали из Москвы и близлежащих территорий. Отбор проб мусора проводился в 2021 г.

Полигон № 3 расположен на северо-востоке Московской области, недалеко от Ярославского шоссе. Полигон открылся в 1979 г. и был рассчитан на прием отходов с близлежащих территорий. Основные предприятия района: лакокрасочный завод, завод пластмасс, фабрика игрушек, текстильные предприятия, Институт птицеводства, птицефабрика, сельское хозяйство. В 2005 г. полигон уже имел свою основную геометрию. Полигон закрыт в 2015 г. На момент проведения работ (2019–2021 гг.) полигон более 4 лет не функционировал.

Полигон № 4 расположен на востоке Московской области, недалеко от ЦКАД. Полигон был введен в эксплуатацию в 1964 г., закрыт для приема отходов в 2020 г. Свалочное тело представляет собой хаотичную насыпь высотой 1,0–20,0 м на участке площадью 9,22 га. Мусор на полигон поступал как из Москвы, так и с прилежащих территорий. Основные предприятия: ГРЭС, мебельная фабрика, лазерный центр, текстильные фабрики, сельское хозяйство. Отбор проб на морфологию мусора проводился непосредственно после закрытия полигона в 2020 г.

Полигон № 5 расположен на востоке Московской области, недалеко от ЦКАД. Полигон захоронения ТБО существует с 1964 г., закрыт в 2019 г. Мощность толщи отходов достигает 14,5 м. Мусор на полигон поступал как из Москвы, так и с прилежащих территорий. В советское время ведущей отраслью промышленности района была легкая (главным образом текстильная) промышленность. С начала 2000-х гг. основные отрасли: производство строительных материалов, гигиенических средств, лекарственных препаратов, пищевая промышленность, сельское хозяйство. Отбор проб проводился в 2020 г.

Полигон № 6 расположен на юго-востоке Московской области, недалеко от Новорязанского шоссе. Основными направлениями промышленности в районе являются: металлургия, пищевая, химическая промышленность и сельское хозяйство. Полигон состоит из двух карт – старой и новой, площадью 9,5 и 8,4 га соответственно. Свалочные тела представляют собой насыпной холм изометрической формы с плоской вершиной; старая карта практически полностью задернована. Полигон существует с 1990 г. Высота террикона достигает 15–20 м. Отбор проб проводился в 2020 г. Старая карта полигона на момент работ полностью перекрыта грунтом, по данным ретроспективного анализа, она не эксплуатируется с 2014 г. Значительная часть площади второй (новой) карты полигона ТКО перекрыта грунтом. Отходы до 2017 г. в основном поступали из близлежащих поселков и населенных пунктов, потом начался активный прием из Москвы и Московской области.

Полигон № 7 расположен на юге Московской области, недалеко от ЦКАД. Складирование отходов осуществляется с 1982 г. Основными отраслями промышленности района

являются машиностроение и металлообработка, развиты пищевая и химическая отрасли. Поступление отходов на полигон производилось с прилежащих населенных пунктов, из других районов Московской области и г. Москвы. До 2010 г. отсыпка велась в западной части полигона, в восточной части наблюдалось скопление сточных вод и фильтрата, затем отсыпка продолжалась в восточной части полигона. Прием отходов на полигоне ТКО прекращен с 2016 г. Пробы отбирались в 2019 г.

Полигон № 8 расположен на западе Московской области, недалеко от ЦКАД. Исследуемая территория до появления на ней полигона ТКО не использовалась, она представляла собой заболоченный участок с редколесьем. Эксплуатация полигона началась в 1973 г. С 2004 г. площадь полигона не изменялась, до 2018 г. он непрерывно «рос» в высоту, после чего полигон был закрыт и частично засыпан грунтом. В районе преобладает сельско- и лесохозяйственная деятельность, в меньшей степени развита промышленность. Отбор проб проводился в 2019 г.

Для оценки изменения морфологического состава отходов в зависимости от времени начала эксплуатации полигона был выполнен расчет средних значений по пробам, отобраным из основания свалочного тела, в процентах по каждой фракции, без учета грунта отсыпки и щебня (рис. 1.1.4).

На полигонах 1980-х гг. и моложе отмечается более высокое содержание (практически в 2 раза) «быстроразлагающихся» фракций, таких как пищевые отходы, бумага и картон, древесина и текстиль. Это, вероятно, связано с двумя факторами. Первый и основной из них заключается в разложении таких отходов во времени с переходом в твердые органические частицы. Второй связан с изменением образа

жизни населения Москвы и Московской области: появляется большее разнообразие в одежде, развивается строительство многоквартирных и частных домов, увеличиваются плотность и численность населения в регионе.

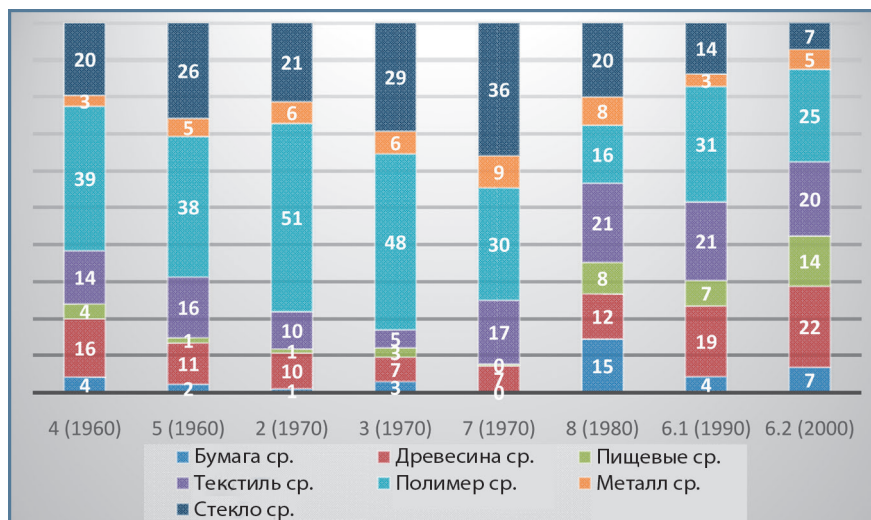


Рис. 1.1.4. Усредненный морфологический состав отходов в основании свалочного тела на полигонах Московской области (цифра в скобках — десятилетие ввода в эксплуатацию полигона)

Для анализа морфологического состава отходов 2010-х гг. был выполнен расчет усредненных значений всех фракций свалочного грунта, отобранного из верхних слоев полигонов. Результаты представлены на рис. 1.1.5 в виде диаграммы для каждого полигона. В целом для всех полигонов наблюдается примерно равное содержание металла, пластика и стекла, которые составляют в среднем половину от общего объема отходов. Количество текстиля также примерно одинаково — от 10 до 20%. Отмечается более высокое содержа-

ние бумаги на полигонах, где пробы были отобраны не позднее, чем через два года после закрытия, а древесины — через три. Пищевые отходы распределены хаотично. Полигоны №1, 6 и 7 отличаются более высоким содержанием стекла, а №2 — повышенным содержанием металла. Такие значения могут быть связаны со спецификой отходов, поступающих на конкретный полигон. Так, например, рядом с полигоном № 7 расположен керамический завод.

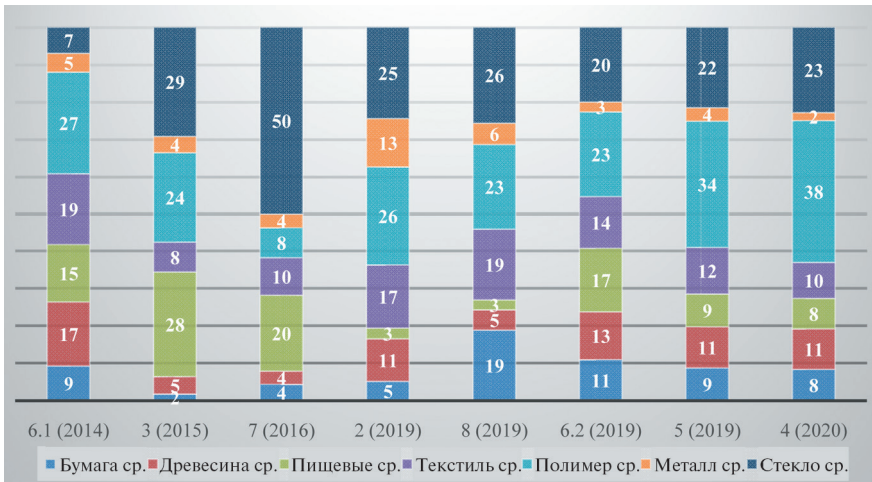


Рис. 1.1.5. Усредненный морфологический состав отходов в верхних частях полигонов Московской области (цифра в скобках — год завершения эксплуатации полигона)

Для определения влияния географического фактора для каждого полигона был выполнен расчет усредненного морфологического состава (рис. 1.1.6). Полигоны, расположенные на севере и востоке области, характеризуются повышенным содержанием полимеров (34–46%), что, вероятно, связано с преобладанием легкой промышленности в этих

районах. Также можно отметить, что полигоны, расположенные на юге области, содержат больше текстиля (16–20%), древесины (до 20%) и бумаги (до 15%), вероятно, из-за большого объема отходов, поступающих из Москвы и крупных городов Подмосковья.

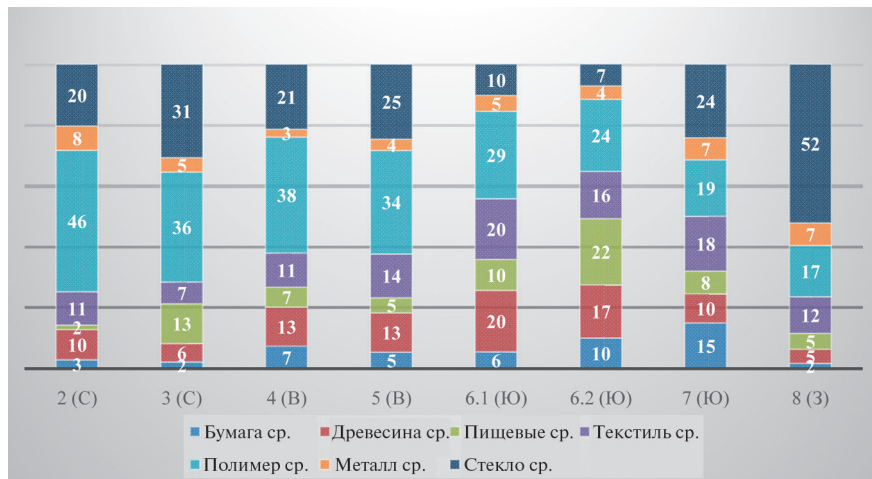


Рис. 1.1.6. Усредненный морфологический состав отходов на полигонах Московской области (буква в скобках — местоположение полигона по сторонам света)

Таким образом, морфологический состав отходов на полигонах Московской области достаточно однороден, так как на них поступали отходы из Москвы и различных районов области, и лишь в отдельных случаях специфика промышленности района и логистическая схема поступления отходов на полигоны влияют на процентное распределение разных категорий отходов в их составе. Содержание «быстроразлагающихся» фракций (бумага, картон, пищевые отходы, древесина, текстиль) закономерно выше на полигонах

моложе 50 лет, а также в верхних слоях свалочных грунтов. Более высокое содержание текстиля также может свидетельствовать о смене образа жизни жителей региона и об увеличении количества и плотности населения. Повышенное содержание древесины может быть связано с развитием строительства многоквартирных и частных жилых домов и постепенным сносом старых деревянных строений. Усредненный морфологический состав полигонов Московской области представлен на рис. 1.1.7.

***Морфологический состав ТКО
на полигонах Московской области***

■ Бумага ср. ■ Древесина ср. ■ Пищевые ср. ■ Текстиль ср.
■ Полимер ср. ■ Металл ср. ■ Стекло ср.

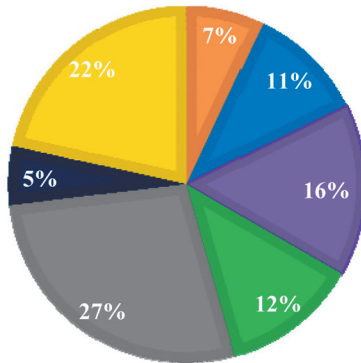


Рис. 1.1.7. Усредненный морфологический состав отходов, поступающих на полигоны Московской области

Если сравнить его с данными анализа отходов, выполненного в рамках программы «Чистая страна» (рис. 1.1.2), то видно, что от момента поступления отходов в мусорные баки и до их складирования на полигоне морфология меняется

значительно: в 3 раза сокращается содержание бумаги за счет частичного размокания и разложения, в 2 раза — пищевых отходов за счет разложения, закономерно выше доля текстиля, древесины, полимеров и стекла (практически в 2 раза), содержание металла остается неизменным.

На всех изучаемых полигонах производился поинтервальный отбор проб, однако наиболее информативными сведениями стали результаты инженерно-экологических изысканий для полигона № 1. В рамках работ через год после вывода его из эксплуатации был проведен поинтервальный отбор проб (с каждого метра) из пяти скважин; всего было отобрано 211 проб. Кроме того, по результатам лабораторных исследований были дополнительно выделены следующие фракции: черный металл, цветной металл, кости, кожа и резина, камни, штукатурка, пластмасса, целлофан, отсев, твердые органические частицы. Наличие пищевых отходов фиксируется до глубины максимум 12 м, бумаги и картона — до 19 м, древесины — до 41 м, текстиля — до 16 м. С уменьшением этих фракций закономерно растет доля твердых органических частиц от 11 до 55%. Среди относительно инертных фракций цветной и черный металл зафиксирован на максимальных глубинах 38 и 39 м соответственно, кости — до 16 м, стекло — до 47 м, кожа и резина — до 18 м, пластмасса — до 45 м, целлофан — до 47 м. С уменьшением данных компонентов закономерно растет фракция отсева с 18 до 45%. Поинтервально, через каждые 5 м были посчитаны значения по всем компонентам (табл. 1.1.3).

Из полученных результатов видно, что «быстроразлагающиеся» фракции переходят в твердые органические частицы до 15 м, и в более нижних слоях свалочного тела сохраняются

в пределах 50–55%. При этом на глубине около 5 м происходит наибольшая переработка пищевых отходов, что фиксируется через резкое снижение содержания самой фракции на 12% и увеличение органических частиц только на 5%. Остальные, относительно инертные фракции, проходят стадию дробления и постепенно переходят в отсев, составляя в среднем 40–45%.

Таблица 1.1.3

Усредненный морфологический состав отходов по глубине на полигоне №1

Интервалы глубин, м	Пищевые	Бумага, картон	Древесина	Черный металл	Цветной металл	Текстиль	Кости	Стекло, керамика	Кожа, резина	Камни, шпатагурка	Пластмасса	Целлофан	Отсев	Твердые органические частицы
0.0-5.0	21	28	3	2	1	2	1	3	2	5	3	2	18	11
5.0-10.0	9	26	2	3	1	3	1	3	1	3	3	2	26	18
10.0-15.0	0	14	3	3	2	1	1	3	1	4	3	1	24	38
15.0-20.0	0	0	2	2	2	0	1	3	0	4	3	1	34	49
20.0-25.0	0	0	2	2	2	0	0	2	0	6	2	1	35	49
25.0-30.0	0	0	1	2	1	0	1	2	0	7	1	0	35	50
30.0-35.0	0	0	2	2	1	0	0	2	0	3	1	1	31	38
35.0-40.0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	3	1	1	30	42
40.0-45.0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	0	0	42	54
45.0-50.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	45	55

Рассмотрение отдельно компонентов отходов и анализ их изменения с глубиной на всех изучаемых полигонах показали следующее: 1) основные фракции, претерпевающие

изменения во времени, это пищевые отходы, бумага, картон, текстиль и древесина; 2) отмечается их закономерное снижение с глубиной.

Наибольшее количество пищевых отходов наблюдается в интервале глубин 0,0–5,0 м, далее отмечается резкий спад (более чем в 1,5–2 раза), и ниже 20 м пищевые отходы практически отсутствуют (рис. 1.1.8). Общий тренд на снижение содержания пищевых отходов прослеживается во всех полигонах кроме 6-го (из-за его молодого возраста) до глубины 10–15 м.



Рис. 1.1.8. Диаграмма содержания пищевых отходов на разных глубинах полигонов Московской области

Снижение содержания бумаги и картона более плавное до интервала глубин 10–15 м, далее резкое снижение, и ниже 20 м этот вид отходов практически отсутствует (рис. 1.1.9). Наличие текстиля и древесины фиксируется даже на боль-

ших глубинах — 30 и 40 м соответственно. Явной тенденции к их снижению не прослеживается, так как текстиль и древесина более инертны, для их разложения необходимы гораздо большие сроки.

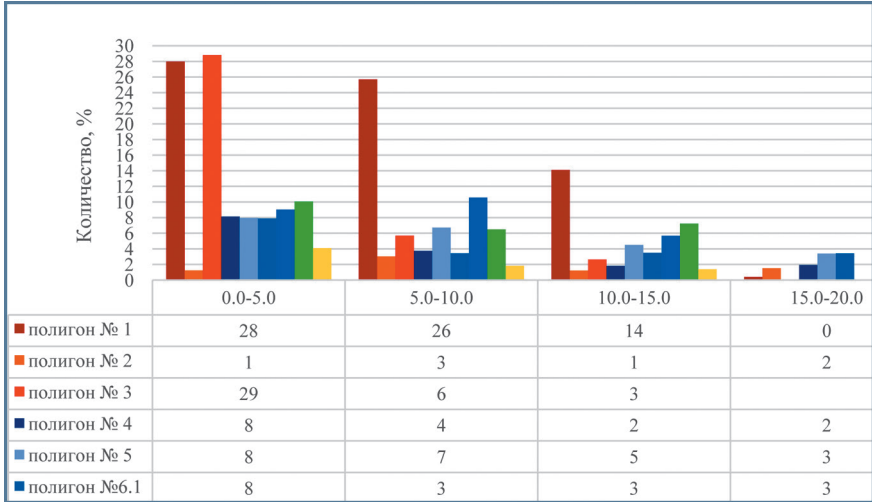


Рис. 1.1.9. Содержание бумаги и картона на разных глубинах полигонов Московской области

Слабо изменяемые фракции полигона — металл, стекло, полимеры. В среднем содержание металла на всех изучаемых полигонах порядка 4%. Отмечается более высокое содержание металлов на глубине 10–30 м, но не превышающее 10%. Количество стекла меняется хаотично по глубине и фиксируется даже на глубинах 45 м. Содержание полимеров в среднем составляет 20–30%, редко — меньше. В верхней части свалочного тела до 5 м отмечается значительное количество слаборазложившихся пищевых отходов; бумага и картон сохраняются до 10–15 м, текстиль присутствует на

глубинах до 30 м, а древесина — до 40 м. Инертные фракции присутствуют практически на всех интервалах глубин свалки до 30 м, а стекло — до 40 м.

Таким образом, проведенный анализ морфологического состава ТКО на полигонах Московской области позволил установить, что половину, а местами и до 60 % свалочных тел на полигонах составляют компоненты органических фракций. При этом содержание подобных фракций закономерно выше на полигонах моложе 50 лет, а также в верхних слоях свалочных тел. Переход органики в твердые частицы происходит в интервале до 15 м, а на глубине около 5 м отмечена наибольшая переработка пищевых отходов. Остальные, относительно инертные фракции проходят стадию дробления и постепенно переходят в отсев, составляя в среднем 40–45%.

Морфологический состав твердых коммунальных отходов на полигонах Московской области достаточно однороден: половину, а местами и до 60%, от него составляют компоненты «быстроразлагающихся» органических фракций, таких как бумага, пищевые отходы, древесина и текстиль, что в целом совпадает с исходным составом отходов, поступающих на полигоны. Однако при анализе отдельных компонентов значения отличаются. Соотношение «инертных» фракций (полимеры, стекло и металл) зависит от структуры промышленности конкретного района и логистической схемы поступления отходов на полигон, при этом стоит отметить, что содержание металла на всех полигонах составляет 4–7% из-за достаточно развитой системы переработки металлов как вторсырья.

Важным фактором, влияющим на морфологический состав отходов, является возраст свалочного тела. Так, содер-

жание «быстроразлагающихся» фракций (бумага, картон, пищевые отходы, древесина, текстиль) закономерно выше на полигонах моложе 50 лет, а также в верхних слоях свалочного тела.

Кроме того, характерной особенностью полигонов Московской области является более высокое содержание текстиля и древесины на «молодых» полигонах и в верхних слоях, которое может свидетельствовать о смене образа жизни жителей региона, об увеличении количества и плотности населения, строительстве многоквартирных и частных жилых домов, постепенном сносе старых деревянных строений.

Если оценивать свалочное тело как геологическое тело, то можно выделить следующие характерные особенности:

- высокое содержание пищевых отходов низкой степени разложения фиксируется на глубинах до 5 м, происходит резкое уменьшение их массы (практически в 2 раза) до глубины 10 м и закономерный переход их в твердые органические частицы;
- бумага и картон присутствует до 15 м и резкий спад происходит в интервалах глубин 15–20 м;
- наличие текстиля и древесины отмечается на больших глубинах — 30 и 40 м соответственно, при этом явной тенденции к снижению не прослеживается.

Таким образом, свалочные тела полигонов Московской области представляют собой сложные геологические тела с выраженной слоистостью, взаимосвязанной со скоростью перехода «быстроразлагающихся» отходов в твердые органические частицы, состав которых зависит от ряда экономических и социальных показателей региона, от сроков ввода и времени эксплуатации полигонов.

Глава 1.2. Основные методы обращения с отходами

(Ю.А. Мамаев)

При обращении с отходами производства и потребления применяется большой комплекс методов и технологий сбора, обработки, обезвреживания, утилизации и ликвидации отходов, которые могут быть объединены в следующие группы: механические, биологические, термические и размещение (захоронение) отходов. В отдельных случаях применяются комплексные методы, например, механико-биологические. Некоторые из методов и технологий можно отнести к природоподобным, а именно: компостирование, биогазификация, химико-биологическое разложение ТКО в свалках, биологическое обезвреживание нефтяного загрязнения отходов и др.

К механическим методам обращения с отходами относятся: раздельный сбор отходов, транспортировка, сортировка, обработка, утилизация. Последняя может включать рециклинг — повторное использование отходов по прямому назначению и рекуперацию — извлечение полезных компонентов отходов для их повторного применения.

К методам биологического обезвреживания отходов относятся: компостирование, искусственная активизация биохимических процессов в свалочных телах, биогазификация, обезвреживание отходов от нефтяного загрязнения.

Группа методов температурного обезвреживания и ликвидации (сжигания) отходов включает: энергетическую утилизацию отходов с получением электрической и тепловой энергии; низкотемпературное (до 300—400 °С) и высокотемпературное (до 700—800 °С) сжигание отходов с доступом

кислорода; пиролиз — сжигание с ограниченным доступом кислорода. Процессы выполняются преимущественно на газовых установках с разной конструкцией рабочих камер и производительностью.

Методы размещения отходов включают кратковременное складирование отходов на селитебных или производственных территориях, а также долговременное захоронение отходов в мусорных свалках, на полигонах, в отвалах, отстойниках. При этом используются строительные механизмы для перемещения отходов, их отсыпки и уплотнения. Реже применяются методы буртования и брикетирования.

С позиций обеспечения экологической безопасности процессов широко применяются методы биологического обезвреживания отходов и захоронение отходов в мусорных свалках, где существенную роль в их обезвреживании играют физико-химические процессы разложения, деградации органического вещества, гумификации, образования фильтрата и биогаза. Реже применяются технологии термического обезвреживания и ликвидации отходов, что обусловлено высокой энергозатратностью данных процессов и высокой стоимостью организации производства.

1.2.1. Методы биологического обезвреживания отходов

Компостирование. Технология активного и пассивного компостирования применяется для получения полезного продукта (компоста) промышленным методом аэробного биотермического компостирования органических отходов под полупроницаемой мембраной (рис.1.2.1). В технологии используются: твердые коммунальные отходы, содержащие

органическую составляющую, отходы растениеводства, животноводства, рыболовства, производства пищевой продукции и др. Компост изготавливается из смеси отходов III–V класса опасности, технологически обработанных методом сортировки и дробления. Получаемые в результате компостирования продукты — удобрения, почвогрунты и питательные смеси — используются в сельском и коммунальном хозяйствах, на приусадебных участках для планировки территорий, рекультивации почв, повышения их плодородия.



Рис. 1.2.1. Технология мембранного компостирования отсева ТКО после сортировки
(Источник: URL: <https://ntc-tbo.ru/catalog/kompost/>)

При компостировании органических отходов происходит биотермическое разложение органического вещества в результате жизнедеятельности сапрофитных аэробных микроорганизмов, способных выделять при биохимических реакциях обмена веществ определенное количество тепла.

Требующаяся для проведения биотермического процесса микрофлора имеется в необходимых количествах в органических отходах. Активность микроорганизмов обеспечивается следующими приемами: увеличением удельной поверхности перерабатываемого материала за счет его измельчения; перемешиванием материала; поддержанием влажности массы не ниже 45 и не выше 60%; теплоизоляцией, способствующей сохранению выделяющегося тепла и подъему температуры компостируемого материала. Технология компостирования реализуется в буртах из сепарированных органических отходов высотой 1,5–2 м и шириной 2,5–3,5 м.

По способу аэрации буртов компостирование проводится двумя методами:

(1) пассивным, при котором аэрация осуществляется на открытом воздухе специальным расположением горизонтальных буртов относительно розы ветров;

(2) активным, с использованием полупроницаемых мембран и принудительной аэрацией самоходным ворошителем буртов. Это позволяет создать оптимальные условия жизнедеятельности микроорганизмов с изоляцией процесса от окружающей среды. Полупроницаемая мембрана полностью защищает компостируемую массу от внешних атмосферных воздействий, предотвращает выделение в атмосферу органических соединений, являющихся источником неприятного запаха, самих микроорганизмов и их спор. При этом полупроницаемая мембрана пропускает образующиеся в процессе жизнедеятельности водяные пары и углекислый газ. Важными этапами технологического процесса являются: сепарация отходов; формирование смеси для компостирования с микробиологическим ферментированием; обеззараживание и детоксикация отходов.

Биовентинг. Технология получения продукции из нефте-содержащих донных отложений очистных сооружений методом биоремедиации является сравнительно новой и перспективной. Она позволяет получать полезный продукт — технический грунт для планировочных и земляных работ. Технология включает три технологические линии: (1) линия биоремедиации нефтесодержащих донных отложений водных объектов для получения технического грунта и грунтомодификатора, обогащенного микроорганизмами-нефтедеструкторами; (2) линия обезвоживания донных осадков с получением нефтяного концентрата и обезвоженных отложений для 1-й линии; (3) линия биовентинга донных осадков для получения грунтомодификатора, обогащенного микроорганизмами. Срок завершения работ по данной технологии составляет 40–60 дней в теплый вегетационный период года. Инженерное обеспечение объекта включает сети и системы электроснабжения, водоснабжения и водоотведения, дренажа, отопления и вентиляции, автоматизации технологических процессов и др.

Для реализации данных технологий в промышленном масштабе требуется отчуждение значительных (первые га) площадей земель для размещения объектов, использование строительных механизмов и техники, применение биологических добавок и химических катализаторов для активизации процессов разложения отходов. Длительность процесса получения готовой продукции изменяется от 1,5 до 6 месяцев.

Химическое и биологическое воздействие данной технологии на геологическую среду может возникать за счет осаждения на почве раздуваемых газообразных компонентов, микроорганизмов и бактерий с поверхности открытых буртов, чеков, водных объектов с последующим распростране-

нием (проникновением) в грунтовые толщи прилегающих территорий. Кроме того, химическое и биологическое загрязнение обуславливаются внесением химических удобрений и реагентов, а также биопрепаратов в грунтовые толщи на технологических линиях биоремедиации и биовентига. При соблюдении технологических норм и правил, уровень воздействия на геологическую среду оценивается как локальный, длительный и умеренный. После окончания работ предусматриваются мероприятия по рекультивации земель.

1.2.2. Технологии термического обезвреживания и ликвидации отходов

Комплексы термического обезвреживания отходов. Данные технологические установки представляют собой специализированные промышленные изделия с автоматизированными технологиями сжигания отходов, предназначенные для экологически безопасного термического обезвреживания производственных и хозяйственно-бытовых твердых и жидких отходов. Подлежат обезвреживанию жидкие и твердые отходы III–V класса опасности по классификации Федерального классификационного каталога отходов (ФККО): твердые коммунальные отходы, отходы сельскохозяйственного производства, древесины, бумаги, полиграфии, химических веществ, резиновых и пластмассовых изделий, пищевой продукции и другие отходы. Применяются следующие технологические установки:

1. Комплекс термического обезвреживания на основе циклонных печей (реакторов) производительностью от 30 до 2000 т/сут., состоящий из одного или нескольких (до 12) блоков термического обезвреживания.

2. Комплекс термического обезвреживания на основе вращающихся барабанных печей производительностью от 7 до 120 т/сут.

3. Комплекс термического обезвреживания на основе подовых печей (инсинераторов) производительностью от 0,2 до 12 т/сут.

Режим работы производств — непрерывный 24 часа в сутки и 345 дней в году.

Термодеструкционные установки. Данные установки предназначены для термического обезвреживания и утилизации твердых коммунальных (бытовых) и промышленных, в том числе нефтесодержащих, отходов. Установки представляют собой сборные конструкции, состоящие из следующих основных частей:

- блок загрузки с бункером и транспортером;
- камера сжигания с механизмом вращения и горелкой;
- камера дожига газов;
- модуль принудительной продувки камеры сжигания;
- блок отвода отходящих газов;
- блок управления;
- система сухой очистки (циклон);
- система мокрой очистки (скруббер).

К обезвреживанию и утилизации допускаются отходы III—V класса опасности. Отходы, поступающие на обезвреживание и утилизацию в данных установках, должны включать: твердую фазу отходов — не менее 50%; максимальный размер твердых включений — не более 600 мм; содержание воды в сырье — не более 15%; содержание нефтепродуктов в сырье — не более 6%. Габаритные древесные отходы перед

сжиганием измельчаются. В процессе обезвреживания отходов на термодеструкционных установках образуются зольный остаток, золы уноса, шлам из скруббера. Зольный остаток подвергается биотестированию для отнесения его к отходам IV–V класса опасности и далее вывозится на полигон ТКО. Количество выбрасываемых в атмосферу веществ зависит от длительности технологического процесса, количества оборудования, характеристик сырья, топлива и других условий, и может составлять от первых т/год до десятков тыс. т/год. Расчеты рассеивания и концентрации веществ, поступающих в атмосферный воздух, не превышают ПДК населенных мест. Санитарно-защитная зона для данных мусоросжигательных объектов в зависимости от мощности должна составлять при объемах переработки отходов до 40 тыс. т/год – 500 м, свыше 40 тыс. т/год – 1000 м. Дополнительный отвод земель под данные производства не предусматривается.

В финансовом отношении методы термического обезвреживания и ликвидации отходов являются наиболее технологически сложными, дорогими и энергозатратными. Это обусловлено необходимостью проектирования и строительства специальных объектов с жесткими конструкциями полов, стеновых ограждений и перекрытий; применения сложного и пожароопасного оборудования; подведения и круглогодичного использования инженерных сетей и систем электро-, газо-, тепло- и водоснабжения.

Воздействие на геологическую среду участков размещения названных выше установок возможно за счет осаждения на почве выбрасываемых в атмосферу газообразных компонентов. Уровень воздействия – умеренный.

Установки пиролиза. Обезвреживанию на гибридных установках пиролиза (сжигание с ограниченным поступлением кислорода) подлежат практически все производственные и твердые коммунальные (бытовые) отходы III–V класса опасности. Для работы установки необходима подача оборотной воды со скоростью до 120–140 л/мин.

Продолжительность технологического процесса обработки одной закладки отходов составляет 8–11 ч. Температура нагрева отходов – 300–450 °С.

Для обеспечения загрузки/выгрузки реторт требуется грузоподъемный механизм (монорельс, кран-балка или консольный кран) грузоподъемностью 2 т и высотой подъема 7 м. Установки монтируются на прочном гидроизолированном основании с водоотведением и очисткой технологических вод (рис. 1.2.2).



Рис. 1.2.2. Установка низкотемпературного пиролиза ТКО
(Источник: URL: <http://pyrolysisplant.ru/main-ru/news/>)

1.2.3. Размещение (захоронение) отходов на мусорных полигонах

Современные правила организации и технологии захоронения отходов на полигонах являются залогом обеспечения их безопасной эксплуатации. Любое свалочное тело включает совокупность процессов биологического, химического или физического преобразования отходов с целью приведения их к состоянию, когда они не представляют угрозы для жизни и здоровья людей или окружающей среды. При планировании и проектировании мусорных полигонов в обязательном порядке должны учитываться условия встраивания данных объектов в геологическую среду. В настоящее время размещение отходов на мусорных полигонах и свалках является наиболее широко распространенным способом обращения с отходами.

С экономической точки зрения строительство и эксплуатация мусорных полигонов для захоронения ТКО являются наименее затратными по сравнению с другими технологиями обезвреживания и ликвидации отходов. Объекты эксплуатируются десятки лет с небольшими финансовыми вложениями на строительство дорог и реконструкцию с целью наращивания объемов принимаемых отходов и продления сроков работы. При этом, как правило, не требуются проведение больших строительных работ, прокладка инженерных коммуникаций, подключение к действующим сетям энергоснабжения.

В экологическом отношении данный метод обращения с отходами является наиболее неблагоприятным, так как многолетняя эксплуатация данных объектов приводит к устойчивому загрязнению всех компонентов природной среды

(атмосферный воздух, почвы, грунты, растительность, поверхностные и подземные воды) и значительно снижает качество условий проживания населения.

На современном этапе развития мусорной индустрии для строительства полигонов необходимо научное обоснование выбора мест размещения объектов, что связано с постоянно увеличивающимися площадями отчуждения земель населенных пунктов, сельскохозяйственного назначения и лесного фонда. В связи с этим большое значение имеет разработка новых концепций и совершенствование методов и технологий обезвреживания и ликвидации отходов, в частности, концепция «безопасных полигонов ТКО».

Широкое внедрение и совершенствование нормативов проектирования и эксплуатации полигонов размещения ТКО, а также позитивные примеры их практического применения положены в основу разработки новой концепции строительства «безопасных полигонов ТКО», которая подробно изложена в главах 2.5–2.8.

Глава 1.3. Зарубежный опыт обращения с ТКО

(В.Г. Заиканов, И.Н. Заиканова)

Самая первая из известных науке свалок датируется 3000 лет до нашей эры. Она была расположена на острове Крит, недалеко от столицы древнего критского государства – г. Кносс. Мусор сбрасывался в большие ямы, которые потом на разных уровнях засыпали землей. Известно также, что городские власти Греции начали заниматься вопросами захоронения отходов почти 2500 лет назад: чиновники античных Афин предписали гражданам вывозить мусор не ближе чем за 1,5 км от городских ворот. Спустя несколько тысяч лет человечество так и не смогло найти рецептов избавления от отходов своей жизнедеятельности. Более того, чем более цивилизованной становилась страна, тем больше ресурсов она потребляла и тем больше отходов производила (Европейская практика обращения..., 2005).

В настоящее время решение проблем утилизации отходов в мировом масштабе является частью постоянно модернизирующегося проекта устойчивого развития. Система решений ООН по устойчивому развитию (Sustainable Development Solutions Network – SDSN), так называемая Глобальная инициатива ООН, мобилизует глобальный научно-технический опыт для содействия практическому решению этой проблемы². SDSN вовлекает академическое сообщество для перевода его наработок устойчивого развития в практическое русло. Для этого предусматривается построение глобальной

² URL: <http://unsdsn.org/>

сети университетов, исследовательских центров и других институтов, ориентированных следующим образом:

- предоставление и мобилизация поддержки SDSN;
- продвижение практических решений Инициативы и долгосрочных путей устойчивого развития;
- содействие качественному сотрудничеству в области образования и исследований для устойчивого развития;
- поддержка правительств в понимании и решении проблемы устойчивого развития. Сеть SDSN, охватывающая шесть континентов, опирается на знания и образовательный потенциал более 650 учреждений-членов.

В сентябре 2015 г. 193 страны — члены ООН приняли и единогласно поддержали 17 целей в области устойчивого развития SDSN ради установления амбициозных задач и для того, чтобы до 2030 г. положить конец крайней нищете, содействовать экономическому процветанию, расширению социальной интеграции, обеспечить экологическую устойчивость на основе мира, справедливости и сильных институтов.

Достижение SDSN потребует глубоких преобразований, включая такие показатели, как, например, сдвиг к низкоуглеродной энергетике; повсеместная и надежная информационная связь; обустройство здоровых и устойчивых городов, что подразумевает в качестве одного из главнейших индикаторов оптимизацию хранения и утилизации городских твердых коммунальных отходов (ТКО)³.

³ URL: <http://unsdsn.org/>

1.3.1. Общие направления стратегии и тактики стран ЕС в разработке концепции управления ТКО

В странах ЕС режим управления отходами предполагает наличие интегрированной системы различных направлений деятельности: социальных, экономических, нормативно-правовых, управленческих, технических. Для поэтапного внедрения концепции управления отходами законодательные акты стран ЕС, с одной стороны, устанавливают требования к различным аспектам обращения с отходами с учетом целевых показателей развития (целевой показатель степени извлечения вторичного сырья и переработки, количества компостных фракций, направляемых на захоронение), с другой стороны, создают условия для их достижения. Юридическая и физическая ответственность за каждую задачу управления отходами делегируется на различных уровнях власти (федеральном, субъекта федерации, муниципальном). Политика управления отходами в странах ЕС была разработана более 30 лет назад с целью гармонизации сферы обращения с отходами.

За последние два десятилетия европейские страны все больше смещают свое внимание в отношении муниципальных отходов с методов утилизации на их предотвращение и переработку. Перемещение управления муниципальными отходами вверх по «иерархии отходов» необходимо для извлечения большей ценности из ресурсов при одновременном снижении нагрузки на окружающую среду и создании рабочих мест.

Хотя муниципальные отходы составляют лишь около 10% от общего объема отходов, образующихся в ЕС (Ustawa z dnia...2012), они очень заметны, и элиминация таких отхо-

дов может снизить их воздействие на окружающую среду не только на этапах потребления, но также на протяжении всего жизненного цикла потребляемых продуктов. Страны, которые разработали эффективные муниципальные системы управления отходами, в целом работают лучше в управлении всеми видами отходов на государственном уровне.

Политика и цели в отношении отходов, установленные на уровне ЕС, включают минимальные требования к управлению определенными типами отходов. Наиболее важными целевыми показателями для муниципальных отходов являются показатели, принятые в соответствии с «Директивой о свалках для биоразлагаемых муниципальных отходов»⁴, Директивой об утилизации упаковки и отходов»⁵ и целью «Рамочной директивы об отходах по переработке и подготовке к повторному использованию»⁶ (точнее, цель применяется к конкретным типам бытовых и сопровождающих их отходов) [Municipal waste management across European countries; Waste-Environment-Europe-Commission]. Страны могут выбирать между предложенными различными методами для мониторинга прогресса в достижении поставленной цели. Согласно принятым методам, расчет коэффициентов рециркуляции осуществляется по наиболее строгому подходу, т.е. коэффициент рециркуляции определяется как масса утилизируемых муниципальных отходов, деленная на произведенные муниципальные отходы.

Страны ЕС применяют различные инструменты политики для отвода отходов со свалок и продвижения в направлении их дальнейшей переработки:

⁴ EU Directive on the Landfill of Waste | Environmental XPRIT.

⁵ Packaging and packaging waste directive 94/62/EC.

⁶ Directive 2008/98/EC on waste (Waste Framework Directive).

1. Страны, использующие многие из инструментов, перечисленных в указанных выше директивах, имеют более высокий уровень утилизации муниципальных отходов, чем страны, использующие мало или вообще не имеющие таких инструментов. Однако способ объединения инструментов политики может быть более актуальным, чем общее количество инструментов.

2. В большинстве стран было разработано более двух национальных планов обращения с отходами, однако показатели их переработки значительно различаются. Нет систематической разницы в эффективности между странами с национальными планами и странами только с региональными планами.

3. Многие страны используют схемы «плати за выброс» (т.е. сборы, основанные на весе или объеме отходов, в качестве экономического стимула для домашних хозяйств перерабатывать свои отходы). Уровень их реализации значительно варьирует в зависимости от страны и внутри стран. Тем не менее во всех странах с показателями рециркуляции выше 45% используются аналогичные системы, в то время как в большинстве стран с уровнем рециркуляции ниже 20% они отсутствуют, это указывает на тот факт, что схемы с оплатой по факту выбрасывания являются эффективным инструментом, стимулирующим рециркуляцию.

4. Все страны, в которых показатели захоронения отходов значительно ниже среднего показателя по ЕС, составляющего 28%, либо запретили захоронение биоразлагаемых или смешанных муниципальных отходов, либо ввели запрет в сочетании с налогом на захоронение.

Перспективы достижения цели по утилизации муниципальных отходов до 50% к 2020 г. для разных стран неодно-

значны. Этот показатель уже принят шестью странами ЕС в соответствии с наиболее строгими правилами. Однако нескольким странам придется активизировать свои усилия для достижения этой цели, особенно в пяти странах в настоящее время перерабатывается менее одной пятой образующихся муниципальных отходов.

Опыт систематизации данных по отходам показывает необходимость усовершенствования и согласования методологий представления национальной отчетности, поскольку неопределенности, связанные с сопоставимостью национальных данных, являются препятствием для обобщенной оценки прогресса и эффективности мер политики. Призвано помочь в этом отношении законодательное предложение о внесении поправок в Рамочную директиву по отходам⁷, которое также включает обзор целевых показателей для бытовых и упаковочных отходов и пересмотр определений и методов.

Иерархия управления отходами отдает приоритет предотвращению отходов, за которым следуют подготовка к повторному использованию, рециркуляция, извлечение полезных компонентов и, наконец, захоронение как наименее желательный вариант.

В 2015 г. Европейская комиссия предложила новые цели по управлению муниципальными отходами, предусматривающие переработку и подготовку к повторному использованию 60% ТКО к 2025 г. и 65% — к 2030 г. Они основаны только на одном методе расчета — примерно таком, который использовался в указанном выше расчете коэффици-

⁷ URL: https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/waste-framework-directive_en

ентов рециркуляции, с возможностью выбора времени осуществления этого предписания. Были приняты также отступления для некоторых стран с учетом их экономических проблем. Кроме того, были предложены новые показатели по сокращению муниципальных отходов, утилизируемых на свалке, и пересмотрены нормативы для отходов упаковки. Количество ТКО на человека в странах ЕС представлено на рис. 1.3.1.

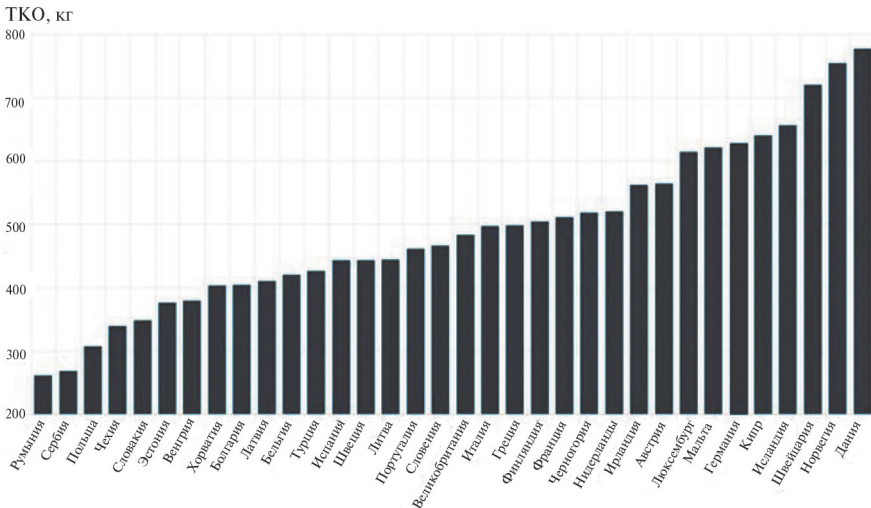


Рис. 1.3.1. Количество ТКО на человека в год (кг) в странах Европы
(Источник: Municipal waste management)

Общая выработка муниципальных отходов в странах Европейской экономической зоны (ЕЭЗ) сократилась на 3% в абсолютном выражении, а средняя выработка на человека — на 7% в период 2004–2014 гг. В 2014 г. образование муниципальных отходов на человека было самым высоким в Дании и Швейцарии и самым низким в Румынии, Польше

и Сербии. Это отражает тот факт, что более богатые страны, как правило, производят больше муниципальных отходов на человека, в то же время туризм способствует высокому уровню выработки отходов на Кипре и Мальте.

Одной из особенностей успеха экологической политики в Европе является увеличение скорости утилизации муниципальных отходов (включая переработку материалов и компостирование биологических отходов).

В Европе четверть образуемых отходов утилизируется в печах. Тепло используется для обогрева здания мусороперерабатывающего завода или на производственные нужды (сушку, очистку поступающих отходов). Основные термические методы вторичной переработки: слоевое сжигание неподготовленных отходов в специальных установках; использование гранулированного топлива, получаемого из горючего мусора; применение пиролизного газа для водогрейных установок; температурный пиролиз (разложение углеводородов на газообразные, жидкие и твердые компоненты в вакууме или под давлением). Сжигают древесные, бумажные отходы, которые нельзя использовать как вторсырье.

В результате биологического разложения растительных остатков, отходов сельскохозяйственного производства (растениеводства, животноводства), ветхой бумаги, картона, текстиля из натуральных материалов (хлопка, бамбука) получают ценное удобрение. Вторичное использование биомусора не предусматривает больших затрат. При компостировании разложение происходит за счет внутренней энергии молекул, процесс осуществляется с выделением тепла.

Относительным новшеством является плазменная обработка отходов — это современная технология утилизации то-

го, что нельзя использовать как вторсырье. Отходы без предварительной подготовки помещают в плазматрон. Плазма, создаваемая постоянным электрическим током, нагревается свыше 1000°C. Бесформенная гора утиля превращается в стекловидный комок (вторичная переработка мусора).

В свою очередь Европейская торговая ассоциация переработки отходов в энергию ESWET представила доклад «Энергия из отходов 2050: чистые технологии для устойчивого развития отрасли», в котором прописаны стратегические задачи, стоящие перед сектором на ближайшие три десятилетия. Там сказано, что заводы по термической переработке должны быть максимально интегрированы в городскую среду и в конечном счете взять на себя утилизацию всех отходов, не подлежащих вторичному использованию⁸.

Повышение уровня утилизации и снижение уровня захоронения отходов четко связаны между собой. Как правило, захоронение отходов происходит гораздо быстрее, чем рост утилизации, поскольку стратегии управления отходами в основном переходят от захоронения к комбинации утилизации и сжигания, а в некоторых случаях — и к механико-биологической обработке.

Уровень захоронения бытовых отходов в 27 странах — членах ЕС снизился в целом, хотя показатели отдельных государств были разными. В Австрии, Бельгии, Дании, Германии, Нидерландах, Норвегии, Швеции и Швейцарии практически никакие муниципальные отходы не отправляются на свалку. С другой стороны, Кипр, Хорватия, Греция, Латвия, Мальта и Турция по-прежнему размещают на свалках

⁸ W2e.ru>Блог>energiya-iz-otkhodov

более 75% своих муниципальных отходов. Наибольшее снижение произошло в Эстонии (57%), Финляндии (40%), Словении (41%) и Великобритании (43%).

1.3.2. Организационные меры решения проблемы управления отходами в некоторых странах Западной Европы

Принятые в Германии подходы к отчетности по отходам признаются «направленными», т.е. ориентированными на достижение конкретных целей. Одним из них является показатель 2030WachIndikator⁹ – количество твердых коммунальных отходов, приходящихся на человека. Новый индикатор 2030Wach был предложен для того, чтобы растущая проблема отходов не терялась из виду (Deutsche Gesellschaft für...).

Так, согласно 2030Wach индикатору в настоящее время в Германии на человека приходится 627 кг ТКО, а к 2030 г. должно быть не более 100 кг, т.е. 19% от нынешнего уровня. Это значение было сформулировано немецкими экологическими организациями в качестве цели на 2030 год. Надо отметить, что с 2016 г. эта величина уже сократилась, так как тогда на человека приходилось 725 кг отходов.

Программа 2030Wach и ее индикаторы в Германии воспринимаются как немецкая стратегия устойчивости, а роль индикаторов состоит в том, что они выявляют нераскрытые темы государственной политики, правильные цели и определяют лучшую внутреннюю политику. Одной из таких важнейших сфер индикаторов эффективности работы Службы охраны окружающей среды правительства Германии является рациональное использование ресурсов и отходов. Согласно

⁹ URL: <https://github.com/okfde/2030-watch.de/blob/gh-pages/README.md>

принципам устойчивого развития, начиная с 2012 г. высшим приоритетом немецкого правительства является сокращение отходов. Наиболее оптимальным вариантом признана программа использования отходов, получившая название «вторичная стратегия». До сих пор Германия относилась к странам с высоким показателем объема образующихся отходов на человека. На этом фоне снижение количества бытовых отходов становится чувствительным индикатором устойчивой внутренней политики.

При этом в понятие «отходы» входят коммунальные, производственные отходы, а также отходы офисов, независимо от того, были ли они сожжены, или как-то иначе уничтожены или, наоборот, переработаны или утилизированы на полигонах. В эту категорию не входят отходы сельского хозяйства и промышленности [Municipal waste management].

К категории муниципальных отходов относятся отходы частных домовладений и аналогичных учреждений, а также бытовые и аналогичные отходы торговли и промышленности, например, отходы кабинетов врачей и адвокатов, административных зданий, школ, детских садов, больниц и домов престарелых. Кроме того, муниципальные отходы также включают крупногабаритные отходы, отходы рынков, мусор уличных уборочных машин, биоотходы и отдельно собираемые ценные материалы, такие как стекло и бумага. Фекалии и осадок сточных вод также причислены к муниципальным отходам.

Для сравнения, в Российской Федерации к типу коммунальных отходов относятся отходы, образующиеся в жилых помещениях в процессе потребления физическими лицами, а также товары, утратившие свои потребительские свойства в процессе их использования физическими лицами в жилых

помещениях в целях удовлетворения личных и бытовых нужд (Система управления отходами в странах ЕС). При этом объем ТКО в нашей стране ежегодно увеличивается: в настоящее время этот показатель составляет уже около 500–800 кг в год на каждого жителя больших городов (Мочалова и др., 2017). Из приведенных данных видно, что показатели стран ЕС и показатели РФ как по систематизации отходов, так и по их количеству на душу населения не сравнимы.

В Германии экологически безопасную утилизацию отходов обеспечивают муниципалитет или его структуры. Отходы, которые могут быть подвергнуты переработке, должны быть переработаны в максимально возможной степени (например, путем производства компоста из биологических отходов, стекла или бумаги) или использованы для рекуперации энергии. Не подлежащие переработке остаточные отходы направляются на механико-биологическую обработку или сжигание отходов. Только остатки от этой обработки и уже инертные отходы размещаются на свалках. Надо отметить, что менее всего в указанных выше нормативных актах, касающихся коммунальных отходов стран ЕС, принимается во внимание вопрос геоэкологической безопасности.

Разделение свалок по типам отходов позволяет при проектировании применять разные способы нейтрализации их вредного воздействия на окружающую среду и, что особенно важно, на подземные воды, как это представлено на рис. 1.3.3.

Необходимость строгой классификации свалок вытекает из того, что, как указано выше, при захоронении разных видов отходов производится разное количество и различный состав фильтрата и свалочного газа.



Рис. 1.3.2. Классы свалок, ФРГ

(Источник: URL: <https://rp-darmstadt.hessen.de/umwelt-und-energie/abfall/deponien/deponieklassen>)

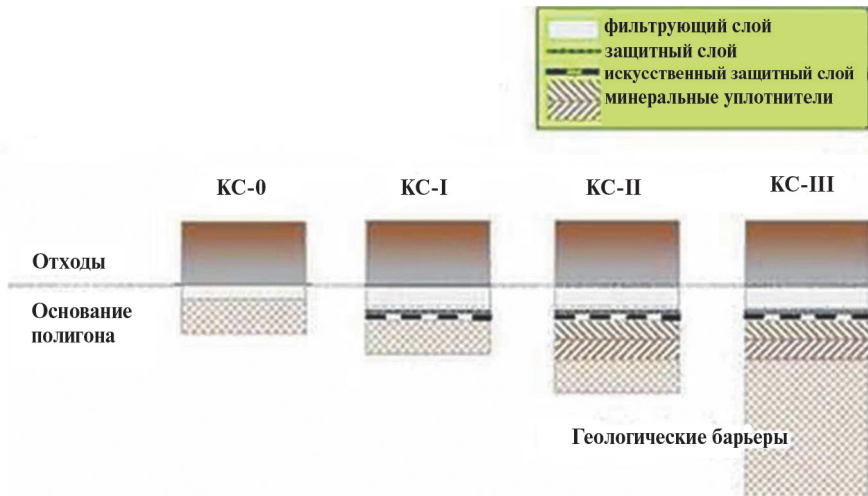


Рис. 1.3.3. Системы барьеров для защиты оснований разных классов свалок

(Источник: URL: https://www.lfu.bayern.de/abfall/gefaehrliche_nichtgefaehrliche_abfaelle/oberflaechenabdichtung_rekultivierung/index.htm)

Надо отметить, что современные свалки в РФ вмещают не только те отходы, которые упоминаются в нормативных документах в качестве ТКО. Чаще всего из-за отсутствия раздельного сбора отходов, их контроля на самих свалках, а также на производящих отходы предприятиях они включают строительный мусор, отходы производства и др. Неоднократно отмечались случаи попадания на свалки ТКО даже опасных отходов.

Опыт многих государств показывает, что специализация свалок не только упрощает организацию и контроль самих свалок, но и позволяет разрабатывать методы их рекультивации, охраны окружающей среды и т.д. В качестве примера можно привести классификацию свалок, разработанную в Германии, аналогичную применяемым во всех странах Запада:

КС-0 – свалка для земляных, реже строительных отходов или подобных им минеральных промышленных отходов. Содержания загрязняющих веществ в отходах и фильтрате должны быть незначительными и не должны ставить под угрозу качество подземных вод. Создается геологический барьер, иногда дополненный или улучшенный техническими мерами, и минеральный дренажный слой в основании полигона. После завершения ее действия поверхность свалки покрывается мелиоративным слоем. Никаких других особых требований к техническим системам безопасности не предъявляется.

КС-I – свалка для грунта и строительных отходов с умеренной нагрузкой и промышленных отходов минерального происхождения. Для ее создания необходимы определенный геологический барьер, улучшенный техническими мерами, система уплотнения основания и поверхности, а также

регулируемый дренаж (сбор и отвод фильтрата и поверхностных вод).

КС-II — полигон для захоронения предварительно обработанных бытовых отходов и аналогичных промышленных отходов минерального происхождения. Необходимы определенный геологический барьер, созданный или улучшенный при необходимости техническими мерами, система уплотнения основания и поверхности, а также регулируемый дренаж (сбор и отвод фильтрата и поверхностных вод). Уплотнения в основании и на поверхности полигона должны состоять из двух компонентов. На полигоне второй компонент гидроизоляции должен представлять собой конвекционный барьер (пластиковое уплотнительное полотно или асфальтовое уплотнение). Обычно требуется регулировка количества свалочных газов.

КС-III — свалка для захоронения опасных отходов. Для ее устройства требуется геологический барьер, при необходимости усовершенствованный техническими мерами, система уплотнения основания и поверхности, система контроля уплотнения поверхности полигона и регулируемый дренаж, обеспечивающий улавливание и отвод фильтрата и атмосферных осадков. Уплотнения в основании и на поверхности полигона должны состоять из двух уплотняющих компонентов. На полигоне второй компонент гидроизоляции должен представлять пластиковое уплотнительное полотно или асфальтовое уплотнение. Необходима модификация свалочных газов.

Что касается транспортировки, хранения и утилизации коммунальных отходов в ЕС, то уникальным примером этому, в частности, может служить современное управление отходами в стокгольмском районе Хаммарбю Сьёстад

(Hammarby Sjöstad). Пример этого района еще раз демонстрирует: не нужно больше контейнеров, вместо этого есть разные виды колонн для вбрасывания отсортированных жителями остатков разного вида коммунальных отходов и бумаги. Пользователи входят в колонну для органических отходов с помощью чековой карты, чтобы избежать поступления в нее посторонних веществ. Опыт Швеции показал, что существует потребность в социальном контроле, т.е. люди должны правильно сортировать вещи, и это то, что они делают лучше всего, когда их действия контролируются. Вот почему колонны для сбора коммунальных отходов всегда расположены в этом районе Стокгольма в самых доступных местах: во дворах или на лестницах. Как только труба под колонной наполняется, открывается клапан и отходы всасываются, как большим пылесосом, через подземную систему труб со скоростью 70 км/ч. В нескольких центральных пунктах подземного сбора мусора отходы всего района собираются и удаляются только тогда, когда это необходимо. Более 3000 домохозяйств подключены к этой системе. Большим преимуществом является то, что отходы больше не нужно перевозить автомобильным транспортом и хранить вдали от домов, в открытых хранилищах — все находится под землей.

Управление сточными водами также является образцовым на предприятии, расположенном недалеко от Хаммарбю Сьёстад. Сточные воды района, насчитывающего 900 тыс. человек, в Стокгольме рециркулируются. Отработанное тепло используется для отопления и, наоборот, холодная вода для охлаждения на складах супермаркетов. Оставшийся осадок сточных вод также используется и сбрасывается вместе с органическими отходами в биогаз и становится экологичным.

гически чистым топливом, который направляется через трубопроводы в автобусный парк, где заправляются все городские автобусы Стокгольма [Innovatives Abfallmanagement in Stockholm].

Надо признать, что приведенный выше пример обращения с коммунальными отходами является уникальным. Управление отходами имеет множество взаимосвязей и с другими хозяйственными проблемами развития городов, включая водоснабжение, энергетику и продовольственную безопасность и др. Проектирование управления отходами основывается на результатах завершенных и текущих программ, на сравнении опыта стран международного сотрудничества в области развития. Оно (проектирование) учитывает экологические, социальные и экономические аспекты обращения с отходами и применяется в странах с разным экономическим и экологическим потенциалом.

В качестве примера можно привести также проект «Модернизация муниципальных служб» в Косово, в котором используются уже разработанные руководящие принципы, касающиеся моделей операторов для структурирования управления отходами. Вместе с консалтинговым проектом в Косово был разработан учебный модуль, с помощью которого обучаются сотрудники органов власти и компаний по удалению отходов. Нечто подобное планируется и для других стран ЕС¹⁰.

Большое значение в реализации проектов по созданию предприятий замкнутого цикла имеет осуществляемая во многих странах ЕС система контроля за захоронением

¹⁰ URL: https://www.researchgate.net/publication/275315798_Information_systems_an_alternative_to_modernization_to_achieve_in_the_control_of_management_of_municipal_public_services

отходов. Целью экономики замкнутого цикла является предотвращение образования отходов за счет сохранения природных ресурсов. Это может быть достигнуто на предприятиях путем целенаправленного согласования технологических процессов и внутренней организации. Если накопления отходов нельзя избежать, их можно вернуть обратно в хозяйственный цикл с помощью высококачественных методов утилизации. Только в том случае, если утилизация невозможна, отходы могут быть экологически безопасными для складирования на полигонах. Государственные органы коммерческого надзора следят за процедурами предотвращения, сокращения, утилизации и удаления отходов на предприятиях и отвечают за регулярный мониторинг объектов по обращению с отходами, в случае полигонов, даже после прекращения хранения отходов на этапах вывода из эксплуатации и последующего ухода. Так, в Германии Центр поддержки отходов, генной инженерии и безопасности оборудования (ZUS AGG) является частью Управления коммерческого надзора и оказывает помощь государственным органам коммерческого надзора в решении специальных вопросов, связанных с обращением с отходами¹¹.

Технические, организационные и финансовые концепции устойчивого управления отходами и ресурсами в ЕС рассматриваются в ходе национальных и международных экспертных дискуссий, а также в рамках проектов сотрудничества в целях развития [Waste-Environment-European-Commission].

¹¹ URL: https://www.gewerbeaufsicht.niedersachsen.de/startseite/umweltschutz/kreislauf_und_abfallwirtschaft/kreislauf-und-abfallwirtschaft-52186.html

1.3.3. Законодательная база Республики Польша о составе ТКО и безопасности полигонов

Несколько иначе трактуется тема коммунальных отходов в странах Восточной Европы, например, в Польше, где под ними понимаются отходы, не связанные с промышленной деятельностью человека. Закон об этих отходах от 14.12.2012 г. (*Ustawa z dnia...*) определяет коммунальные отходы как отходы, производимые в домашних хозяйствах, за исключением автомобилей, вышедших из пользования, а также отходы, не содержащие опасных составляющих, которые по своему характеру или составу похожи на отходы, производимые в домашних хозяйствах. По мнению С. Росик-Дулевской (*Rosik-Dulewska, 2000*), чаще всего в Польше состав коммунальных отходов включает:

- 40–50% органические субстанции;
- максимум 60% — минеральные (в том числе ~30% — это зола печного происхождения).

Этот автор выделяет также 4 группы коммунальных отходов:

1. Отходы, не пригодные к потреблению: бумажные, из синтетических материалов, стекло, металлы, текстиль. Составляют 30% массы твердых коммунальных отходов.
2. Отходы, которые редко трактуются как вторичные ресурсы: органические отходы — остатки пищевых. Составляют 50% всех коммунальных отходов.
3. Отходы разного рода горючих веществ, прежде всего от обогрева помещений и домов (до 20% массы отходов). Неорганические отходы этого типа не рассматриваются как вторичные.

4. Довольно немногочисленная группа отходов, часть которых может использоваться в качестве вторичного сырья (например, остатки бытовой химии и др.).

Свалки бытовых отходов в городах Польши до конца XX в. за редким исключением имели самодельные установки для их обезвреживания. В настоящее время они являются одним из элементов общего оборудования свалки по утилизации отходов.

Согласно польскому законодательству формой обеспечения безопасности отходов является их складирование, которое, в свою очередь, определено как совокупность процессов их биологического, химического или физического преобразования с целью приведения отходов к состоянию, когда они не представляют угрозы для жизни и здоровья людей или окружающей среды. Это условие следует из распоряжения министра окружающей среды в вопросах, касающихся локализации, строительства, эксплуатации и закрытия полигонов отходов. Важно отметить, что для обеспечения геозеологической безопасности необходим проект геологических изысканий, т.е. разработки инженерно-геологической и гидрогеологической документации, включающий в качестве обязательного элемента выдачу заключения об условиях строительства и использования территории для полигона отходов как первого шага ее инвестиционной процедуры.

В состав изысканий под размещение свалок входят:

- инвентаризация всех поверхностных водотоков и горизонтов подземных вод территории планируемого хранилища отходов и ее окружения;
- гидрогеологический баланс количества поступающих и отходящих из хранилища вод в ходе его эксплуатации;

- изучение геологического строения территории и ее окружения, включающее:

а) исследование геологического строения территории на основе как минимум 5 скважин с глубиной, достаточной для изучения водоносного и водоупорного горизонтов, притом что минимальное количество скважин должно быть не менее 1×1 га территории изысканий;

б) определение показателя фильтрации каждого литологического пласта, составляющего геологическое строение территории;

в) исследование пространственного тектонического строения территории и ее окружения;

- гидрометеорологические данные:

а) среднегодовое количество осадков на основе данных ближайшей метеостанции,

б) величина годового максимального количества осадков за период последних 30 лет на основе данных этой станции;

в) предполагаемое количество воды, которое может содержаться в складываемых отходах;

г) допустимое количество воды, которое может быть поглощено данными отходами;

д) коэффициент испарения данной территории и т. д.

В целом для обеспечения безопасности геологической среды каждое хранилище отходов должно быть так локализовано, чтобы имело естественный барьер, блокирующий поступление вод в нижележащие слои и в боковые стены хранилища ТКО. Важно, чтобы предполагаемый наивысший пьезометрический уровень подземных вод был как минимум на 1 м ниже запроектированного уровня дна хранилища отходов.

Если нет возможности размещения хранилищ отходов в местах с естественным геологическим гидроизолирующим барьером, используют искусственно созданный геологический барьер минимальной мощности 0,5 м с соответствующим коэффициентом фильтрации. Дополнением этих видов изоляции нижележащих слоев может быть их синтетическая изоляция.

В Польше решение о строительстве хранилища отходов, согласно статье 52 Закона «Об отходах» (*Ustawa z dnia...*), должно включать еще такие данные:

- название и адрес организации, принявшей решение, а также управляющего хранилищем отходов, если это разные субъекты, а также адрес хранилища отходов;
- виды отходов, предполагаемые для складирования в данном хранилище;
- предполагаемое ежегодное и общее количество складироваемых отходов и объем хранилища;
- описание территории предполагаемой свалки коммунальных отходов, особенно ее геологическая и гидрогеологическая характеристика;
- описание способов, применяемых для исключения загрязнения окружающей среды или ограничения количества отходов и их негативного воздействия на среду;
- план эксплуатации, управления и мониторинга состояния хранилища отходов;
- план закрытия хранилища, а также послеэксплуатационные мероприятия;
- способы защиты от аварий и мероприятия в случае, если они будут иметь место.

Согласно этому закону, хранилище коммунальных отходов должно быть окружено зеленым поясом (минимум 10 м

ширины), состоящим из деревьев и кустарников, с целью ограничения до минимума неблагоприятного воздействия и опасностей, возникающих в результате эмиссии запахов и пыли, разноса отходов ветром, шума, движения на дорогах, деятельности животных, возникновения пожаров и распространения аэрозолей.

1.3.4. Методы обращения со свалочными газами и фильтратом

Отдельно необходимо остановиться на таком сопутствующем функционированию свалок явлении, как образование фильтрата. Содержащиеся в фильтрате ингредиенты придают так называемому выщелачиванию на свалках особый характер. Хотя ТКО содержат самые разные отходы, состав которых практически невозможно сравнивать, фильтрат свалок, как правило, очень трудно разлагается биологически. Количество фильтрата зависит прежде всего от количества осадков, испарения и стока на поверхности полигона. Установлено, что при среднем количестве осадков 750 мм/год, выпадает около 5 м^3 с 1 га в сутки.

Фильтрат характеризуется высоким уровнем загрязнения органическими соединениями, загрязнением водорастворимыми нитратами, сульфатами, хлоридами, а также тяжелыми металлами. С помощью уплотненной почвы, глины, почвы с добавками (например, бентонита) или искусственных пленок в основании свалки возможно предотвратить утечку фильтрата со свалки и, следовательно, оградить от опасности загрязнения грунтовые воды. По коллекторным трубопроводам этот фильтрат направляется на очистные сооружения, где он очищается перед сбросом в водоем, но на

практике он часто повторно сбрасывается на тело свалки, что приводит к повторной концентрации загрязняющих веществ. Поскольку долгосрочная безопасность изоляции свалки, как правило, не гарантирована, может произойти утечка фильтрата в грунтовые воды. Таким образом, загрязняющие вещества, которые не задерживаются в теле свалок, могут вымываться в течение десятилетий и загрязнять грунтовые воды. Следовательно, очистка сточных вод на свалках также предъявляет особые требования к инженерным системам.

Согласно общим рамочным правилам ЕС, касающимся минимальных требований к сбросу сточных вод со свалок бытовых отходов, фильтрат должен обрабатываться в соответствии с соблюдением представленных в них ограничений по содержанию загрязняющих веществ. Оптимальной, но также и самой сложной и дорогостоящей очисткой фильтрата является в настоящее время двухступенчатый обратный осмос. Более рентабельны биологическая очистка и удаление загрязняющих веществ путем адсорбции на активированном угле.

Свалочный газ, основными компонентами которого являются углекислый газ и метан, образуется на свалках частично в результате химического, частично — бактериологического разложения органических компонентов. Аэробная фаза разложения использует присутствующий в воздухе кислород, в результате чего образуются вода, азот, а также углекислый газ и некоторые другие молекулярные продукты. При непрерывной подаче кислорода, например, из-за рыхлой свалки мусора это может привести к стабильно протекающим процессам. Далее следует анаэробная не метановая фаза — бактерии производят водород, азот, углекислый

газ, а также низшие жирные кислоты. В анаэробной стабильной метановой фазе в результате реакций биохимического разложения образуется газ, состоящий на 50–70% из метана и на 30–50% из углекислого газа. Это самый настоящий свалочный газ. Свалочный газ содержит метан (CH_4), мощный парниковый газ, а также различные летучие органические и неорганические соединения. Эти выбросы со свалок составляют примерно 25% от общего объема CH_4 в атмосфере, что указывает на необходимость переработки или очистки свалочного газа перед его выбросом в атмосферу¹². В фазе распада метана происходит только небольшое накопление газа и поступление воздуха на свалку. Примерно через шесть лет период полураспада, пригодного для использования углеродсодержащего материала, заканчивается. Количество образующегося газа резко сокращается, что наносит ущерб окружающей среде, людям и животным.

Скорость и объем образования свалочного газа на конкретном участке зависят от характеристик отходов (например, состава и возраста мусора) и ряда факторов окружающей среды (например, наличия кислорода на свалке, содержания влаги и температуры).

Состав отходов. Чем больше органических отходов на свалке, тем больше свалочного газа (например, углекислого газа, метана, азота и сероводорода) вырабатывается бактериями в процессе разложения. Чем больше химических веществ попадает на свалку, тем выше вероятность образования неметановых органических компонентов (NМОС) и других газов в результате испарения или химических реакций.

¹² URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38748305/>

Возраст отходов. Как правило, недавно захороненные отходы (т. е. отходы, захороненные менее 10 лет назад) выделяют больше свалочного газа в результате бактериального разложения, испарения и химических реакций, чем более старые отходы (захороненные более 10 лет назад). Пик выделения газа обычно приходится на период от 5 до 7 лет после захоронения отходов.

Наличие кислорода на свалке. Метан будет образовываться только при отсутствии кислорода на свалке.

Содержание влаги. Наличие влаги (ненасыщенные условия) на свалке увеличивает выработку газа, поскольку способствует разложению бактерий. Влага также может активизировать химические реакции, в результате которых образуются газы.

Температура. При повышении температуры на свалке возрастает активность бактерий, что приводит к увеличению выработки газа. Повышенная температура также может увеличить скорость улетучивания и химических реакций¹³.

В Германии разработаны принципы обустройства системы сбора, подготовки и утилизации свалочного газа, которые гарантируют: уменьшение источников неприятного запаха и негативного воздействия свалок отходов на окружающую среду; сокращение выбросов парниковых газов; снижение опасности возгорания и взрыва в корпусе свалки; более высокие стандарты безопасности для работников свалок; использование возобновляемых источников энергии. Особой задачей является создание и внедрение инновационных установок для утилизации уменьшающегося количества и качества свалочного газа, так называемых технологий сла-

¹³ URL: <https://www.atsdr.cdc.gov/HAC/landfill/html/ch2.html>

бого газа, которые используются в том числе на послерекультивационных стадиях функционирования свалок, охватывающих несколько лет¹⁴.

Город Шэньчжэнь называют Силиконовой долиной Китая. Здесь новые компании открываются почти каждый день, что способствует росту отходов и свалок. На многих свалках образуется свалочный газ, который используется для производства электроэнергии. За последние несколько лет там было построено 12 биогазовых электростанций общей мощностью 120 мегаватт, а еще 6 строятся в настоящее время. Компания подает электроэнергию в сеть общего пользования. Хотя китайское правительство также все больше делает ставку на разделение и переработку отходов, 70% городских отходов в Китае по-прежнему выбрасывается на свалки. Выгода от использования свалочных газов двойная: помимо экономической выгоды, выигрывает и окружающая среда, поскольку свалочный газ не выходит и не сжигается неконтролируемым образом. Власти Китая работают над тем, чтобы еще больше свалочных газовых электростанций были оснащены теплоэлектростанциями. Поэтому свалочный газ остается крупным рынком сбыта в Китае — в отличие от большей части Европы¹⁵.

Таким образом, в настоящее время решение проблем утилизации отходов в мировом масштабе является частью постоянно модернизирующегося проекта устойчивого развития. Для поэтапного внедрения концепции управления отходами законодательные акты стран ЕС устанавливают

¹⁴ URL: https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Europa_International/efre_treibhausgase_deponien_bf.pdf

¹⁵ URL: <https://www.mtu-solutions.com/eu/de/stories/energie/turning-waste-into-green-electricity.html>

требования к различным аспектам обращения с отходами и создают условия для их достижения. Иерархия управления отходами отдает приоритет предотвращению отходов, за которым следуют подготовка к повторному использованию, рециркуляция, «другое извлечение» и, наконец, захоронение как наименее желательный вариант. Технические, организационные и финансовые концепции устойчивого управления отходами и ресурсами рассматриваются в ходе национальных и международных экспертных дискуссий, а также в рамках проектов сотрудничества в целях развития. Показатели стран ЕС и показатели РФ как по характеру отходов, так и по их количеству на душу населения несравнимы. Перспективы достижения цели по утилизации муниципальных отходов в 50% к 2020 г. неоднозначны. Этот уровень утилизации уже достигнут шестью странами в соответствии с самым требовательным методом расчета. Нескольким странам придется активизировать свои усилия для достижения этой цели.

Широкий анализ конкурентности высокоразвитых государств в части предложений по размещению отходов позволил установить, что для ограничения расходов на утилизацию и увеличения возможностей вторичного использования отходов очень важное значение имеет высокий уровень инвестиций в науку и инновационные проекты.

Глава 1.4. Нормативно-правовое регулирование обеспечения геоэкологической безопасности полигонов ТКО в России

(В.Г. Заиканов, И.Н. Заиканова)

1.4.1. Анализ законодательства РФ по обращению с ТКО

Согласно учетным данным объем ТКО в нашей стране ежегодно увеличивается, и в настоящее время этот показатель составляет уже около 500—800 кг в год на каждого жителя больших городов. В России за последние 25 лет бытовых отходов стало в 4 раза больше по причине, прежде всего, совершенствования культуры упаковки, в том числе использования большого количества одноразовой. При этом деятельность жилищно-коммунального хозяйства в области управления ТКО сопровождается весьма большими потерями ресурсов, а также увеличением загрязнения окружающей среды.

Законодательство по управлению отходами — система нормативных актов, действующих в данной отрасли, — включает не только законодательные, но и подзаконные нормативные акты, например, такие, как Постановления Правительства, СанПиН, СП, МИ и др. Именно законодательство определяет или должно определять все виды деятельности по обращению с ТКО, включающие их сбор, накопление, транспортировку, обработку, утилизацию, обезвреживание и размещение.

Таким образом, именно законодательство лежит в основе управления отходами, поэтому ему необходимо придавать первоочередное значение, и исходя из него, трактовать со-

стояние проблемы обращения с отходами в России с различных позиций, в том числе с геоэкологических.

Главным законодательным актом, регулирующим отношения в области обращения с отходами в РФ, является Федеральный закон №89 «Об отходах производства и потребления» (редакция, действующая с 14 июня 2020 г.) (ФЗ от 24.06.1998 г. № 89-ФЗ). Согласно этому закону, обращение с отходами — деятельность по сбору, накоплению, транспортированию, обработке, утилизации, обезвреживанию, размещению отходов, при этом под размещением отходов понимается хранение и захоронение отходов. Хранение отходов — это складирование отходов в специализированных объектах сроком более чем одиннадцать месяцев в целях утилизации, обезвреживания, захоронения. *(Абзац в редакции, введенной в действие с 1 января 2015 г. Федеральным законом от 29 декабря 2014 г. № 458-ФЗ)*. А захоронение отходов — изоляция отходов, не подлежащих дальнейшей утилизации, в специальных хранилищах в целях предотвращения попадания вредных веществ в окружающую среду.

Также Закон (ст. 1) разграничивает понятия «объекты хранения отходов» и «объекты захоронения отходов» (ФЗ от 24.06.1998 г. № 89-ФЗ). Первые — это «специально оборудованные сооружения, предназначенные для размещения отходов (полигон, шламохранилище, в том числе шламовый амбар, хвостохранилище, отвал горных пород и другое)». «Объектами захоронения отходов» являются предоставленные в пользование в установленном порядке участки недр, подземные сооружения для захоронения отходов I–V класса опасности в соответствии с законодательством Российской Федерации о недрах».

Если обратиться к Закону «О недрах» от 21.02.1992 г. № 2395-1 (Закон о недрах, 1992), то согласно ст. 6, недра предоставляются в пользование для строительства и эксплуатации подземных сооружений, не связанных с добычей полезных ископаемых. К этому виду деятельности и относится создание мест захоронения (полигонов) ТКО. Закон далее разъясняет (ст. 7): «Предварительные границы горного отвода устанавливаются при предоставлении лицензии на пользование недрами. После разработки технического проекта выполнения работ, связанных с использованием недрами, получения положительного заключения государственной экспертизы и согласования указанного проекта в соответствии со ст. 23.2 настоящего Закона орган государственного горного надзора или в случаях, установленных Правительством Российской Федерации, орган исполнительной власти субъекта Российской Федерации (относительно участков недр местного значения) оформляет документы, которые удостоверяют уточненные границы горного отвода (горноотводный акт и графические приложения) и включаются в лицензию в качестве ее неотъемлемой составной части». *(Часть в редакции, введенной в действие с 1 июля 2014 г. Федеральным законом от 28 декабря 2013 года № 408-ФЗ.)*

При рассмотрении Постановления Правительства РФ от 3 октября 2015 г. № 1062 «О лицензировании деятельности по сбору, транспортированию, обработке, утилизации, обезвреживанию, размещению отходов I–IV класса опасности» (с изменениями и дополнениями) выясняется, что данный документ не только не содержит требования о предоставлении лицензии на пользование недрами, но и не включает никаких сведений относительно горного отвода под полигоны или вообще использования недр для захоронения ТКО (Постановление Правительства РФ от 3 октября 2015 г. № 1062).

В длинном списке Закона 89-РФ под названием «Полномочия Российской Федерации в области обращения с отходами» проблеме размещения отходов отведено только «...утверждение правил обустройства мест (площадок) накопления твердых коммунальных отходов и правил ведения их реестра». Эти правила будут рассмотрены ниже.

К полномочиям субъектов Российской Федерации в области обращения с отходами принадлежат разработка и утверждение территориальной схемы обращения с отходами. В полномочия органов местного самоуправления в области обращения с твердыми коммунальными отходами входит обязанность «создания и содержания мест (площадок) накопления твердых коммунальных отходов».

Согласно данному Закону, определение места строительства объектов размещения отходов осуществляется на основе специальных (геологических, гидрологических и иных) исследований в порядке, установленном законодательством Российской Федерации. При этом запрещается захоронение отходов в границах населенных пунктов, лесопарковых, курортных, лечебно-оздоровительных, рекреационных зон, а также водоохраных зон, на водосборных площадях подземных водных объектов, которые используются в целях питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения. Запрещается захоронение отходов в местах залегания полезных ископаемых и ведения горных работ в случаях, если возникает угроза загрязнения мест залегания полезных ископаемых и безопасности ведения горных работ.

В соответствии с пунктом 3 ст. 10 Федерального закона «Об отходах производства и потребления» Правительство Российской Федерации постановило утвердить «Единые требования к объектам обработки, утилизации, обезвреживания, размещения твердых коммунальных отходов», которые

вступили в силу с 1 января 2021 г. и будет действовать до 1 января 2027 г. Эти требования рассматриваются ниже.

В целях организации и осуществления деятельности по накоплению (в том числе раздельному накоплению), сбору, транспортированию, обработке, утилизации, обезвреживанию, размещению отходов утверждаются территориальные схемы обращения с отходами и федеральная схема обращения с твердыми коммунальными отходами. В развитие этой статьи были разработаны «Правила разработки, общественного обсуждения, утверждения, корректировки территориальных схем в области обращения с отходами производства и потребления, в том числе с твердыми коммунальными отходами, а также требования к составу и содержанию таких схем» (Постановление Правительства РФ от 22.09.2018 г. № 1130), которые, в частности, содержат сведения о наличии заключения государственной экологической экспертизы проектной документации объектов, используемых для размещения и (или) обезвреживания отходов I–V класса опасности, согласованной в установленном порядке санитарно-защитной зоне, лицензии на осуществление деятельности и т.д.

Расположение объектов управления отходами имеет, согласно этим Правилам, ограничения очень неопределенного вида, а именно: «...строительство объектов обработки, утилизации, захоронения твердых коммунальных отходов не представляется возможным в силу природно-климатических, географических особенностей таких территорий, плотности населения, проживающего на таких территориях, низкого уровня объема образования твердых коммунальных отходов». В Правилах, в частности, не указывается, какие природно-климатические, другие географические особенности, какова плотность населения, каков этот низкий уровень

образования ТКО и другие являются ограничениями для размещения объектов ТКО.

Согласно ст. 13.4.1. Закона 89-РФ, *«накопление отходов допускается только в местах (на площадках) накопления отходов, соответствующих требованиям законодательства в области санитарно-эпидемиологического благополучия населения и иного законодательства Российской Федерации»*. К сожалению, для разработчиков таких схем не указывается, что понимается под «иным» законодательством, что, учитывая не всегда достаточный уровень образования таких разработчиков в области геоэкологии, может привести к серьезным последствиям. Это хорошо видно на примере таких схем, разработанных для многих областей РФ. В их легендах содержится только указание мест сбора и накопления ТКО без какой-либо характеристики географических (как минимум) условий, в которых размещаются объекты ТКО.

Закон содержит противоречие. Если выше мы читаем, что в полномочия органов местного самоуправления в области обращения с твердыми коммунальными отходами входит обязанность **«создания и содержания мест (площадок) накопления твердых коммунальных отходов на основе разработанных схем»**, то далее в нем сказано: **«Органы местного самоуправления определяют схему размещения мест (площадок) накопления твердых коммунальных отходов»**, хотя ранее это относилось к компетенции органов Российской Федерации и ее субъектов, составляющих территориальные схемы.

В дополнение к Закону № 89-РФ были разработаны **«Правила обустройства мест (площадок) накопления твердых коммунальных отходов и ведения их реестра»** от 31 августа 2018 г. № 1039 (Постановление Правительства РФ от 31 августа 2018 г. № 1039).

Согласно п. II.6 Правил: *«В целях оценки заявки на предмет соблюдения требований законодательства Российской Федерации в области санитарно-эпидемиологического благополучия населения к местам (площадкам) накопления твердых коммунальных отходов уполномоченный орган запрашивает позицию соответствующего территориального органа федерального органа исполнительной власти, уполномоченного осуществлять федеральный государственный санитарно-эпидемиологический надзор (далее — запрос)».*

Таким образом, заявку как на создание «площадки» будущего полигона, так и разрешение дает «орган исполнительной власти, уполномоченный осуществлять федеральный государственный санитарно-эпидемиологический надзор». Другие организации, например, органы охраны природы, экологической экспертизы, недропользования и т.д. в данном документе не упоминаются, т.е. не участвуют в принятии этих решений.

Основаниями отказа уполномоченного органа в согласовании создания места (площадки) накопления твердых коммунальных отходов являются (II.8):

- несоответствие места (площадки) накопления твердых коммунальных отходов требованиям правил благоустройства соответствующего муниципального образования, требованиям законодательства Российской Федерации в области санитарно-эпидемиологического благополучия населения, иного законодательства Российской Федерации, устанавливающего требования к местам (площадкам) накопления твердых коммунальных отходов.

Итак, часть II Правил, которая регулирует процедуру (порядок) создания полигонов, не содержит никаких технических, геологических и других разъяснений по части разме-

щения полигонов ТКО, но полностью повторяет неопределенность указанной выше ст. 13.4.1. Закона 89-РФ.

Надо отметить, что эти Правила касаются только «площадок», а о том, какие требования предъявляются к сопровождающим их производствам, в них нет речи. Кроме того, согласно ст. 13.3 п. 5 Закона 89-РФ, «российский экологический оператор проводит экспертизу проекта территориальной схемы обращения с отходами», о таком ограничении в данном пункте Правил также ничего не сказано.

В соответствии с п. 5 ст. 13.4 Федерального закона «Об отходах производства и потребления» реестр включает в себя следующие разделы, посвященные «площадкам» (ст. III.15 Правил):

- данные о нахождении мест (площадок) накопления твердых коммунальных отходов

(ст. III.16 этих Правил поясняет: «Данные о нахождении мест (площадок) накопления твердых коммунальных отходов» содержат сведения об адресе и (или) географических координатах мест (площадок) накопления твердых коммунальных отходов, а также схему размещения мест (площадок) накопления твердых коммунальных отходов);

- данные о технических характеристиках мест (площадок) накопления твердых коммунальных отходов

(пояснением является ст. III. 17 этих Правил: «Данные о технических характеристиках мест (площадок) накопления твердых коммунальных отходов», которая содержит сведения «об используемом покрытии, площади, количестве размещенных и планируемых к размещению контейнеров и бункеров с указанием их объема»).

Анализ этого документа в отношении обустройства мест (площадок) накопления твердых коммунальных отходов и

ведения их реестра показывает, что сведения о ее геологии, гидрологии, гидрогеологии, нахождении относительно особо охраняемых природных территорий (ООПТ), населенных пунктов, экологической ситуации и т.д. не включены в данные Правила.

Особо надо отметить, что, называя полигоны накопления и захоронения отходов, «площадками», законодатель, видимо, не имеет представления о том, что они являются объемными, достаточно сложными сооружениями, имеющими не только обусловленную геологическим строением и гидрогеологическими условиями глубину, но и санитарно-защитную зону, непростое техническое обустройство, большой объем выемки, требующей своего размещения или утилизации и т.д. Это еще раз подчеркивает отсутствие в законодательстве об отходах каких-либо связей с законом «О недрах».

В разработанное практически в то же время, что и указанные выше Правила, Постановление Правительства Российской Федерации от 15 декабря 2018 г. № 1572 «Об обращении с твердыми коммунальными отходами и внесении изменения в Постановление Правительства Российской Федерации от 25 августа 2008 г. № 641» (Постановление Правительства РФ 15 декабря 2018 г. № 1572) содержит только разъяснения по правовой организации обращений с ТКО, включая различные договоры и требования к ним.

В документе отсутствуют разъяснения относительно условий и требований по размещению и обустройству объектов управления ТКО. Даже в перечне понятий, применяемых в данных Правилах, есть только упоминание «контейнерной площадки», кроме того, в них вообще отсутствует раздел, посвященный местам захоронения ТКО.

В качестве примера принципов разработки Схем размещения ТКО можно привести Распоряжение Департамента жилищно-коммунального хозяйства г. Москвы № 01-01-14-590/19 от 26.12.2019 г. «Об утверждении территориальной схемы обращения с отходами города Москвы» (Распоряжение..., 2019), где в разделах «Объекты утилизации и обезвреживания отходов» и «Сводная информация о существующих и перспективных объектах обращения с отходами» представлена документация на создание этих мест, но кроме координат никакой информации о геоморфологическом положении, геологических, гидрогеологических, гидрологических, инженерно-геологических, экологических и т.д. условий нет. Это можно объяснить только тем, что разрабатывалась схема Департаментом жилищно-коммунального хозяйства, который составил ее без учета тех требований, которые в усеченном виде, но все-таки содержались в Законе «Об отходах», Законе «О недрах» и других подзаконных актах, касающихся размещения объектов обращения с отходами.

В Московской области функционирует 39 полигонов твердых коммунальных отходов (ТКО), работающих по лицензии.

По словам губернатора Московской области, 24 из 39 должны были быть закрыты в 2013 г. Ввиду заполненности всех действующих полигонов, ведётся проектирование мусороперерабатывающих заводов и нового полигона «Малинки» на месте закрывшейся одноимённой свалки. Возникает вопрос: связано ли это с действием лицензий на данный вид деятельности?

Как следует из Постановления Правительства РФ от 3 октября 2015 г. № 1062 «О лицензировании деятельности

по сбору, транспортированию, обработке, утилизации, обезвреживанию, размещению отходов I–IV класса опасности» (с изменениями и дополнениями) (Постановление Правительства РФ от 3 октября 2015 г. № 1062), срока окончания действия у лицензий нет. Они актуальны до тех пор, пока у лицензиата не меняются условия работы по размещению мусора или он не прекращает деятельность. Поводом принудительного приостановления действия лицензии может быть неустранение выявленного нарушения, а также приостановление работы лицензиата по решению контролирующего органа¹⁶.

Таким образом, понятно, почему большинство свалок, например, Московской области обязали закрыть только в 2013 г., хотя создавались они в 1960–1980-е гг. Законодательными нормами обусловлена практика закрытия свалок на основании решений контролирующих органов, которые, учитывая состояние свалок, либо не действовали, либо их заключения игнорировались соответствующими властями. На самом деле чаще всего закрытие свалок было вызвано настоятельными требованиями населения прилегающих территорий и общественными организациями.

1.4.2. Законодательство РФ относительно геоэкологической безопасности

Требования по обеспечению геоэкологической безопасности площадки, предназначенной под размещение полигонов ТКО, содержатся в СП 320.1325800.2017 г. «Свод правил. Полигоны для твердых коммунальных отходов. Проектирование, эксплуатация и рекультивация», где обо-

¹⁶ URL: <https://rcycle.net/>

значены следующие условия, необходимые для согласования строительства хранилища ТКО:

- Площадь участка, отводимого под полигон ТКО, рассчитывают из условия срока его эксплуатации не более 25 лет.
- Устройство полигонов ТКО на просадочных грунтах допускается при условии полного устранения просадочных свойств грунтов.
- Площадка, предназначенная под размещение полигонов ТКО, должна отвечать следующим требованиям:
 - участок для размещения полигона ТКО должен быть не затопляемым или не подтапливаемым;
 - участок для размещения полигона ТКО следует располагать на ровной территории, исключающей возможность смыва атмосферными осадками части отходов и загрязнения ими прилегающих земель и открытых водоемов;
 - участок для размещения полигона ТКО следует располагать с подветренной стороны (для ветров преобладающего направления) по отношению к муниципальным образованиям и рекреационным зонам.
- Не допускается использовать под полигоны ТКО заболоченные земельные участки и участки с выходами грунтовых вод в виде ключей.
- Допускается размещение участка под полигоны ТКО на территории оврагов, начиная с их верховьев, при обеспечении требования по организации сбора и удаления поверхностного стока путем устройства перехватывающих каналов для отвода вод в открытые водные объекты.

Надо заметить, что все вышеназванные правила полностью соответствуют таковому принятому ранее – в 2001 г. документу: СанПиН 2.1.7.1038-01 Гигиенические требования к устройству и содержанию полигонов для твердых бытовых отходов.

При этом многие указания СП были в СанПиНе более детально проработаны. Например, такой пункт: *«Складирование ТБО в воду на болотистых и заливаемых паводковыми водами участках не допускается. До использования таких участков под полигон ТБО на них должна устраиваться подсыпка инертными материалами на высоту, превышающую на 1 м максимальный уровень поверхностных или паводковых вод. При подсыпке устраивается водоупорный экран. При наличии грунтовых вод на глубине менее 1 м на поверхность наносится изолирующий слой с предварительным осушением грунта»*.

СанПиН устанавливает также размер санитарно-защитной зоны — от жилой застройки до границ полигона 500 м. Кроме того, размер санитарно-защитной зоны может уточняться при расчете газообразных выбросов в атмосферу. Границы зоны устанавливаются по изолинии 1 ПДК, если она выходит из пределов нормативной зоны. Уменьшение санитарно-защитной зоны производится в установленном порядке, с учетом данных геоэкологического мониторинга. Надо отметить также такие указания: *«На участке, намеченном для размещения полигона для бытовых отходов, проводятся санитарное обследование, геологические и гидрологические изыскания. Перспективными являются места, где выявлены глины или тяжелые суглинки, а грунтовые воды находятся на глубине более 2 м. Не используются под полигоны болота глубиной более 1 м и участки с выходами грунтовых вод в виде ключей. Целесообразно участки под полигоны выбирать с учетом наличия в санитарно-защитной зоне зеленых насаждений и земельных насыпей»*.

Как показали исследования по данной тематике, совершенно не учитываются при планировании мест размещения полигонов ТКО геоморфологические условия, что особенно

важно не только (как показал наш опыт исследований) на равнинных территориях, но и в горных и предгорных районах, причем с учетом инженерно-геологических, гидрогеологических и других условий. Еще более сложную проблему представляют принципы разработки требований к размещению отходов в криолитозоне, которая в нашей стране занимает 67% ее территории. Нельзя не отметить сложность выбора мест размещения ТКО в переходных зонах, таких как приморские, предгорные и т.д. Как показал анализ, проведенный нами в этом году, вообще о территориях этого типа ничего нет в Правилах и других подзаконных документах.

Среднее по России расстояние вывоза ТКО составляет 20 км, в крупных городах с населением более 500 тыс. жителей оно возрастает до 45 км и более. По данным обследования 100 городов России (без Москвы и Санкт-Петербурга), около 45 % всех ТБО транспортируются на расстояние 10–15 км, 40 % – на 15–20 км, а 15 % всех отходов – более чем на 20 км. Как показывают статистические данные, дальность вывоза ТБО ежегодно возрастает в среднем на 1,5 км, а себестоимость их транспортировки соответственно на 15–20 %.

Свалки и полигоны ТКО занимают в стране свыше 40 тыс. га земли; кроме того, около 50 тыс. га составляет площадь закрытых (заполненных) свалок и полигонов. Дополнительно ежегодно для захоронения ТКО отчуждается около 1 тыс. га.

Из всего количества полигонов только около 8% отвечают санитарным требованиям, большинство полигонов представляют значительную эпидемиологическую опасность, нарушают природный ландшафт и являются источником за-

грязнения почвы, подземных и грунтовых вод, атмосферного воздуха.

Существующая в настоящее время в городах России система сбора ТКО является унитарной и в большинстве случаев не предусматривает разделение потоков ТКО на различные фракции, выделение опасных отходов из общего объема, сбор вторичных сырья, который на Западе является предметом экспорта и импорта.

Проблема размещения отходов наиболее остро стоит в урбанизированных территориях, с одной стороны, потому что рост объемов ТКО пропорционален росту их населения, а с другой — из-за дефицита прилегающих к городам территорий, свободных для захоронения отходов, из-за значительного их заселения и широкого развития дачных домохозяйств.

Немаловажным является и тот факт, что с годами растут токсичность и скорость разложения отходов. В связи с этим большое значение для «естественной переработки» или консервации в границах полигона приобретают такие свойства геологической среды, как геологические и гидрогеологические условия, а также минералогические, гидрохимические и инженерно-геологические особенности как природной вмещающей среды, так и инородного для нее (свалочного) тела. По сути, любой полигон захоронения отходов с течением времени становится частью геологической среды (точнее — техносферы) и функционирует по ее природным законам. Поэтому необходим обоснованный, с данной точки зрения, выбор таких участков для захоронения, геологическое строение которых позволит снизить негативное воздействие полигонов на компоненты окружающей природной среды, прежде всего на их загрязнение.

В документах ЕС полигонное захоронение определяется как «наименее желательная опция», которую требуется свести к минимуму, причем такой тип утилизации допускается только для тех отходов, которые прошли специальную предварительную обработку. По публикациям СМИ Германии, с 2005 г. новые полигоны не организуются, но вместе с тем отмечается, что современный полигон захоронения ТКО имеет сложное инженерное оборудование, которое предельно уменьшает опасность воздействия загрязняющих веществ на компоненты окружающей природной и социальной среды.

Одними из обязательных требований в законодательстве Германии и других стран по полигонам ТКО является постоянное повышение квалификации персонала, а также высокий уровень ответственности руководства свалок, особенно необходимые там, где на население и природу полигоны оказывают постоянное воздействие и даже представляют разного рода опасность. К сожалению, таких разделов в законодательстве о ТКО нет, а если есть, то они не выполняются, о чем красноречиво говорит состояние большинства свалок.

Исключительной особенностью Российской Федерации является ее размеры, а значит наличие 10 природных зон и подзон, различающихся по климатическим условиям. Отсюда следует недостаточность имеющихся нормативных документов по оценке природных условий, в частности, геологической среды для размещения полигонов ТКО в разных ландшафтных и инженерно-геологических условиях, например, в различных природных зонах, особенно в криолитоzone, а также в долинах крупных рек, на приморских, горных и других территориях.

Более подробно рассмотрены требования к размещению полигонов ТКО в СП 320.1325800.2017 г. «Полигоны для твердых коммунальных отходов. Проектирование. Эксплуа-

тация и рекультивация», которые были значительно откорректированы и введены 17.04.2022 г. (СП 320.1325800.2017). В измененном варианте Правил были значительно изменен раздел 5, который посвящен требованиям к выбору земельных участков.

В требованиях по размещению полигонов ТКО нет точных указаний в части выбора участков, хотя есть п. 5.1, где перечисляются «климатогеографические и почвенные особенности, геологические и гидрогеологические условия местности», но нет приложения или ссылки на методические рекомендации, где бы описывалось, какие именно «особенности» и в каких природных зонах надо учитывать.

Для примера можно обратиться к п. 5.4, в котором речь идет о проектировании полигонов в криолитозоне, где ссылка дается только на СП 2513330, рассматривающих принципы строительства фундаментов на ММГ. Строительство полигонов имеет мало общего со строительством фундаментов, поскольку последнее подразумевает совсем иные методы и технологии строительства как при выборе I, так и II варианта строительства. В частности, для I варианта СП предусматривают вентилируемые подполья, включающие вентилируемые трубы, каналы и другие технологии, например, охлаждающие устройства, а также специальные материалы, что нереально на полигоне ТКО.

Пункт 5.5 этих Правил содержит всего 3 требования в размещению полигонов, где рекомендуют выбирать участки со слабофильтрующими грунтами. Даются рекомендации по размещению полигонов, например, в песчаных степях, полупустыне, которые занимают в нашей стране большие территории.

Согласно п. 5.6. Правил допускается проектирование полигонов ТКО на болотистых почвах, например, на торфяни-

ках, даже при проведении указанных там мероприятий, а именно понижение в таких условиях УГВ до глубины 2 м — просто нерентабельно и часто нереально. Кроме того, не ясно, как это согласуется со Стратегией сохранения водно-болотных угодий России.

Очевидно также, что упомянутый в Правилах двухметровый разрыв УГВ и нижнего уровня грунтовых вод отнюдь не обязателен к соблюдению во всех природных зонах РФ, а также во всех геологических условиях. В частности, в требованиях стран ЕС и других упомянутых выше стран предусмотрен минимум 1 м разрыва.

Это показывает направления дальнейшей деятельности научных организаций по совершенствованию законодательства о ТКО, которое должно быть основано на принципах комплексной оценки предполагаемых для размещения полигонов ТКО территорий, а также разработке на ее основе методических рекомендаций для местных органов охраны природы по учету зональных и геологических условий и оценке существующего и возможного загрязнения компонентов окружающей, в частности, геологической среды. Это предполагает возможность создания к указанным выше нормативным документам соответствующих приложений.

Считаем необходимым особо упомянуть рассмотренный в предыдущей (1.3) главе положительный опыт стран Запада по разработке системы целеполагания при решении сложных, требующих большого числа специалистов, управленцев, общественности и т.д., комплексных проблем, к которым, в частности, относится оптимизация хранения и утилизации ТКО. К сожалению, наши законодатели видят в этом направлении единственный образ действия — создание

нормативной системы запретов и ограничений, без определения целей по разным видам деятельности в части управления отходами, например, в виде директив для соответствующих министерств, ведомств и научного сообщества, которые, продвигаясь одновременно каждый в своем направлении, обеспечили бы оптимальное и быстрое решение этой проблемы.

1.4.3. Проблемы размещения полигонов ТКО в РФ

На сегодняшний день среди граждан России продолжает нарастать социальная напряженность, связанная с функционированием уже существующих и планируемых к созданию объектов полигонов размещения ТКО. Это связано с тем, что во всех субъектах РФ значительная часть объектов размещения отходов не отвечает нормативным требованиям, не соблюдаются требования законодательства, происходит перенаполняемость мест складирования, превышаются ПДК вредных веществ и возникает множество других проблем. Ключевым вопросом, требующим более детальных исследований, остается обоснование выбора земельных участков под строительство полигонов, сортировочных пунктов и заводов переработки, а также установление их санитарно-защитных зон. Решение проблемы обращения с ТКО невозможно без организации контроля за эксплуатацией таких объектов и своевременным внедрением новых технологий.

За последние два десятилетия европейские страны все больше смещают свое внимание в отношении муниципальных отходов с методов утилизации на их предотвращение и переработку. Перемещение управления муниципальными

отходами вверх по «иерархии отходов» необходимо для извлечения большей ценности из ресурсов при одновременном снижении нагрузки на окружающую среду. Юридическая и физическая ответственность за каждую задачу управления отходами делегируется на различных уровнях власти (федеральном, субъекта федерации, муниципальном).

При размещении свалок в ЕС обязательно учитываются акты, связанные с геологической безопасностью. Важно отметить, что для ее обеспечения проект геологических изысканий включает в качестве обязательного элемента выдачу заключения об условиях строительства и использования территории для складирования отходов, как первого шага инвестиционной процедуры проекта.

Согласно действующему в России законодательству, полигоны ТКО размещаются за пределами городов и других населенных пунктов в соответствии с требованиями СП 42.13330 и СанПиН 2.1.4.1110 [пп. 3.6, 3.7]. Минимальное расстояние от полигона до селитебной зоны — 500 м (Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 14.03.2002 г. № 10).

Размещение полигонов ТКО на просадочных грунтах допускается при условии полного устранения просадочных свойств грунтов. Участок для размещения полигона ТКО должен быть не затопляемым или не подтапливаемым. Не допускается использование под полигоны ТКО заболоченных земельных участков и участков с выходами грунтовых вод в виде ключей. Что касается рельефа местности, то участок для размещения полигона ТКО должен располагаться на ровной территории, исключающей возможность смыва атмосферными осадками части отходов. Площадка, предна-

значенная под размещение полигонов ТКО, должна отвечать следующим требованиям:

- иметь грунтовые условия, характеризующиеся однородностью геологического строения в пределах всей площадки;
- иметь гидрогеологические условия, характеризующиеся залеганием водоносных слоев на глубине не менее 5 м;
- отметка основания ложа полигона должна находиться на 2 м выше расчетного горизонта грунтовых вод.

В исключительных случаях, при условии обеспечения организации сбора и удаления талых и ливневых вод, допускается отвод земельного участка под полигоны ТКО на территории оврагов. Отвод талых и ливневых вод должен быть обеспечен путем устройства перехватывающих нагорных каналов с последующим отводом вод в открытые водные объекты.

Полигоны ТКО должны состоять из двух зон: производственной и вспомогательной. Производственная зона состоит из участков: хранения, захоронения, термического уничтожения отходов, участка компостирования. На участке хранения отходов могут размещаться установки по сортировке и измельчению отходов. Во вспомогательной зоне размещаются хозяйственно-бытовые объекты.

Основание и стенки ложа полигона должны состоять из гидроизолирующего материала (глинистые, грунтобитумнобетонные, асфальтобетонные, асфальтополимербетонные, полимерные, геосинтетические, тканевые и другие материалы), обеспечивающего коэффициент фильтрации (проницаемость) с объединенным эффектом не более 10–11 см/с и стойкостью к механическим повреждениям не менее 1,8 кН. Согласно этим правилам, на полигоне устраивается дренажная система, обеспечивающая эффективный сбор и отвод

фильтрата, возможность контроля работоспособности системы и её промывку во время эксплуатации. При этом сбор фильтрата должен осуществляться в специальные устройства с его последующей очисткой и удалением в систему канализации. Поступление загрязненного ливнестока в общегородскую систему дождевой канализации или сброс в ближайшие водоемы без очистки не допускается.

Полигоны ТКО, согласно принятому Своду правил, подразделяют также по мощности и способу захоронения отходов.

По непонятным причинам в принятом Своде правил исчезли пункты, входившие в аналогичный Свод 2016 г., подготовленный Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, включавший следующий пункт: «размещение полигона ТКО не допускается: — на территории I, II и III поясов зон санитарной охраны водоисточников и минеральных источников, в водоохраных зонах водных объектов, а также в первой, второй и третьей зонах округов санитарной (горносанитарной) охраны лечебно-оздоровительных местностей и курортов, в рекреационных зонах». А также «недопустимость размещения в местах выхода на поверхность трещиноватых пород, в местах выклинивания водоносных горизонтов; на участках, загрязненных органическими и радиоактивными отходами».

Надо отметить, что наблюдается продвижение в сторону эффективного использования территории в качестве хранилищ для ТКО. Так, в Москве вступили в действие Постановление Правительства РФ от 31 августа 2018 г. № 1039 «Об утверждении Правил обустройства мест (площадок) накопления твердых коммунальных отходов и ведения их

реестра» (Постановление Правительства РФ от 31 августа 2018 г. № 1039) и Постановление Правительства № 734-ПП от 18.06.2019 г. «О реализации мероприятий по разделному сбору (накоплению) твердых коммунальных отходов в городе Москве» (Постановление Правительства от 18.06.2019 г. № 734-ПП), которые служат предпосылкой к рациональному хозяйствованию отходами, то есть увеличению части перерабатываемых, сжигаемых, используемых в качестве вторичного сырья и уменьшению утилизируемых.

Кроме того, подготовлено Постановление Правительства РФ № 1130 от 22 сентября 2018 г. «О разработке, общественном обсуждении, утверждении, корректировке территориальных схем в области обращения с отходами производства и потребления, в том числе с твердыми коммунальными отходами, а также о требованиях к составу и содержанию таких схем» (Постановление Правительства РФ от 22 сентября 2018 г. № 1130) (не вступило в силу). Предусмотренная Постановлением территориальная схема включает следующие разделы:

- нахождение источников образования отходов;
- количество образующихся отходов;
- целевые показатели по обезвреживанию, утилизации и размещению отходов;
- места накопления отходов;
- места нахождения объектов обработки, утилизации, обезвреживания отходов и объектов размещения отходов, включенных в государственный реестр объектов размещения отходов;
- баланс количественных характеристик образования, обработки, утилизации, обезвреживания, размещения отходов;

- схема потоков отходов от источников их образования до объектов обработки, утилизации, обезвреживания отходов и объектов размещения отходов, включенных в государственный реестр объектов размещения отходов;
- данные о планируемых строительстве, реконструкции, выведении из эксплуатации объектов обработки, утилизации, обезвреживания, размещения отходов;
- электронная модель территориальной схемы и др.

В качестве негативного примера можно привести анализ размещения свалок ТКО на территории Московской области.

Площадь Московской области составляет всего 0,27% от площади РФ, однако на ней располагается 20% всех образующихся в стране бытовых отходов. Согласно официальным данным, общая площадь земель в Московской области, занятых санкционированными и несанкционированными свалками составляет более 700 га, а загрязненных почв на порядок больше. Ежегодно объем твердых коммунальных отходов (ТКО) увеличивается в среднем на 200 млн м³/год. Если полигоны, которые формировались более четверти века назад размещались почти без учета местных особенностей инженерно-геологических условий и проектирования средо-защитных мероприятий, то при создании стихийных, несанкционированных свалок вопрос о них вообще не ставился. К таким объектам можно отнести и территории, на которых размещены промышленные отходы, старые полигоны, участки с наличием иловых осадков сточных вод и др. Эти объекты вследствие их нерекультивированности являются источниками загрязнения, не обеспечивающими требований экологической и геоэкологической безопасности

в одном из самых густонаселенных регионов Российской Федерации.

В пределах Московской области выделяются 5 физико-географических провинций, рельеф и геологическое сложение которых во многом определяют условия функционирования свалок ТБО. К благоприятным условиям необходимо отнести: наличие «спокойного» рельефа, минимального уклона поверхности в сторону рек, преобладание и значительную мощность суглинистых или глинистых пород четвертичных отложений, относительно глубокое залегание грунтовых вод, отсутствие выраженных экзогенных геологических процессов.

Подавляющая часть свалок приходится либо на долины рек, либо на прилегающие территории. Долины рек Московской области, как правило, имеют 2–3 надпойменных террасы, ширина долин очень разнообразна и колеблется в больших пределах от нескольких десятков километров до нескольких сотен метров. В питании рек Московской области 60% годового стока составляют талые снеговые воды, 12–20% — дождевые воды, остальное — родниковые воды. Учитывая преобладание снегового и дождевого питания рек Подмоскovie, а также обязательное наличие уклона поверхности всех террас рек в сторону русла, необходимо признать, что подавляющее большинство свалок МО наносит непоправимый ущерб водам этих рек, их притокам, впадающим в них временным водотокам и ручьям, а также геохимическому состоянию почв террас рек. В этом отношении представляется важным пересмотреть нормы выделения опасных для расположения свалок территорий, которые в Водном кодексе ограничиваются водоохранной зоной, т.е. в зависимости от длины реки шириной 50–200 м. Эти значения, установ-

ленные законодательно, возможно применимы для малых рек, но не могут быть достаточными для таких рек, как, например, Ока, у которой максимальная величина только поймы составляет 2,5 км, а подъем воды в половодье 10–12 м. Понятно, что вышеприведенные значения водоохранных зон к рекам такого и близкого к ним уровня (Москва, Пахра, Клязьма, Дубна и др.) не применимы, хотя они и являются узаконенными.

Также необходимо остановиться на влиянии ветрового переноса выделяющихся свалками вредных газов и примесей. В регионе, где господствуют западные и северо-западные ветры, очень большое количество свалок вблизи Москвы расположено именно на этих направлениях от города.

В связи с этим предлагается не только размещение полигонов ТКО, но и в обязательном порядке их реабилитацию проводить на основе комплексной инженерно-геологической, геоэкологической и ландшафтно-экологической оценок, которые дают объективную картину сложившейся ситуации, а полученные параметры оценки использовать в качестве основных критериев районирования территории для определения перечня региональных требований в составе работ по размещению объектов ТКО и реабилитации территорий.

Пока российские мусорные свалки и отвалы занимают площади, сравнимые с площадью таких государств, как Нидерланды (4,15 млн га) или Швейцария (4,12 млн га), они вдвое больше Израиля (2,2 млн га) или Словении (2,0 млн га). Причем эта площадь ежегодно увеличивается на размер территории Москвы в ее новых границах. Однако, если следовать логике принимаемых решений, а также стандартам ЕС,

то количество свалок и занимаемая ими площадь в последующем должны сокращаться. Так, например, в Германии, где более 60 % муниципальных отходов перерабатывается, уже с 1 июня 2005 года на свалки запрещено сбрасывать необработанные, биоразлагаемые муниципальные отходы, тогда как не подлежащие переработке остаточные отходы должны направляться на механо-биологическую обработку или сжигание отходов. Только остатки от этой обработки и уже инертные отходы размещаются на свалках. К сожалению, эти тенденции в управлении отходами наше российское законодательство полностью игнорирует.

Однако если наши законодатели смогут принять аналогичные решения, вполне можно ожидать значительные перемены не только в изменении количества свалок ТБО и сокращении их площадей, но и в их расположении. В частности, эти свалки станут менее опасными для человека и окружающей природной среды.

1.4.4. Концептуальные предложения по планированию и размещению объектов хранения ТКО в РФ

Для усовершенствования системы хранения ТКО, а также разработки принципов их сегрегации и отдельного хранения, необходимо более четко сформулированное определение того, что является твердыми коммунальными отходами с учетом опыта зарубежных стран.

Проведенный анализ законодательной базы РФ по части размещения отходов показал необходимость привести ее в соответствие с такими законами РФ, как, например, «О недрах», «Об охране окружающей природной среды», «Об экологической экспертизе» и др.

Следует отметить необходимость исследования и подготовки предложений по усовершенствованию подзаконных актов и их взаимной увязки, или, наоборот, дополнить содержание правил, инструкций, лицензий и других документов с учетом достижений в области геоэкологии по разработке принципов защиты и нейтрализации природных факторов, разработанных в ИГЭ РАН.

Имеет смысл рекомендовать органам, разрабатывающим законодательные и другие нормативные акты, принять во внимание опыт стран ЕС, где разработка этих документов подчиняется общим требованиям Сети по выработке решений в области устойчивого развития ООН (SDSN), под которыми подписалась и наша страна. А также принцип установки целей в области управления отходами, разработанных с учетом местных географических, геологических и других условий территорий РФ.

Требования по разработке правил размещения ТКО нуждаются в проведении глубоких, разносторонних исследований и экспедиционных работ в различных ландшафтных условиях — от горных, равнинных до тундровых и арктических, приморских и др.

Большое значение для «естественной переработки» отходов или их консервации в границах полигона приобретают такие свойства геологической среды, как инженерно-геологические и гидрогеологические, минералогические, гидрохимические условия, а также инженерно-геологические процессы, действующие как в природной вмещающей среде — ложе полигона, так и инородного для него (свалочного) тела.

В документах ЕС полигонное захоронение определяется как «наименее желательная опция», которую требуется све-

сти к минимуму, причем такой тип утилизации допускается только для тех отходов, которые прошли специальную предварительную обработку. В российском законодательстве необходимо разработать такую стратегию обращения с ТКО, которая, с одной стороны, отвечала бы указанным выше требованиям, а, с другой — обеспечивала полигонное захоронение ТКО, как наименее желательную опцию управления отходами.

Современный полигон захоронения ТКО должен иметь сложное инженерное оборудование, а также научно обоснованные методические разработки, приборы и инструменты, позволяющие оценивать состояние как отходов, так и полигона на всех стадиях его существования, включая деятельность после его закрытия.

Как показал анализ существующих схем размещения полигонов ТКО, большинство из них не отвечает требованиям, которые заявлены в соответствующем законодательстве (Постановление Правительства РФ от 22 сентября 2018 г. № 1130). Необходимо привести установленные требования к реально существующим природным и геологическим условиям территорий, а также на государственном (федеральном, региональном и муниципальном) уровне осуществить их принятие с учетом всех законодательно установленных критериев приемки документов такого типа.

Как создание «площадки» будущего полигона, так и его размещение определяет «орган местного самоуправления» на основании заключения «органа исполнительной власти, уполномоченного осуществлять федеральный государственный санитарно-эпидемиологический надзор». Другие организации, например, органы охраны природы, в том числе экологической экспертизы, недропользования и т.д.,

в данном документе не упоминаются, т.е. не участвуют в принятии этих решений. Необходимо дополнить Постановление Правительства РФ от 31 августа 2018 г. № 1039 «Об утверждении Правил обустройства мест (площадок) накопления твердых коммунальных отходов и ведения их реестра» соответствующими органами, ведущими указанный выше контроль и охрану окружающей среды.

СП 320.1325800.2017 г. «Полигоны для твердых коммунальных отходов. Проектирование, эксплуатация и рекультивация» не содержат конкретных сведений по геологии, гидрологии, гидрогеологии, нахождении относительно ООПТ, населенных пунктов, экологической ситуации территории проектирования и т.д., ограничивающих размещение полигонов. Для этого необходима разработка соответствующих методических рекомендаций, исключающих нанесение природной и, в частности, геологической среде и здоровью населения необратимого ущерба.

Устранить отсутствие в законодательстве об отходах каких-либо связей с законом «О недрах».

Законодательство об отходах не содержит требования и рекомендации по утилизации ТКО в условиях горных, предгорных, приморских территорий, в долинах рек, а также различных природных зон и подзон РФ, с существенно разными климатическими и другими факторами воздействия на тело полигона и массу отходов.

Упомянутые в СП 320 13330 требования по размещению полигонов ТКО не дают необходимого комплекса рекомендаций с учетом их размещения в криолитозоне. Так, ссылка на СП 25 13330, касающаяся строительства фундаментов для строительства полигонов в криолитозоне, совершенно недостаточна. Необходима разработка в этом случае, как и для

других специфических условий, специальной методической нормативной базы.

Следует на основании зарубежного опыта разработать отечественную классификацию свалок и нормативные требования, в которых станет возможным обеспечение более строгого соблюдения геологической безопасности полигонов ТКО.

Нормативные документы стран ЕС и других государств содержат обязательное требование постоянного обучения персонала полигонов ТКО с целью его ознакомления с методическими и законодательными документами, обеспечивающими совершенствование эксплуатации полигонов, исключая отрицательное воздействие свалок на природную среду прилегающей территории и населенных пунктов. Необходимо нормативные документы РФ дополнить этим требованием.

Глава 1.5. Что лучше: сжигать или разлагать ТКО?

(В.И.Осипов, В.Г. Заиканов)

Сегодня в системе обращения с ТКО в России наблюдается ряд медленно решаемых проблем. Например, широко используемый метод полигонного захоронения ТКО — основной элемент системы обращения с отходами — уже сам по себе является источником экологической опасности. Часто используемое термическое обезвреживание ТКО в качестве основы для функционирования системы обращения с отходами не находит поддержки со стороны населения. В сложившихся условиях требуется поиск оптимального подхода, позволяющего без ущерба для окружающей среды и населения сформировать основу для дальнейшего стабильного функционирования отрасли.

Многие европейские страны используют технологию захоронения ТКО в геологической среде. Меньше всего отходы захоранивают в странах, испытывающих дефицит свободных территорий (Бельгия, Дания, Нидерланды, Швеция и Германия). Наряду с этим практически половина европейских стран захоранивает более 50% отходов. Лидирующее положение среди них занимает Россия, где объём захоронения составляет 94%. Захоронение как основная форма обращения с отходами в нашей стране обусловливается слабым уровнем развития сортировки и переработки ТКО, а также отсутствием материальных стимулов обращения с отходами, системы экологических услуг, недостаточным учётом отходов — источника вторичных ресурсов. В результате сформировалось отношение к отходам как к непроизводительной сфере деятельности, которую можно осуществлять с мини-

мальными финансовыми затратами без внедрения современных технологий и выполнения экологических требований. Этим объясняется разница в стоимости переработки одной тонны отходов в нашей стране и за рубежом. По оценке зарубежных специалистов, затраты на переработку 1 т ТКО с помощью современного мусоросжигательного завода составляют около 1000 евро (Отходы в России: мусор или ценный ресурс), в то время как в нашей стране на эти цели направляется 1,5–2 тыс. руб. Сравнительная характеристика свидетельствует о необходимости проведения в России срочных мероприятий для решения проблем обращения с отходами (Осипов, 2021).

Основными требованиями к внедрению нового подхода должны стать: а) безопасность для здоровья населения и окружающей среды; б) способность оперативно решать накопившиеся проблемы отрасли; в) создание основы для дальнейшего устойчивого развития отрасли, позволяющей решать существующие и вновь возникающие проблемы экономически эффективно и с минимальным ущербом.

Сейчас идёт обсуждение поставленных задач. Одна из важнейших – выбор современной технологии обезвреживания и ликвидации не утилизируемых отходов. При этом рассматриваются два альтернативных подхода: сжигание и разложение.

Сжигание. Сжигание отходов используется человеком в быту с древних времён. В 1930 г. в Швейцарии для промышленных целей впервые разработали печь, на основе которой была создана технология слоевого сжигания или сжигания на колосниковой решётке. Вслед за этим появились мусоросжигательные заводы (МСЗ). В 1960–1990 гг. в странах ЕС, Японии, США и Канаде было построено более 2500 МСЗ,

в том числе 600 — в Европе. Это дало возможность только на европейском континенте ежегодно перерабатывать более 58,5 млн т отходов и получать 23,4 МВт энергии. Мировыми лидерами в мусоросжигании являются Дания и Швейцария, где сжиганию подвергается около 80% твёрдых коммунальных отходов (в Швейцарии по состоянию на начало 2010-х гг. функционировало 37 мусоросжигательных заводов, т.е. в среднем по одному заводу на каждые 200 тысяч жителей). Несколько меньший уровень сжигания отходов (около 70%) — в Японии. В Швеции, Финляндии и Бельгии сжигается порядка 50–60% отходов (а Швеция и Финляндия, наряду со Швейцарией, находятся в числе лидеров по энергетическому использованию мусоросжигания); в Германии, Австрии, Франции и Италии этот показатель составляет около 20–40%. Франция при этом является лидером по количеству мусоросжигательных заводов на территории одной страны — там их около 300. Среди стран Европейского союза (где в среднем уровень сжигания мусора составляет 25%) наименее развито мусоросжигание в Румынии и Болгарии, где сжигается только 1% отходов. В странах, где зародилось мусоросжигание, — Великобритании и США — его уровень также относительно невысок: в обеих этих странах сжиганию подвергается около 10% отходов (Алексашина, 2014; Рыбальченко, Рыбальченко, 2019, 2019а).

В России мусоросжигание пока что не получило широкого развития. На вторую половину 2010-х гг. уровень сжигания отходов в стране составил около 2,3%. В России по состоянию на 2019 г. насчитывается только 10 мусоросжигательных заводов (из которых три расположены в Москве), но при этом планируется существенное увеличение их количества, в том числе в рамках стартовавшего в конце 2010-х гг.

проекта «Энергия из отходов» компании «РТ-Инвест» в сотрудничестве с японско-швейцарской компанией «Hitachi Zosen INOVA».

Вместе с тем технология сжигания имеет ряд недостатков, связанных с её безопасностью. При колосниковом сжигании мусора образуется множество вредных соединений — углеводороды, хлорированные фенолы, бром- и азот-замещённые вещества, которые не присутствовали в исходном материале. Наибольшую опасность представляет содержащийся в газообразных и твёрдых продуктах переработки диоксин — крайне опасное вещество, чрезвычайно вредное для человеческого организма, который способствует возникновению онкологических заболеваний, угнетает иммунитет и репродуктивные функции. Более того, образующиеся при сжигании шлак и пепел могут загрязнять почву и воды мышьяком, свинцом, кадмием и другими тяжёлыми элементами. Это исключает их утилизацию и требует захоронения на специальных полигонах. Диоксины и фураны, обладающие высокими токсичными свойствами, образуются при неполном окислении ароматических углеводородов. Опасные газообразные соединения вместе с продуктами неполного сгорания загрязняют окружающую среду до уровня, значительно превышающего предельно допустимые нормы. Об этом свидетельствует опыт сжигания отходов в нашей стране. Начиная с 1972 г. в СССР и СНГ по проектам Института «Гипрокоммунэнерго» в Москве, Мурманске, Владимире, Владивостоке, Киеве, Севастополе и Харькове было построено 11 мусоросжигательных заводов, предназначенных для прямого уничтожения ТКО. Однако позже по требованию Госкомприроды СССР большинство из них закрыли по экологическим соображениям (Осипов, 2021).

По оценке И.М. Мазурина и В.В. Понуровской, в результате строительства МЗС в Москве по проекту фирмы “Hitachi Zosen Inova” уже через 10–12 лет 80 км² площади вокруг завода может быть загрязнено выше допустимой нормы, что потребует очистки территории (Мазурин и др., 2017, 2018). Это заключение подтверждается опубликованными в зарубежной литературе данными по увеличению заболеваний раком населения, проживающего вблизи таких заводов, а также медицинскими данными токсического и генетического воздействия на человека даже относительно невысокого (10–10–10–12 г/кг) содержания диоксинов (Elliott et al., 2000; Garsia-Pereza et al., 2013). Начиная с 1990-х гг. технология сжигания пополнилась новыми методами очистки газов, стали применяться методы дожигания с высокотемпературным воздействием. Как результат – снизилась концентрация диоксинов в выбрасываемых газах. Повысилось качество очистки, что привело к существенному увеличению стоимости технологии сжигания. Тем не менее её нельзя считать отвечающей современным требованиям экологической безопасности (Мазурин и др. 2018; Рыбальченко, Рыбальченко, 2019; Жарков, 2020; Мазурин, Понуровская, 2017). Эта точка зрения нашла своё подтверждение в позиции Европейского союза, который в 2017 г. провозгласил постепенный отход от данной технологии. Позиция России на этот счет и органы, принимающие решение по управлению отходами, приняли обратное решение о признании в нашей стране сжигания в качестве базовой технологии обращения с ТКО. В подтверждение этому в 2017 г. было подписано соглашение о строительстве в России четырёх МЗС (Соглашение № 118 от 06.07.2017 г.).

В Российской Федерации с 2019 г. реализуется национальный проект «Экология», направленный на создание высокотехнологического уровня управления отходами, внедрение индустриальных методов обращения с ТКО. Проектом предусматриваются меры более широкого вовлечения ТКО в хозяйственный оборот в качестве сырья и превращение отходов во вторичные ресурсы для изготовления продукции и получения энергии. Новая система обращения с отходами предусматривает: раздельный сбор отходов, изменение нормативов их накопления, актуализацию нормируемых тарифов на вывоз отходов, обоснование платежей за негативное воздействие на природную среду, внедрение мер налогового стимулирования деятельности организаций, совершенствование логистических схем обслуживания объектов по переработке отходов.

Согласно проекту «Экология», из 70 млн т отходов, ежегодно образующихся в России, примерно половина будет отнесена к не утилизируемым, что потребует их обезвреживания методом сжигания. При ежегодной производительности МСЗ до 650 тыс. т для этого предстоит построить не менее 50 заводов. По нашему мнению, с экономической точки зрения реализация такого проекта в ближайшие годы трудновыполнима. Технология сжигания отходов на колосниковой решётке с трёхступенчатой системой очистки, предлагаемая зарубежными фирмами, не соответствует современному уровню научно-технического прогресса и не обеспечивает необходимую экологическую безопасность.

Пиролиз и плазменная обработка. Как было показано в главе 1.2, сегодня в качестве альтернативы сжиганию разрабатываются технологии, основанные на термическом разложении перерабатываемых материалов. Применение тер-

мических технологий практически исключает выбросы в атмосферу опасных газов и полностью предотвращает образование загрязнённых шлаков, золы и пепла. Наибольшее распространение среди методов деструкции получил пиролиз. Процесс основан на температурной обработке отходов при отсутствии кислорода.

Более распространена технология низкотемпературного пиролиза, при котором разложение отходов происходит при температурах ниже 900°C (как правило, 400–600°C). Пиролизная печь, в которой перерабатываются отходы, состоит из двух камер сгорания: нижняя камера сжигания отходов и верхняя камера дожигания генераторных газов. Перед загрузкой в печь масса отходов подвергается измельчению и затем помещается в нижнюю камеру, где сгорает в бескислородной среде. Газы, образующиеся при разложении, через инжекторное устройство направляются в камеру дожигания, куда в ограниченных количествах подаётся кислород, а также катализирующие газы. Там происходит дальнейшее разложение газов, в результате чего содержание токсичных веществ в выбросах при пиролизе примерно в 7 раз ниже предельно допустимых концентраций. Печь вращается со скоростью от 0,05 до 2 оборотов в минуту, способствуя равномерному прогоранию отходов. Таким образом, эффективность технологии пиролиза заключается в сокращении количества вредных выбросов и уничтожении биологически активных веществ, что позволяет в дальнейшем складировать пиролизные отходы без большого вреда для окружающей среды. Помимо этого, твёрдый осадок, а также жидкости и газы, образующиеся в результате пиролиза отходов, могут использоваться в качестве сырья в химической промышленности или топлива.

Технология **газификации** отходов предполагает высоко-температурный пиролиз, проводимый при температурах 1000–1200°C. Основная особенность газификации отходов заключается в получении в результате процесса синтез-газа (смеси водорода с монооксидом углерода), используемого в энергетике, а также побочных соединений, содержащих фтор, хлор, азот, и применяемых в химической промышленности.

Пиролиз относится к одному из перспективных методов уничтожения отходов, содержащих трудно поддающиеся де-струкции компоненты – пластмассу, автопокрышки, медицинские отходы. При этой технологии невозможен ресинтез опасных веществ типа диоксинов и фуранов. На выходе получается безопасное газообразное вещество (синтез-газ), обладающее высокой удельной теплотой сгорания, которое можно использовать в качестве топлива и сырья для химической промышленности, и твёрдый осадок, входящий в состав образующихся шлаковых материалов. Переработка отходов с применением пиролиза и газификации позволяет полностью предотвращать образование опасных соединений и утилизировать продукты переработки. Поэтому высокотемпературная обработка обладает рядом преимуществ, которые позволят ей в ближайшем будущем занять приоритетное место среди систем по обращению с отходами. Высокотемпературные технологии всё шире применяются в Японии, Англии, Китае, Канаде и США. Они разрабатываются и в России. Отечественные специалисты предложили не менее 13 оригинальных разработок, некоторые из них не имеют мировых аналогов (Рыбальченко, Рыбальченко, 2019; Мазурин, Понуровская, 2017; Сосновцев, Рыбальченко, 2019; Леонтьев, 2021).

Процесс мусоросжигания образует определённое количество твёрдых и газообразных отходов. Они могут использоваться в дальнейшем в качестве вторичного сырья в химической промышленности или энергетике (синтез-газ при газификации отходов), но чаще попадают в окружающую среду. Степень воздействия мусоросжигания на окружающую среду тем меньше, чем выше степень разложения мусора при сжигании, а она, в свою очередь, становится максимально высокой при сортировке ТКО перед сжиганием, с удалением из них негорючих и подверженных гниению компонентов, а также правильной эксплуатации мусоросжигательных печей, в которых поддерживаются необходимые как температура, так и концентрация обогревающих газов. При использовании технологии пиролиза обязательным условием для сокращения выбросов является вторичное дожигание газов. Кроме того, дымовые газы при мусоросжигании содержат мелкодисперсные частицы, которые требуют дополнительной фильтрации.

Основным компонентом дымовых газов, образующихся при сжигании ТКО, является углекислый газ: массовая доля углерода в газе равна той, что была в сожжённых отходах. В теории, выделенный диоксид углерода впоследствии будет изъят из атмосферы при фотосинтезе.

В дымовых газах в меньшей степени содержатся оксиды азота и серы, хлороводород и фтороводород, соединения тяжёлых металлов (кадмия, свинца, ртути). Особое внимание привлекают выбросы токсичных фуранов, а также диоксинов, образующихся при сжигании хлорсодержащих полимерных материалов (к примеру, поливинилхлорид). Основная доля поставки этих веществ в окружающую среду приходится именно на мусоросжигание. Это относится

не столько к мусоросжигательным заводам, сколько к неконтролируемым пожарам на свалках и индивидуальному бытовому сжиганию мусора, где по определению нет систем очистки. На мусоросжигательных заводах выбросы диоксинов фильтруются преимущественно путём адсорбции (в основном при помощи активированного угля). Также для расщепления диоксинов и фуранов используют вторичное дожигание газов, так как температура в камере первичного сгорания мусора недостаточно высока.

После мусоросжигания остаётся зола, она составляет порядка 4–10% объёма мусора и около 15–20% от его массы.

Однако пиролиз и плазменные технологии не входят в государственный перечень наилучших доступных технологий, в котором приоритетное место занимает технология сжигания (Рыбальченко, Рыбальченко, 2019).

Полигонная технология. Рассмотренные технологии сжигания и пиролиз не относятся к природоподобным, поскольку в естественных условиях отходы не сжигаются и не подвергаются высокотемпературной обработке, а происходит их биоразложение и деструкция. Процесс биоразложения — это распад органического вещества в условиях недостатка кислорода с образованием биогаза. Уход биогаза сопровождается дальнейшей деструкцией разлагающихся веществ и их распадом. Образующиеся продукты распада участвуют в процессах синтеза и естественного оборота веществ в биосфере. Таким образом, медленно развивающийся процесс биоразложения в природных условиях постепенно приводит к уничтожению и захоронению остатков органических соединений. Из-за медленного развития биоразложения все изменения, связанные с выходом биогазов, загрязнением подземных вод, синтезом новых компонентов, нивелируются

самой природой (подробнее о полигонной технологии см. гл. 1.6).

Несмотря на широкое применение в РФ полигонного захоронения, данный подход обладает рядом серьезных недостатков. Полигоны захоронения ТКО оказывают значительное негативное воздействие на здоровье населения и окружающую среду (далее – ОС). Так, они загрязняют почвенный покров тяжелыми металлами; водную среду, в связи с попаданием фильтрата в подземные воды; воздушную среду, за счет поступления в атмосферу свалочного газа и продуктов его горения. Более половины всех состоящих на учете объектов с особо значительным вредным воздействием на окружающую природную среду составляют свалки и полигоны ТКО (Паспорт национального проекта «Экология»). Неудовлетворительная экологическая ситуация в районе полигона ТКО, по некоторым оценкам, наблюдается спустя 20–50 лет после их закрытия (Плужникова, Иванникова, 2018). Главным образом это связано с несоблюдением требований по строительству и эксплуатации полигонов (Мазурин, 2018), а также с распространением незаконных свалок.

Биологические способы утилизации ТКО. Существует два основных способа биологической утилизации ТКО: аэробное компостирование с получением компоста и анаэробное сбраживание с получением биогаза. Данные способы утилизации ТКО более предпочтительны по сравнению с полигонным захоронением, поскольку они не оказывают такого существенного негативного воздействия на здоровье населения и ОС. Однако они также обладают рядом недостатков, которые существенно ограничивают их применение. Биологической утилизации может быть подвержена только орга-

ническая фракция ТКО, составляющая 30–40% всего объема (Мазурин и др., 2018).

Для эффективного протекания биологической утилизации в аэробных или анаэробных условиях необходимо определенное соотношение углерода, азота и фосфора (Рыбальченко, Рыбальченко, 2019), которое не соблюдается в органической фракции ТКО, поэтому возникает необходимость внесения навоза, куриного помета, активного ила, что требует дополнительных ресурсов и затрат. В итоге биологической утилизации, как правило, подвергаются сельскохозяйственные отходы с высоким содержанием органики и отсутствием опасных компонентов (Жарков, 2020; Мазурин, Понуровская, 2017). Конечные продукты обоих методов биологической утилизации также характеризуются экологической и экономической нестабильностью. Так, компост, образующийся в результате компостирования ТКО, часто содержит значительное количество загрязняющих примесей, в первую очередь тяжелых металлов (Соглашение № 118 от 06.07.2017), вследствие невозможности полного удаления из ТКО этих фракций, что делает данный процесс экологически небезопасным и экономически неэффективным (Швейцарские технологии...). Биогаз, полученный при анаэробном процессе, обладает нестабильным составом и большим количеством примесей (Сосновцев, 2018) и требует дополнительной очистки. Большим потенциалом обладает технология получения биогаза на полигонах ТКО. В толще полигонов естественным образом протекает метановое брожение отходов и образование биогаза (свалочного газа). В отсутствие контроля данный процесс приводит к выбросу парниковых газов и загрязняющих веществ в атмосферу, возгораниям на полигонах и выбросам продуктов горения

ТКО, однако контролируемая добыча свалочного газа позволяет снизить негативное воздействие на здоровье населения и ОС и повысить экономическую эффективность полигонного захоронения.

Проведенный сравнительный анализ подходов к утилизации и обезвреживанию ТКО показал следующее. Полигонное захоронение ТКО в существующей форме нельзя рассматривать как способ реформирования этой отрасли экономики, поскольку оно оказывает значительное негативное влияние на здоровье населения и загрязнение окружающей среды, требует отчуждения земельных ресурсов. Вместе с тем единовременно и полностью отказаться от полигонного захоронения ТКО не представляется возможным, поскольку ни одна технология или комплекс технологий не позволяют утилизировать 100% образующихся ТКО. Например, в Японии, где наиболее остро стоит вопрос свободных территорий, ежегодно захоронению подлежит порядка 1% ТКО, т.е. около 500 тыс. т (Васильева, 2021).

В этой связи наиболее обоснованным представляется следующий подход в отношении полигонного захоронения:

1. Закрытие и рекультивация полигонов ТКО, которые оказывают наибольшее негативное воздействие на здоровье населения и ОС.

2. Реконструкция действующих полигонов в соответствии с существующими техническими, экологическими и санитарно-эпидемиологическими требованиями.

3. Необходимо рассмотреть возможность внедрения природоподобной полигонной технологии с получением свалочного газа на полигонах ТКО, чем повысить экономическую эффективность функционирования полигонов ТКО.

4. Создание новых полигонов ТКО на принципах безопасного полигона (см. главы 2.1, 2.5) (Осипов, 2021). При использовании любой технологии неизбежно захоронение определённого процента ТКО, а недостаток мощностей полигонов вновь приведет к распространению незаконных свалок.

Технология аэробного компостирования не отвечает ряду требований: она способна переработать лишь небольшую часть ТКО и не гарантирует экологическую безопасность. Технология анаэробного сбраживания с получением биогаза требует большого содержания органической фракции, что не соблюдается в случае с ТКО. Однако данная технология перспективна вкупе с полигонным захоронением ТКО или же в случае внедрения системы раздельного сбора, позволяющей выделять органическую фракцию. Технология термического обезвреживания ТКО представляется на первый взгляд перспективным решением существующих проблем отрасли: она отличается большой производительностью, не требует создания принципиально новой системы обращения с отходами и способна обеспечить экологическую безопасность. Главным недостатком МСЗ является их крайне высокая стоимость. Однако использование термического обезвреживания ТКО в качестве единственного способа утилизации представляется нерациональным по следующим причинам: 1. Технология мусоросжигания изначально предполагает наличие несжигаемых остатков, подлежащих захоронению. Поэтому при развитии технологии мусоросжигания необходимо обеспечить развитие отрасли захоронения отходов. В настоящий момент представляется нерациональным отсутствие в программе «Чистая страна» вопроса развития системы полигонного захоронения кроме ликвидации

полигонов и рекультивации их территорий. 2. Срок службы МСЗ, строительство которых заявлено в программе «Чистая страна», составляет 30 лет (2021–2051 гг.). Исходя из этого очевидна необходимость в комплексном развитии области утилизации и обезвреживания ТКО. Систему раздельного сбора ТКО невозможно создать и внедрить в краткие сроки, поэтому данный подход невозможно рассматривать как способ выхода из сложившейся кризисной ситуации. Вместе с тем, раздельный сбор ТКО обладает большим потенциалом в качестве основы для дальнейшего устойчивого функционирования отрасли обращения с ТКО в силу повышения эффективности обезвреживания и утилизации ТКО другими способами и развитию отрасли вторичной переработки. Таким образом, наиболее оптимальным способом выхода из сложившейся кризисной ситуации в области утилизации и обезвреживания отходов с учетом скорости выхода из кризиса, безопасности для здоровья населения и окружающей среды, и возможности формирования устойчивой системы обращения с отходами является комплексный подход с преобладанием применения полигонной технологии для разложения органических составляющих ТКО.

Исходя из требований реформирования российской экономики и учитывая научно-техническое отставание страны в сфере обращения с ТКО, необходимо пересмотреть развитие этой отрасли производства с учётом зарубежной практики, а также отечественного опыта и рынка. Стратегия управления отходами должна быть экономически доступной, социально приемлемой и экологически безопасной.

Часть 2. Научно-методические основы обеспечения геоэкологической безопасности полигонов ТКО

Глава 2.1. Полигонная технология обращения с ТКО как природоподобный процесс

(В.И. Осипов, В.Г. Заиканов, И.Н. Заиканова)

2.1.1. Основные принципы и этапы функционирования полигонов ТКО

Сегодня в России захоронение ТКО на полигонах является наиболее распространенным методом их обезвреживания, на которое за рубежом направляется 60% и более, а в России около 94% от объема образованных ТКО. В России размещение ТКО на полигонах и свалках происходит, как правило, без предварительной обработки и практически при отсутствии системы отдельного сбора и извлечения вторичного сырья. При захоронении только органических компонентов полигоны функционируют как большие биохимические реакторы, в которых осуществляются процессы трансформации органических веществ, их разложение с образованием биогаза и фильтрата, что создает геоэкологическую опасность загрязнения компонентов окружающей среды и ухудшает комфортность и безопасность проживания населения. Крупные полигоны занимают большие территории и требуют, хотя и временно, изъятия значительных земельных ресурсов. Это определяет необходимость раз-

работки и реализации новой концепции экологически безопасного и экономически эффективного захоронения ТКО.

Современная политика в сфере управления отходами, главным образом, ориентирована на снижение количества образующихся отходов и на развитие методов их максимального использования. Системный подход к управлению отходами требует рассматривать полигон как неотъемлемую часть системы движения отходов, направленную на минимизацию захоронения отходов и их не утилизируемых остатков. Традиционно полигоны (а до этого свалки) считались объектами окончательного и безвозвратного размещения отходов. Обычно процессы, происходящие в массиве отходов, ведут не только к образованию эмиссий, но и к деструкции и синтезу органических веществ, содержащихся в отходах. С этой точки зрения рассмотрение полигона захоронения ТКО как биохимического реактора приобретает иной смысл. В результате функционирования такого реактора складированные ТКО подвергаются переработке с образованием конечного продукта, представляющего собой смесь инертных фракций и продуктов разложения отходов. Проведенные исследования показывают, что в массиве полигона ТКО после завершения процессов активного биоразложения кроме инертных и медленноразлагаемых веществ остаются продукты биоразложения органических фракций ТКО (Вайсман, 2012).

Реализация системного подхода позволяет извлекать ресурсы, накопленные на полигонах захоронения, возвращать площадки, занятые отходами, в многократное использование. При этом перед новым циклом использования полигон может быть приведен в соответствие с действующими на тот период техническими и экологическими нормативами. Ре-

куперация площадок исключает из практики такую социальную и экологически сложную процедуру, как выбор новых площадок для размещения полигонов.

Можно сказать, что полигонная технология обращения с отходами (ТКО) — это многоступенчатая процедура, которая включает ряд последовательных этапов, таких как сортировка отходов, поиск и обоснование места размещения полигонов, контроль за процессами разложения и нейтрализации продуктов разложения, рекультивацией полигонов, с мониторинговым контролем и возвращением земель бывших полигонов в хозяйственный оборот. Полигонная технология позволяет через 100–120 лет, а может быть, и раньше вернуть используемые земли в народное хозяйство и использовать их без ограничений, в том числе под повторное захоронение. Такая технология может быть названа *природоподобной*.

Деятельность полигона ТКО определяется жизненным циклом самих отходов и охватывает весь период его функционирования. Под периодом опасного функционирования полигона понимается время, в течение которого размещенные в полигоне отходы сохраняют потенциальную опасность загрязнения окружающей среды. В жизненном цикле объекта захоронения ТКО выделяются несколько этапов.

Первый этап существования полигонов можно определить как *проектный*, который включает в себя обоснование инвестиций (предпроектную проработку — вариантность) и собственно инвестиционный (проектный). Длительность этапа может составлять до 5 лет. На этом этапе обосновывается и утверждается выбор участка, выполняются инженерные изыскания, проектирование, обосновываются проектные и конструктивные решения, утверждается технология производства строительства, прорабатываются меры безопас-

ности полигона для окружающей среды и способы защиты от негативного воздействия на человека, осуществляется экспертиза проекта.

Второй этап — *эксплуатационный*. Его длительность определяется 30–40 годами, реже — меньше или больше. Это этап осуществления работ по формированию массива отходов, по приемке, складированию, изоляции свалочного тела и мониторингу состояния полигона и окружающей среды. Обязательным является управление эмиссией и телом свалки (геометрия, просадки, провалы) и их мониторинг.

Третий этап — *рекультивационный* — продолжается обычно 30–40 лет, но может охватывать и меньшее количество времени, в зависимости от размеров полигона и накопленных отходов. Рекультивация закрытых полигонов обычно включает комплекс мероприятий, направленных на восстановление территорий и улучшение качества окружающей среды. Рекультивация поверхности полигона включает технический и биологический этапы и проводится с учетом выбора её направления (сельскохозяйственное, лесохозяйственное, рекреационное и др.). На этом этапе обязателен мониторинг и управление телом свалки.

В четвертом — *пострекультивационном* этапе — выделяется два периода: начальный и конечный. Эти периоды не имеют четкого временного деления. Но первый из них длится не менее 40 лет и заканчивается тогда, когда данные экологического мониторинга определяют, что свалочное тело не представляет серьезной опасности и его можно использовать в народном хозяйстве с некоторыми ограничениями. Поэтому срок жизни полигона может составлять в среднем от 100 до 120 лет и более. Далее наступает конечный пострекультивационный период, который может длиться не-

ограниченно долго, но это уже фактически не полигон, а территория, возвращенная в хозяйственный оборот. Период характеризуется тем, что бывшее свалочное тело можно использовать вначале ограничено, а затем без ограничений, основываясь на данных экологического мониторинга.

2.1.2. Процессы разложения отходов и воздействие полигона на окружающую среду

Основными видами воздействия полигона на окружающую среду являются: привнос в атмосферный воздух газообразных веществ от выбросов биогаза с участка депонирования ТКО, в поверхностные воды — свалочного фильтрата, отводимого из тела полигона, и загрязнение геологической среды и почв. Потенциальная опасность загрязнения становится реальностью, если не создаются защитные барьеры на пути развития опасных воздействий. Для того чтобы создавать эти барьеры или эффективно использовать существующие природные, необходимо иметь представление о возможных видах вредных воздействий полигона ТКО на окружающую среду.

В морфологическом составе ТКО на полигонах захоронения содержится до 60–70% органической фракции, взаимодействие которой с остальными компонентами — кислородом, водой и другими химическими элементами и веществами — претерпевает ряд изменений. Результатом реакций, протекающих в теле полигона, становится фильтрат, который является одним из важнейших отрицательных факторов воздействия свалки на окружающую среду.

Деградация органического вещества свалочного тела проходит по различным механизмам, но основной из них —

это микробиальная деградация в аэробных и анаэробных условиях. Биодеградация наиболее полно осуществляется в условиях, пригодных для жизни микроорганизмов (определенный для каждой трофической группы температурный интервал, влажность, рН).

В процессе разложения отходов выделяются пять этапов.

Первый этап (аэробная фаза) характеризуется расходом кислорода и нитрата. Присутствующие в свежих отходах сахара (углеводы) преобразуются в диоксид углерода и воду, при этом происходит снижение рН от 7,5 в отходах до 6,2 (Barlaz et al., 1989). Прежде всего, органическое вещество подвергается процессу гидролиза. Гидролиз входящих в состав биодеградируемых отходов белков, жиров и углеводов сопровождается образованием более простых соединений. Обычно аэробная фаза разложения органики длится от 1 года до 10 лет, что определяется условиями складирования отходов и режимом рециркуляции фильтрата (Ehrig, 1983; Harmsen, 1983). По мере расходования кислорода активность аэробных процессов снижается, в качестве окислителей используются такие соединения, как нитраты, сульфаты, оксиды железа и марганца. В массиве начинают преобладать анаэробные условия, чему способствуют уплотнение и перекрытие отходов новыми слоями.

Второй этап — анаэробная кислая фаза (ацетогенез). Трансформация сахаров, начавшаяся в аэробных условиях, продолжается в анаэробных условиях в фазе ацетогенеза (кислотообразования). Анаэробная кислая фаза характеризуется накоплением карбоновых кислот и дальнейшим снижением рН до 5,7. Размеры микробиальных популяций возрастают при переходе от аэробных условий к анаэробным.

Третий этап — стадия активного метаногенеза — характеризуется снижением содержания карбоновых кислот, сопровождающимся резким ростом скорости образования метана. Потребление кислот микроорганизмами превышает скорость гидролиза отходов. Концентрация сульфата увеличивается до начала заметного образования метана, а затем уменьшается.

Максимальная степень разложения органического вещества достигается *на четвертом этапе*, когда образование метана замедляется (стадия стабильного метаногенеза). Содержание карбоновых кислот падает до предела обнаружения, рН среды возрастает до значений выше 8. Снижение содержания целлюлозы и медленный гидролиз оставшихся твердых отходов, которые обогащены лигнином, тормозят процесс образования метана. На этой стадии деградация органических веществ идет медленно, ее скорость зависит от условий окружающей среды. После резкого роста на третьем этапе скорости образования метана на четвертом этапе наблюдается ее устойчивое снижение, а также уменьшение концентрации карбоновых кислот.

Не более 30% органического вещества на полигонах ТКО разлагаются полностью с образованием метана. Большое количество органического углерода представлено трудно разлагаемыми веществами и надолго остается в теле свалки.

Заключительным, *пятым этапом является гумификация свалочных отходов*. В процессе трансформации в свалке остается твердая фаза, устойчивая к микробиальной деградации.

Этапы ацетогенеза и активного метаногенеза могут продолжаться до 30–40 лет, а при низком содержании влаги (< 40%) — до 50 лет.

Образование экологически опасных продуктов при разложении отходов. Известно, что основными загрязнителями природной среды на территориях размещения свалок и полигонов ТКО являются фильтрат и биогаз.

Газообразные продукты возникают в результате брожения материала ТКО и формирования биогаза (свалочного газа). Биогаз состоит на 95–98% из метана и углекислого газа. Одна тонна ТКО может служить источником образования до нескольких сотен кубометров биогаза.

При взаимодействии содержащейся в свалочном теле воды с твердыми компонентами образуются растворы, загрязненные неорганическими и органическими веществами. Поступление фильтрата в подземные и поверхностные воды приводит к их значительному загрязнению.

В природных условиях газовые образования и жидкие растворы, образующиеся при разложении отходов, хорошо ассимилируются биосферой. Однако в условиях техногенеза природный процесс их разложения усложняется за счет увеличения массы отходов и появления в избыточном количестве газообразных и жидких соединений. Это приводит в местах скопления отходов к превышению экологической емкости биосферы и утилизации продуктов разложения. В результате образующиеся газообразные и жидкие продукты распространяются вокруг свалки, загрязняя прилегающие территории.

Кроме химического воздействия полигон ТКО оказывает **влияние на водные экосистемы**. Практически изменяется водный режим на территории, площадь которой превышает площадь самого полигона, в частности: а) изменяется распределение по территории поверхностного стока вследствие отвода части его от площади полигона и изменения водного

режима на территории полигона; б) изменяется режим подземных вод вследствие изменения баланса «осадки — инфильтрация — сток» на территории полигона и вокруг него; в) возникает опасность утечки с территории полигона загрязненных стоков. Наиболее негативное влияние на окружающую среду оказывают утечки с территории полигона загрязненных стоков, поскольку они приводят к качественным изменениям водных объектов, прежде всего — изменениям химического и бактериологического состава поверхностных и подземных вод, а также почв. Основным источником загрязнения прилегающих территорий является фильтрат, мигрирующий через тело полигона. Фильтрат представляет собой сложный насыщенный высокоминерализованный раствор различных загрязнителей. Формирование в толще отходов фильтрата начинается при массовой влажности отходов 30%. Сроки выхода фильтрата из тела полигона зависят от гидрогеологического строения участка и могут колебаться от нескольких месяцев до нескольких лет. Практика свидетельствует об ухудшении гидрохимических и санитарно-бактериологических показателей качества воды водных объектов вокруг любой свалки ТКО, не имеющей специальных защитных сооружений.

Воздействие на состояние атмосферного воздуха и биосферы вокруг полигона оказывает также газовый режим полигона. При депонировании ТКО в теле полигона происходят анаэробные микробиологические процессы, в результате которых образуется биогаз. Выбросы биогаза, содержащего 50–60% метана, на 30-й год эксплуатации полигона могут достичь 20% от массы размещенных за этот период ТКО. Расчетами установлено, что зона влияния газовых выбросов

полигона ТБО ограничена радиусом 500 м от границ полигона. За пределами этой зоны концентрации всех загрязняющих веществ в воздухе не превышают ПДК (без учета фона).

К числу опасных природных факторов относится **сейсмическая активность** площадки района. Техногенные факторы могут усиливать или ослаблять её влияние. При прохождении в пределах участка захоронения отходов линий тектонических нарушений (разломы, сбросы и т.п.) высока вероятность относительных вертикальных или горизонтальных смещений крупных блоков полигона с нарушением целостности защитных устройств. При одной и той же мощности сейсмических колебаний и при одинаковом удалении от эпицентра сила толчков в месте расположения сооружения и их последствия могут существенно различаться.

Гидрогеологические условия являются катализатором потенциальной сейсмичности будущего полигона. Одновременно они представляют собой природный фактор, оказывающий воздействие на окружающую среду. Вероятность загрязнения поверхностных и подземных вод возрастает при высоком (близком к земной поверхности) расположении уровней подземных вод и, напротив, существенно снижается при их глубоком залегании.

В последующих главах рассмотрим подробнее процессы разложения отходов, протекающие в свалочном теле, и загрязнение компонентов природной среды на участках размещения полигонов ТКО.

Глава 2.2. Процессы разложения ТКО и выщелачивание загрязняющих веществ из свалочных тел

(И.В. Галицкая, В.С. Путилина, Т.И. Юганова)

Современные объекты размещения отходов производства и потребления, включая полигоны ТКО, характеризуются широким комплексом физических, химических и биологических процессов, развивающихся в свалочных телах и на территориях, примыкающих к данным объектам.

2.2.1. Деградация отходов

Деградация органического вещества свалочного тела проходит по различным механизмам, но основной — это микробиальная деградация в аэробных и анаэробных условиях. Биодеградация наиболее полно осуществляется в условиях, пригодных для жизни микроорганизмов (определенный для каждой трофической группы температурный интервал, влажность, pH). Катализаторы биохимических окислительно-восстановительных процессов — ферменты (продукты жизнедеятельности микроорганизмов), т.е. комплексные соединения белка и металла.

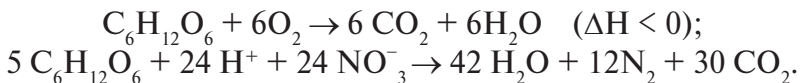
Органическое вещество свалок на первых этапах переработки подвергается аэробному окислению кислородом, присутствующим в порах свалочного тела, но он может быть израсходован в течение нескольких дней. В открытых свалках неглубокого залегания со свободным доступом кислорода и атмосферных осадков происходит быстрое аэробное окисление органики с накоплением продуктов трансформа-

ции, пригодных для метаногенной переработки. Однако в большинстве случаев, когда отходы плотно укладываются и пересыпаются уплотнителями, а свет, воздух и влага имеют ограниченный доступ, аэробный процесс в «погребенных» отходах не доходит до конца.

По мере расходования кислорода начинают преобладать анаэробные условия, и в качестве окислителей действуют такие соединения, как нитраты, сульфаты, оксиды железа и марганца. Анаэробное разложение происходит в две фазы — ацетогенную (кислую) и метаногенную, состоящую из двух стадий — активной и стабильной.

В процессе разложения отходов выделяются четыре этапа с наиболее характерными для каждого реакциями деградации.

Первый этап (аэробная фаза) характеризуется расходом кислорода и нитрата. Присутствующие в свежих отходах сахара (углеводы) преобразуются в диоксид углерода и воду; около 8% сахаров в аэробных условиях окисляется до CO_2 , при этом происходит некоторое снижение pH от 7,5 в свежих отходах до 6,2 (Barlaz et al., 1989, 1989a):



Все трофические группы, необходимые для преобразования отходов до метана, присутствуют в свежих отходах.

Второй этап разложения отходов — анаэробная кислая фаза (ацетогенез). В ней возможна только анаэробная биологическая активность, так как кислород и нитраты израсходованы. Омыление жиров и сложных эфиров проходит с образованием соответствующих кислот и спиртов по схеме:



Образование меркаптоспиртов – R_3SH происходит по аналогичной схеме. Гидролиз сульфосоединений и амидных соединений сопровождается выделением сероводорода и аммиака соответственно:



Трансформация сахаров, начавшаяся в аэробных условиях, активно продолжается в анаэробных условиях в фазе ацетогенеза (кислотообразования); предполагается, что сахара будут израсходованы прежде, чем нерастворимые субстраты (целлюлоза и гемицеллюлозы) подвергнутся гидролизу. Анаэробная кислая фаза характеризуется накоплением карбоновых кислот и дальнейшим снижением pH от 6,2 до 5,7. Накопление промежуточных продуктов кислотной ферментации можно связать с недостаточным уровнем кислорода и нитрата в свежих отходах для полного окисления сахаров и с низкой активностью ацетогенных и метаногенных бактерий. Гидролиз целлюлозы невелик, хотя уже наблюдается в начале кислой фазы при pH 5,7; целлюлолитическая популяция начинает расти. Концентрация CO_2 выше 90 об.% указывает на ферментирующую активность в начале анаэробной кислой фазы. Размеры рассматриваемых микробиальных популяций возрастают при переходе от аэробных условий к анаэробным.

Третий этап – стадия активного метаногенеза – характеризуется снижением содержания карбоновых кислот, сопровождающимся резким ростом скорости образования метана. На этой стадии разложения отходов целлюлолитическая и ацетогенная популяции заметно возрастают относительно их размеров в свежих отходах. Потребление кислот микроорганизмами превышает скорость гидролиза отходов. Кон-

центрация сульфата увеличивается до начала заметного образования метана и затем уменьшается. Рост может быть вызван растворением присутствующих в свалке сульфатных соединений благодаря снижению рН. Падение концентрации сульфата связано с его восстановлением в условиях свалки сульфатредуцирующими бактериями, которые конкурируют с метаногенами за водород. Расход твердого свалочного вещества на втором и третьем этапах идет довольно медленно с некоторым периодом стабильности на третьем этапе.

Максимальная степень разложения органического вещества достигается на *четвертом этапе*, когда образование метана замедляется (стадия стабильного метаногенеза). К концу этого этапа имеется только 28% целлюлозы и гемицеллюлоз по сравнению с 63%, оставшимися после окончания третьего этапа. Скорость образования метана снижается. Содержание карбоновых кислот падает до предела обнаружения, рН среды возрастает до значений выше 8. Снижение содержания целлюлозы и медленный гидролиз оставшихся твердых отходов, которые обогащены лигнином, тормозят процесс образования метана. На этой стадии стабильного метаногенеза деградация органических веществ идет очень медленно. Для достижения полного разложения органического вещества необходимо равновесие между кислотообразующими (ацетогенными) и метанообразующими (метаногенными) бактериями. Конечные продукты деградации ацидофильной (кислой) фазы могут оказывать ингибирующее воздействие на метаногенные бактерии. Для их жизнедеятельности важны следующие факторы: буферирующее отношение летучих жирных кислот к щелочному показателю меньшее или равное величине 0,8; влаж-

ность более 50%; температура выше 15°C; невысокое содержание токсичных элементов, таких как Cu, Zn, Cr⁶⁺, Ni, Cd, и неорганических солей, токсичность которых для бактерий снижается в ряду Ca²⁺ > Mg²⁺ > Na⁺ > NH₄⁺ (Ehrig H, 1983). Накопление энергии для поддержания активности метанобразующих бактерий происходит очень медленно, но твердые отходы — хороший теплоизолирующий материал, и постепенно происходит увеличение температуры внутри тела свалки. Рост температуры зависит от содержания влаги в свалочных отходах: при влажности 52% температура возрастает до 15°C, а при влажности 60% — до 30°C. Так как оптимальные условия жизни метаногенных бактерий находятся в области температур около 30°C, становится очевидным влияние влажности. Однако в свалках, перекрытых глинистыми отложениями, накопление влаги (путем инфильтрации атмосферных осадков, образования воды в процессе химических и биохимических реакций) происходит медленно, и полное насыщение влагой достигается в течение многих лет.

После резкого роста на третьем этапе скорости образования метана на четвертом этапе наблюдается ее устойчивое снижение, а также снижение концентрации карбоновых кислот.

Не более 30% органического вещества на полигонах ТКО отходов разлагается полностью с образованием метана. Огромное количество сконцентрированного органического углерода представлено трудноразлагаемыми веществами и надолго остается в теле свалки.

В процессе трансформации в свалке остается твердая фаза, устойчивая к микробиальной деградации. *Процесс гумификации* твердых бытовых отходов может продолжаться сотни и даже тысячу лет (Bozkurt et al., 1999; Глушанкова, 2004).

Гумусовые вещества (ГВ) — это высокомолекулярные полифункциональные соединения, диапазон их молекулярных весов составляет от 300 до 600 000. Водорастворимая фракция ГВ составляет только небольшую часть, тогда как количество вещества в твердой фазе значительно выше. Взвешенная и нерастворимая часть гумусового вещества обладает высокой адсорбционной способностью, и поверхностные сорбционные центры подразделяются на два типа: с малым и большим сродством к ионам металлов. Считается, что сорбция слабо связывающими центрами осуществляется по механизму ионного обмена, а центры с большим сродством адсорбируют ионы металлов по механизму комплексообразования.

2.2.2. Выщелачивание загрязняющих веществ из свалочного тела

Одна из острых проблем, которая вызывает обеспокоенность общества и исследованию которой уделяется в настоящее время все большее внимание, — оценка долгосрочного риска поступления загрязняющих веществ из свалок. Отмечается, что исследования длительной эволюции отложений отходов немногочисленны, и существуют большие пробелы в знаниях о количественной оценке многих важных долгосрочных процессов (Bozkurt, 1998; Bozkurt et al., 1999, 2000).

В данном разделе на основании анализа отечественных и зарубежных литературных источников за последние 30 лет исследованы такие аспекты проблемы, как длительность выщелачивания металлов и аммонийного азота из свалочного тела в аэробных и анаэробных условиях, подвижность

металлов и формы их связывания в твердой фазе, формы нахождения азота в свалочном фильтрате, процессы связывания и преобразования аммония в свалочном теле.

Выбор металлов в качестве объекта исследования обусловлен токсичностью многих металлов и их обнаружением в подземных водах в течение длительного периода после закрытия свалки или полигона ТКО.

Аммоний, как правило, присутствует в свалочных фильтрах в весьма значительных концентрациях, являясь одной из основных причин токсичности фильтрата (Kjeldsen et al., 2002; Price et al., 2003; Vodyanitskii, 2016). Неорганический азот в форме аммиака (NH_3) и иона аммония (NH_4^+) признан одним из наиболее распространенных загрязнителей подземных вод, образующихся в результате деятельности по удалению отходов (Buss et al., 2004). Учитывая его подвижность при определенных условиях, аммоний обычно рассматривается как основной компонент загрязнения при оценке риска загрязнения водных систем на участках расположения свалок и полигонов (Hydrogeological Risk, 2003).

В последние годы внимание обращается также на органический азот, который признан опасным компонентом водной среды. Результаты исследований показали, что биологически очищенный свалочный фильтрат содержит до 60 мг/л органического азота, и что в свалочном фильтрате он является более биостойким, чем другие органические вещества (Zhao et al., 2012, 2017).

Выщелачивание металлов из свалочного тела

Поведение металлов в свалочном теле в значительной степени определяется стадиями разложения органического

вещества. При гидролитическом разложении в аэробных условиях (аэробная стадия) конечными продуктами брожения являются карбоновые кислоты, которые создают кислые условия и вызывают снижение рН среды, способствующее переходу металлов в растворенное состояние.

Процессы выщелачивания металлов из свалочного тела наглядно были изучены в экспериментальных исследованиях. Для определения различий в концентрациях металлов в фильтрате между свалками-биореакторами в аэробных и анаэробных условиях были использованы имитирующие свалочные лизиметры (Kim et al., 2011).

При проведении экспериментальных исследований на образцах твердых отходов (He et al., 2006) доля выщелоченных тяжелых металлов (ТМ) составила для Cu, Cd, Pb и Zn соответственно всего 0,13; 1,8; 0,15 и 0,19%. Подвижность Zn была более высокой, чем других исследованных металлов, что коррелировало с отмеченным наиболее высоким содержанием его в обменной и растворимой в кислотах фракций. В подвижном состоянии находились Ni и Cd, что было связано с их высокой закомплексованностью в свалочном фильтрате на кислой стадии стабилизации отходов (He et al., 2006; Qu et al., 2008].

Согласно базе данных (He et al., 2006], в течение первых 20 месяцев депонирования было выщелочено менее 1% захороненных ТМ. В других исследованиях (Qu et al., 2008) более 90% образцов фильтрата, отобранных в первые два года депонирования отходов, содержали менее 1 мг/л ТМ. ТМ в захороненных ТКО находились в основном в твердой фракции, что было причиной их низких концентраций в фильтрате.

Таблица 2.2.1

Баланс массы тяжелых металлов в свалочном теле (He et al., 2006)

Характеристика	Cd	Cr	Cu	Pb
Концентрация в фильтрате, мг/л	0,0005–0,258	0,048–0,427	0,0075–0,95	0,011–1,87
Общий объем фильтрата, м ³	59 100			
Общая масса ТМ в фильтрате, кг	3,23	14,3	8,84	21,1
Расчетное содержание ТМ в свежих отходах, мг кг ⁻¹ , сухой вес ^а	5,5	100,4	46,4	222,9
Всего отходов, депонированных на свалке, т, сухой вес ^б	59 300			
Расчетная масса депонированных ТМ, т	0,33	5,94	2,75	13,19
Общая разгрузка ТМ, %	0,99	0,24	0,32	0,16

^аРассчитано на основе состава отходов в период эксплуатации свалки и содержания металлов в каждом компоненте отходов.

^бРассчитано на основе веса и содержания влаги в депонируемых отходах (измерено на влажной основе).

Многочисленные исследования показали, что за 30 лет депонирования на свалках выщелачивается менее 1% ТМ (табл. 2.2.1) (Qu et al., 2008; Nater et al., 2003). Как правило, металлы выщелачиваются на ранних этапах жизни свалки, и в дальнейшем их подвижность в значительной степени снижается в результате сорбционных процессов.

Существуют значительные различия в концентрациях ТМ в фильтрате на разных свалках, однако средние значения концентраций довольно низкие, что было показано различными исследованиями (табл. 2.2.2). В большинстве случаев концентрации ТМ в фильтрате ниже нормативов

США для питьевой воды. Окончательный вывод состоит в том, что металлы в фильтрате старых свалок в настоящее время не вызывают серьезного беспокойства.

Таблица 2.2.2

Концентрации тяжелых металлов в фильтрате свалок (мг/л)^a
(Hater et al., 2003)

Металл	1	2	3	4	5	6	7	8
Cd	0,006	0,005	0,006	0,0002	0,0004	0,0003	0,0036	0,002–0,008
Ni	0,130	0,17	0,05	0,028	0,084	0,054	0,062	0,01–0,08
Zn	0,67	0,6	2,2	0,2	0,36	0,085	5,31	0,003–0,011
Cu	0,07	0,065	0,04	0,002	0,007	0,034	0,002	—
Pb	0,07	0,09	0,02	<0,005	<0,005	0,056	0,188	0,016–0,067
Cr	0,08	0,28	0,01	0,003	0,016	0	0,002	0,033–0,085

¹ Средняя (неразбавленная) концентрация фильтрата на 106 старых свалках Дании (Kjeldsen et al., 2001).

² Средняя концентрация в фильтрате на 20 свалках Германии в метано-генной фазе (Christensen et al., 1999).

³ Средняя концентрация в фильтрате полномасштабной экспериментальной секции, работающей с рециркуляцией фильтрата (Flyhammar et al., 1998).

^{4–7} Средние концентрации в фильтрате на четырех свалках Дании, участок 4 был закрыт (Jensen et al., 1999).

⁸ Диапазоны концентраций в фильтрате из наиболее загрязненных скважин подземных вод на полигоне NorthBay, Канада (Christensen et al., 1999).

^a Перечисленные данные представляют собой либо среднее значение, либо диапазон для данного исследования в мг/л.

Металлы после перехода из отходов в фильтрат могут подвергаться воздействию осаждающих металлы ионов, таких как сульфид, карбонат, фосфат, алюмосиликаты и гидроксиды металлов, а также органическое вещество (Christensen et al., 1999).

Как сорбция, так и осаждение – важные механизмы удерживания металлов в фильтрате. В метаногенной фазе отходы содержат органическое вещество, которое при значениях pH от нейтрального до высоких обладает значительной сорбционной способностью.

Растворенное органическое вещество (РОВ) часто представлено смесью гуминовых и фульвокислот (гумусовые соединения, ГС), имеет широкий диапазон молекулярной массы и содержит ряд функциональных групп: карбоксильные, фенольные, карбонильные, что позволяет РОВ взаимодействовать с различными металлами. Молекулярный размер РОВ увеличивается с возрастом свалки, в составе РОВ растет доля высокомолекулярной фракции. В свалочном теле растворенные ГС могут адсорбироваться на поверхности гидроксидов алюминия, кремния, железа. При адсорбции высокомолекулярной фракции на гидроксидах происходит формирование гидроксогуматов, которые представляют собой устойчивые коллоиды.

При изучении свалочного фильтрата было установлено (Hater et al., 2003), что сорбция на коллоидах переводила металлы в подвижное состояние.

В образцах фильтрата с 4-х свалок Дании значительная доля тяжелых металлов Cd, Ni, Zn, Cu, Pb, Cr была связана с коллоидными фракциями. На свалке в США существенная часть Zn, Pb и Cr находилась в коллоидных фракциях, причем основная доля ТМ была связана с коллоидной фракцией, в первую очередь размером от 0,001 до 0,01 мкм, в которой преобладало гумусовое вещество.

Конкуренцию ГС составляет сульфид-ион, который образуется в свалочном теле в результате восстановления сульфатов во время разложения отходов. Осадки сульфидов ча-

сто приводятся в качестве объяснения низких концентраций тяжелых металлов. Примерно 90% Cu, Ni, Fe и Zn могут осаждаться с сульфид-ионом в метаногенной фазе (Hater et al., 2003; Bilgili et al., 2007). Исключением является Cr, поскольку он не образует нерастворимый сульфидный осадок, а имеет тенденцию формировать нерастворимые осадки гидроксида хрома.

На нерекультивированных свалках при свободном доступе кислорода с атмосферными осадками в свалочном теле могут устанавливаться окислительные условия. В этом случае сульфиды и ГС теряют свои связывающие свойства, тогда как железо и алюминий при окислении образуют очень сильные природные сорбенты.

В статье (Bozkurt et al., 2000) представлена концептуальная модель, которая рассматривает процессы в свалочных отложениях. По расчетам авторов, в свалочном теле, ранее изученном в (Bozkurt, 1998), содержалось приблизительно 3570×10^6 моль Fe, и при условиях плотности участков 0,2 моль/моль Fe сформировалось около 714×10^6 моль доступных участков, на которых могли быть сорбированы металлы. Это более чем в 3 раза превышало общее содержание металлов, которые могли быть сорбированы на гидроксидах железа (Bozkurt, 1998; Bozkurt et al., 2000).

Когда в свалочном теле присутствуют высокие концентрации железа, гидроксид железа может играть важную роль в сорбции металлов и сдерживании их подвижности.

Исследования отложений отходов на ранних стадиях деградации вплоть до образования метана показывают, что скорость выщелачивания загрязняющих веществ будет экспоненциально снижаться с течением времени (Bozkurt et al., 1999, 2000). Изменение условий на стадии стабильного ме-

таногенеза может привести к существенному изменению подвижности тяжелых металлов. До этого этапа выщелачивается небольшая часть металлов, депонированных на свалке, и, таким образом, отложения отходов по-прежнему имеют большой потенциал загрязнения. В конце анаэробной стадии более 99,9% металлов, по мнению авторов (Bozkurt et al., 2000) и (Belevi et al., 1989), все еще находятся в твердой фазе. Поэтому большое значение будет иметь изучение долгосрочных процессов, которые могут изменить выщелачивание отходов.

В том случае, когда кислород с атмосферными осадками может проникать на свалку и создавать аэробные условия, происходит изменение состояния связанных металлов. Окисление органических соединений и сульфидов может привести к потере буферирующей способности фильтрата свалки и, как следствие, снижению pH до уровня ниже нейтрального. Эти изменения могут значительно увеличить подвижность ТМ (Bozkurt et al., 2000; Kim et al., 2011; Hater et al., 2003).

В то же время Fe и Al могут при окислении формировать очень сильные природные сорбенты. Железо будет окисляться и выпадать в осадок в виде оксигидроксидов трехвалентного железа, которые проявляют высокую сорбционную способность для металлов и могут взять на себя роль удерживающего вещества.

По мере того как окислительно-восстановительные буферирующие емкости в данном месте будут израсходованы, pH будет снижаться, а окислительно-восстановительный потенциал увеличиваться, подвижность металлов будет расти. Металлы, перешедшие в подвижное состояние, могут затем мигрировать к тем участкам свалочного тела, где pH

все еще высок, а окислительно-восстановительный потенциал низок. Это может привести к повторному осаждению металлов на новом месте. Таким образом формируется подвижный фронт, который может постепенно продвигаться в свалочном теле, а растворимость на нем металлов может изменяться на несколько порядков.

Пример поведения металлов в измененных окислительно-восстановительных условиях представлен в экспериментальной работе, где определялся переход металлов в подвижное состояние в хорошо разложившихся отходах на вновь установившейся аэробной стадии (Martensson et al., 1999). На образцах отходов, выкопанных на 20-летней свалке, было показано, что в том случае, когда в отходах условия изменились на аэробные, концентрации Zn, Cd, Cr, S в водной вытяжке примерно удвоились. Авторы предположили, что аэрация разложившегося мусора привела к образованию растворимых комплексов металлов с РОВ, что и увеличило подвижность металлов.

С другой стороны, проводились экспериментальные исследования (Hater et al., 2003) в колонках, заполненных хорошо разложившимися отходами, к которым были добавлены Cd, Zn и Cr. Колонки аэрировались для имитации аэробной стадии после анаэробного разложения. Концентрации Cd, Zn и Cr в фильтрате не увеличивались после начала аэрации, и баланс массы показал, что менее 1% добавленных Cd, Cr и Zn было выщелочено после пропускания через колонки количества фильтрата, равного трем объемам слоя.

Что же касается долгосрочной судьбы металлов в фильтрате свалки, то эти результаты показывают, что их концентрации могут временно возрастать в присутствии кислорода (например, при поступлении с атмосферными осадками),

но со временем снизятся. Это означает, что в конечном итоге металлы будут преобразованы и перемещены в пределах свалочного тела.

Таким образом, существует ряд факторов, влияющих на подвижность металлов, когда отходы переходят из бескислородного в аэробное состояние: pH, Eh, функциональные группы гумусового вещества и сорбционная способность массы отходов. В течение отдаленного периода времени будет проходить несколько фаз, в которых кислород из атмосферы будет все глубже проникать в свалочное тело. Окисление остаточного органического вещества, серы, азота и железосодержащих соединений может привести к снижению pH и окислительно-восстановительного потенциала на локальных участках, что может усилить выделение тяжелых металлов. Тем не менее, как показывают модельные расчеты, благодаря значительной буферирующей способности отходов увеличение выделения металлов из отходов не будет происходить течение нескольких тысяч лет (Bozkurt et al., 2000; Hater et al., 2003).

Авторы (Bozkurt et al., 2000) разработали модель для прогнозирования отдаленного выделения металлов со свалок. Эта модель учитывала окисление всех органических отходов, гумусового вещества, которое связывает металлы, осадки сульфидов металлов, а также буферизацию pH, обусловленную растворением кальцита. Исходя из различных изученных случаев, можно сделать вывод о том, что буферирующей способности отходов достаточно даже для нейтрализации кислотной дождевой воды с pH 4 до уровня pH от нейтральных до щелочных.

Емкость окислительно-восстановительного буфера, pH-буфер, а также и скорость истощения сильно зависят от ско-

рости поступления кислорода в отложения, в зависимости от которой способность нейтрализовать кислоту будет сохраняться от 3000 лет и выше для полигона мощностью 10 м со скоростью инфильтрации дождевой воды $0,2 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \text{ в год})$. С учетом того, что свалочное тело является неоднородным, не следует ожидать более высоких скоростей повторного перехода осажденных тяжелых металлов в подвижное состояние из-за более низкого рН в течение длительных периодов времени. Авторы рассмотрели вопрос о поступлении кислорода в свалочные тела, характеризующиеся различной степенью неоднородности, и пришли к выводу, что переход тяжелых металлов в подвижное состояние, вероятно, не произойдет в течение тысячелетий.

В работе (Belevi et al., 1989] на основе измерения щелочности образцов на свалках и предположения, что 50% органического вещества в отходах разлагается, сделан вывод, что свалки содержат достаточный буфер для поддержания щелочных условий в течение более 2000 лет. Авторы заключили, что переход ТМ в подвижное состояние не будет происходить в течение столетий.

Таким образом, на основании проведенного анализа можно сделать вывод, что риск поступления металлов в подземные воды после прекращения эксплуатации полигона ТКО минимален.

Продолжительность выделения аммония из свалочного тела

Как следует из многих публикаций, концентрации другого важнейшего компонента — аммонийного азота — в свалочном фильтрате со временем не снижаются и находятся в диапазоне от 500 до 2000 мг/л. При исследовании 50 полигонов Германии концентрация аммония значительно не сни-

зилась даже через 30 лет после закрытия свалки (Price et al., 2003).

Тенденции уменьшения концентрации аммонийного азота в фильтрах остаются предметом научных дискуссий. Так, по данным, приведенным в (Hater et al., 2001), во многих случаях концентрации аммонийного азота в фильтрах очень высоки, могут достигать 2000 мг/л, и тенденции к снижению концентрации со временем не наблюдается.

Концентрации аммония остаются высокими даже в фильтрате с более старых свалок. В исследовании 50 полигонов Германии содержание аммонийного азота не показало значительного снижения через 30 лет после закрытия полигона (Kruempelbeck et al., 1999). По данным (Ehrig, 1983), в период от кислой до метаногенной фазы значительные изменения концентрации аммония отсутствовали, среднее значение составляло 740 мг N/л.

При исследовании 43 полигонов Финляндии отмечалось, что концентрации аммонийного азота немного увеличились через 30 лет после закрытия (Assmuth et al., 1993).

В отличие от вышеприведенных примеров, результаты исследований (Слюсарь и др., 2016; Завизион и др., 2015) позволяют судить о возможном снижении концентрации аммонийного азота с увеличением продолжительности депонирования отходов и об ориентировочном времени достижения концентраций, не представляющих опасности для окружающей природной среды.

Результаты определения содержания аммонийного, нитритного и нитратного азота в отходах разного срока захоронения на четырех объектах Пермского края (Завизион и др., 2015) показали, что с увеличением продолжительности депонирования отходов в водной вытяжке отмечается сниже-

ние концентраций аммонийного и нитритного азота, хлорида, значений ХПК, БПК₅, сухого остатка наряду с увеличением содержания в отходах нитратного азота (рис. 2.2.1).

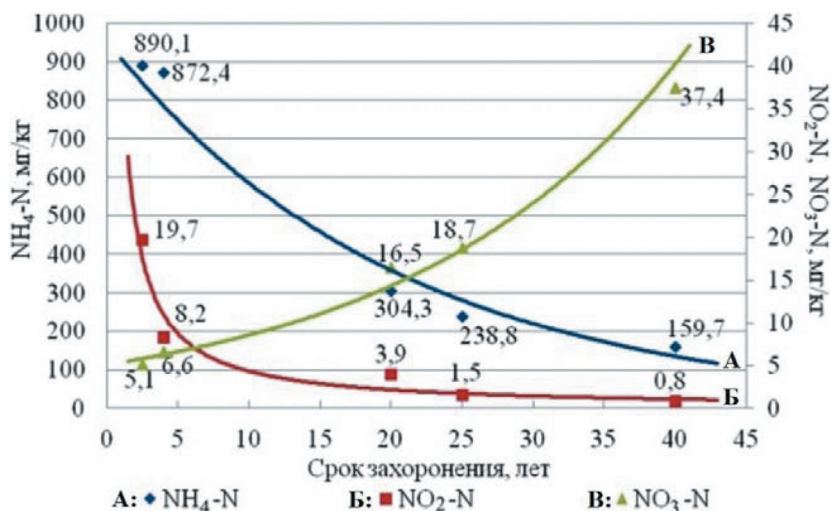


Рис. 2.2.1. Изменение содержания аммонийного, нитритного и нитратного азота в отходах разных сроков захоронения (Завизион и др., 2015)

По мнению авторов, высокие концентрации аммонийного азота в отходах со сроком захоронения 2–6 лет объясняются процессами биодеструкции легкоразлагаемых фракций ТКО с образованием жирных кислот, аминокислот, глицерина, полисахаридов, аммиака. Уменьшение содержания нитритного азота связано с замедлением процессов денитрификации отходов и их переходом в нитраты, а низкое содержание нитритного азота в отходах с продолжительностью депонирования более 30 лет свидетельствует о стабили-

зации биохимических процессов разложения отходов и завершении процессов денитрификации.

В статье (Слюсарь и др., 2016), посвященной оценке долгосрочных эмиссий объектов захоронения твердых коммунальных отходов, отмечается, что срок достижения приемлемых концентраций ионов аммония в фильтрате полигонов составляет 110–140 лет.

Процессы сорбции. Сорбция иона NH_4^+ в основном осуществляется за счет катионообменных реакций на отрицательно заряженных минеральных поверхностях. В водных растворах с низким или нейтральным pH катионный обмен происходит главным образом на глинистых поверхностях, но при значениях pH выше нейтрального значительный вклад также вносит сорбция на оксигидроксидах железа.

Относительная сила, с которой катионы связываются с заряженной минеральной поверхностью, определяется их коэффициентами селективности, которые являются функцией как минеральной поверхности, так и состава раствора. Относительную селективность в порядке уменьшения сродства к участкам катионного обмена можно представить как $\text{Al}^{3+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{NH}_4^+ > \text{K}^+ > \text{H}^+ > \text{Na}^+$ (Christensen et al., 2001).

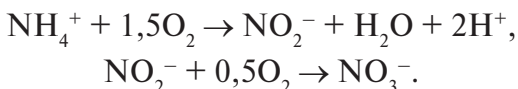
В фильтрате полигонов ТКО ион NH_4^+ – не самый распространенный катион. Доминирующий катион – это обычно натрий, который наряду с калием, кальцием и магнием, конкурирует с ионами NH_4^+ за обменные участки. Значения коэффициентов распределения (K_d) иона аммония, определенные для одних и тех пород, но различными методами (и особенно в разных по составу растворах) могут варьировать более чем на два порядка: например, для мела (Lower Chalk) $K_d = 0\text{--}0,03$ мл/г, юрской глины (Lias Clay) – 1,2–2,6 мл/г, валунной глины (Cohesive Boulder Clay) – 2–4 мл/г (Buss et al., 2004).

В большинстве случаев миграцию иона NH_4^+ определяет конкурентный катионный обмен (Cozzarelli et al., 2011).

Однако имеются подтверждения, что сорбция NH_4^+ не всегда происходит по механизму обмена. Например, сорбция NH_4^+ иллитом и другими глинистыми минералами типа 2:1 может быть фактически необратимым процессом, поскольку ион NH_4^+ поступает в состав внутрислойной глинистой матрицы. В отложениях со значительным содержанием иллита доля NH_4^+ , зафиксированного в межслоевом пространстве, обычно может составлять 20–40% от общего азота (Brady et al., 2002).

Глинистые отложения представляют собой важный «резервуар» ионов NH_4^+ , который может поддерживать устойчивое выделение этого поллютанта (Cozzarelli et al., 2011).

Процессы трансформации. Аммоний может окисляться некоторыми бактериями для выработки энергии – процесс, известный как нитрификация. Нитрификация обычно проходит в две стадии, каждая из которых реализуется различными микроорганизмами-нитрификаторами:

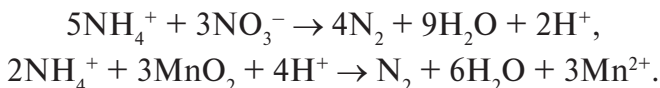


У нитрифицирующих бактерий углерод для биосинтеза обеспечивается растворенным CO_2 (в виде бикарбоната). Представляя химический состав микробной биомассы как $\text{C}_5\text{H}_7\text{NO}_2$, две стадии нитрификации можно объединить для получения общей реакции (Hogan, 1990):

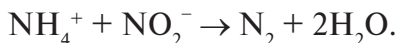


Процесс является *аэробным*, и потребление кислорода составляет около 3,3 кг O_2 на каждый килограмм деградиро-

вавшего аммонийного азота ($\text{NH}_4\text{-N}$). Это означает, что нитрификация требует постоянного поступления кислорода. Выход биомассы при нитрификации также низкий, около 0,13 кг/кг $\text{NH}_4\text{-N}$, т.е. рост нитрифицирующих бактерий будет медленным. Нитрификация также может происходить *в анаэробных условиях* с нитратом или оксидами марганца, действующими в качестве окислителя, например:



В 2002 г. (Thamdrup et al., 2002) было доказано существование анаэробной микробиальной реакции окисления NH_4^+ нитритом, названной «анаммокс» и выполняющей важную роль в биологическом цикле азота. Данная реакция проходит по уравнению:



Нитрит и нитрат, образующиеся при аэробной нитрификации NH_4^+ , подвержены биологическому разложению (денитрификации) до азота (N_2) в анаэробных условиях.

Нитрификация играет существенную роль в истощении NH_4^+ в зоне аэрации и в подземных водах. Этот процесс был отмечен при оценке загрязнения NH_4^+ на полигонах отходов (Bjerg et al., 1995) и при сбросе сточных вод (De Simone et al., 1996).

В условиях, когда истощение за счет катионного обмена ограничено, например, при низком содержании глинистых минералов в водовмещающих породах, нитрификация может быть основным процессом, ограничивающим образование шлейфа NH_4^+ .

В большинстве исследований нитрификация оценивалась в аэробных условиях. Однако в публикации (De Simone

et al., 1996) подчеркнута важность анаэробного окисления NH_4^+ . Авторы сообщили, что нитрификация была существенным процессом, управляющим истощением NH_4^+ в шлейфе свалочного фильтрата в песчано-гравийном водоносном горизонте в Дании, и показали значительный вклад анаэробного окисления NH_4^+ . Следует отметить, что другие натурные исследования показали, что анаэробное окисление NH_4^+ происходит в незначительной степени (Christensen et al., 2001; Jiang et al., 2007).

В связи с этим неясно, является ли оно существенным процессом истощения аммония для многих шлейфов фильтратов, или этот процесс становится важным только в определенных условиях (Buss et al., 2004).

В водоносных горизонтах нитрификация может быть ограничена относительно низкой растворимостью кислорода в воде (максимум 10 мг/л при стандартных температуре и давлении) и физическим смешиванием путем дисперсии анаэробного шлейфа NH_4^+ с аэробными подземными водами. Согласно предположению, принятому в (De Simone et al., 1996) и многих других исследованиях, разложение NH_4^+ является процессом первого порядка, который требует оценки параметра, соответствующего периоду полураспада. Расчетная скорость нитрификации составила около 0,017 кг $\text{NH}_4\text{-N}$ /сут., что соответствует периоду полураспада около 13 сут. при концентрации 27 мг $\text{NH}_4\text{-N}$ /л. Однако такие показатели, скорее всего, будут иметь место только в том случае, если высокие скорости биологического роста могут поддерживаться другими питательными веществами в смеси поллютантов. Значительно более низкие скорости нитрификации, которые можно ожидать в обычных условиях водоносного горизонта, были представлены в (Erskine, 2000),

где обсуждались скорости нитрификации, полученные из натурных данных для двух шлейфов свалочного фильтрата.

Для полигона отходов Llwn Isaf в Северном Уэльсе была рассчитана аэробная нитрификация в неглубоком песчано-гравийном водоносном горизонте с периодом полураспада NH_4^+ около 6 лет. По данным, полученным по водоносному горизонту Sherwood Sandstone (песчаник) под полигоном Burntstump в Ноттингемшире, период полураспада, близкий к 3.5 годам, хотя более поздние работы на этом же участке предлагали период полураспада 2,2 года (Buss et al., 2004).

Изучение пути миграции иона аммония в шлейфе коммунальных сточных вод с относительно низкой дисперсией и нереактивной структурой водоносного горизонта показало, что окисление аммония ограничивалось узкими зонами бокового смешивания с насыщенными кислородом грунтовыми водами на границах шлейфа. Несколько более широкие зоны окисления NH_4^+ могут присутствовать вблизи фронта шлейфов в тех случаях, когда водоносные горизонты являются аэробными, а ионный обмен ограничен (Christensen et al., 2001).

В целом можно ожидать, что загрязнение NH_4^+ будет сохраняться в загрязненных субоксических водоносных горизонтах еще долгое время после того, как будут удалены более подвижные поллютанты (Brady et al., 2002).

Таким образом, на основании проведенного анализа можно сделать следующие выводы.

1. Скорость выщелачивания металлов из отходов от ранних стадий деградации до стадии образования метана экспоненциально снижается с течением времени. Так как до ста-

дии стабильного метаногенеза выщелачивается небольшая часть металлов, депонированных на свалке, отложения отходов имеют большой потенциал загрязнения, поэтому изучение долгосрочных процессов, которые могут изменить интенсивность выщелачивания отходов, приобретает большое значение.

2. На нерекультивированных свалках при свободном доступе кислорода с атмосферными осадками в свалочном теле могут устанавливаться окислительные условия. Возможность поступления кислорода не исключается и при рекультивации свалки. Технологии создания покрытий как барьеров для поступления атмосферных осадков в свалочное тело применяются в течение относительно короткого времени, поэтому трудно прогнозировать длительность сохранения их надежности в долгосрочной перспективе.

3. В целом, риск поступления металлов в подземные воды после прекращения эксплуатации полигона ТКО минимален. Однако следует учитывать, что за время эксплуатации полигона в зоне его влияния в депонирующих средах формируется вторичный источник загрязнения, что, при изменении кислотно-щелочных и окислительно-восстановительных условий может привести к переходу металлов в подземные воды и их загрязнению.

4. В отличие от металлов концентрации другого важнейшего компонента — аммонийного азота — в свалочном фильтрате со временем не снижаются и могут достигать 2000 мг/л и более. Длительность загрязнения фильтрата аммонийным азотом является одной из наиболее острых проблем на свалках и полигонах ТКО, и его присутствие определит, когда свалка станет биологически стабильной.

5. Продолжительность выделения NH_4^+ из отходов в значительной степени определяется их составом, содержанием органического вещества, технологией захоронения. В связи с этим существуют различные мнения о времени снижения концентраций NH_4^+ до значений, безопасных для природной среды. Однако все исследователи подчеркивают весьма значительную продолжительность загрязнения фильтрата аммонийным азотом.

Глава 2.3. Загрязнение компонентов природной среды на участках размещения полигонов ТКО

(И.В. Галицкая, В.С. Путилина)

Депонирование твердых коммунальных отходов (ТКО) на свалках и полигонах остается распространенным вариантом обращения с отходами во многих странах. С захоронением ТКО связан целый комплекс серьезных экологических проблем. В районах расположения участков депонирования ТКО атмосферный воздух, почвы, растительность, подземные и поверхностные воды, донные отложения испытывают различные негативные воздействия. В настоящее время как действующие, так и закрытые свалки и полигоны ТКО являются источниками загрязнения природной среды. В течение длительного периода времени происходит постоянный вынос веществ за границы участка захоронения ТКО и образование ареалов загрязнения, размеры и характер которых в существенной степени зависят как от интенсивности техногенного воздействия, так и от устойчивости к нему компонентов природной среды.

Одним из наиболее опасных последствий воздействия объектов захоронения ТКО является загрязнение водных систем, особенно подземных вод, поскольку не только многие свалки, но и полигоны были построены без инженерных барьеров и без учета природных (геологических) барьеров. Загрязнение подземных вод наблюдается не только в период эксплуатации, но и после закрытия полигонов. Один из наиболее острых аспектов — длительность загрязнения свалочно-го фильтрата как источника воздействия на качество водных систем на участках размещения свалок и полигонов ТКО.

Значительный спектр высокотоксичных неорганических и органических веществ, поступающих из свалочного тела в окружающую природную среду, постоянное поступление в атмосферу метана и легколетучих высокотоксичных соединений ставят полигоны в число опаснейших источников загрязнения природных сред и отрицательного воздействия на живые организмы. Серьезную угрозу здоровью людей представляет загрязнение питьевых вод органическими соединениями и тяжелыми металлами, поступающими с мест складирования отходов. Не менее опасно загрязнение воздуха в районе свалок газообразными продуктами процессов брожения органического вещества (метаном, диоксидом азота, углеводородными газами и др.). Процессы продуцирования высокотоксичных и экологически опасных веществ протекают десятки лет при функционировании свалки и многие годы после ее рекультивации, что создает реальную угрозу окружающей среде и здоровью населения.

Воздействие полигонов ТКО приводит к увеличению концентрации многих элементов в различных компонентах окружающей среды: почвах, поверхностных водах и донных отложениях, подземных водах.

Острым и в большинстве случаев игнорируемым аспектом экологических проблем, возникающих при складировании отходов, является загрязнение почв и пород на участках расположения свалок и прилегающих территориях. В почвенном покрове в результате поступления загрязнителей при распылении и/или с поверхностным стоком формируются техногенные ореолы токсичных элементов. Почвы нередко содержат повышенные по сравнению с фоном концентрации цинка, никеля, свинца, марганца, хрома, ртути, ванадия, олова, кобальта, бенз(а)пирена и др., причем, как

обычно наблюдается при техногенном загрязнении, доля подвижных форм тяжелых элементов достаточно велика. В радиусе нескольких сот метров, особенно в непосредственной близости от полигонов, концентрации загрязняющих компонентов могут достигать значений, превышающих фоновые в десятки раз.

Процессы взаимодействия в системе «загрязненные воды — породы» обуславливают техногенное изменение состава самих пород. Аккумуляция загрязняющих веществ в твердой фазе пород способствует созданию вторичного источника загрязнения. При изменившихся условиях как при эксплуатации свалки, так и после ее рекультивации «закрепленные» элементы могут вновь переходить в фильтрующиеся воды, приводя к загрязнению подземных и поверхностных вод. Складирование отходов без предварительного обоснования выбора мест размещения полигонов может привести к значительному загрязнению окружающей природной среды не только в период эксплуатации свалки, но и после прекращения складирования отходов. Кроме того, воздействие загрязненного фильтрата на подстилающие породы может привести к изменению их минералогического состава и, что особенно опасно, к увеличению проницаемости пород и снижению защищенности эксплуатируемых водоносных горизонтов.

Поверхностные воды загрязняются марганцем, железом, алюминием, кадмием, титаном, хромом, никелем, бериллием, барием, аммонийным азотом. Поступление загрязняющих веществ осуществляется в основном с поверхностным стоком с загрязненных территорий и при разгрузке загрязненных подземных вод. Поступление загрязненного поверхностного стока в водотоки и водоемы и депонирование

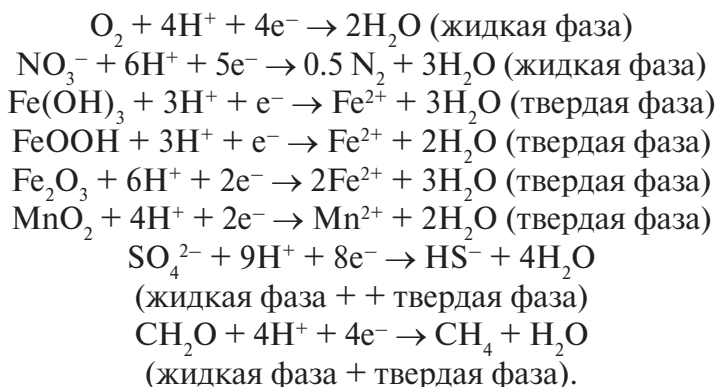
тяжелых металлов в донных отложениях приводят к формированию в донных отложениях водотоков повышенных концентраций кобальта, цинка, никеля и других тяжелых металлов.

О значительных изменениях состава подземных вод, вызванных поступлением загрязненного фильтрата, неоднократно сообщалось в литературе. Так, на полигоне ТКО «Хметьево» воздействие полигона ТКО привело к изменению химического состава подземных вод во всех мезокайнозойских водоносных горизонтах вплоть до мелового терригенного горизонта в основном на расстоянии 200-250 м от полигона. Подземные воды в зоне влияния полигона содержали повышенные по сравнению с предельно допустимой концентрацией (ПДК) концентрации ряда компонентов, при этом наиболее опасными с экологических позиций в различные периоды являлись железо (до 130 ПДК), марганец (до 63,5 ПДК), аммоний (до 30 ПДК), никель (до 3,9 ПДК), кобальт (до 3,0 ПДК), хлорид-ион и нитрат-ион (до 1,8 ПДК). Значения рН подземных вод в основном изменялись в диапазоне 7–8, гораздо реже отмечались более низкие – до 6,3–6,5 и более высокие значения – до 8,8 (Galitskaya et al., 2010).

Важнейшей геохимической особенностью формирования загрязнения подземных вод на участках полигона ТКО является снижение их окислительно-восстановительного потенциала, связанное с проникновением в подземные воды вместе с фильтратом не окисленных органических веществ (ОВ). В результате формируются околонейтральные $pH = 6-9$ бескислородные бессульфидные воды с низкими положительными значениями $ОВП + 250 = 0$ мВ. Характерный для данного геохимического типа загрязненных подземных вод набор неорганических веществ, которые могут

присутствовать в этих водах в значительных концентрациях: Be, Hg, P(III), Cd, Pb, AsFe, Mn, NH_4^+ , Cu, Cr(III), Zn, Cl^- , SO_4^{2-} .

Поступление органического вещества со свалочным фильтратом в подземные воды приводит к уменьшению окислительно-восстановительного потенциала в результате микробиальной деградации органической материи. Формирование окислительно-восстановительных условий в значительной степени зависит от наличия в подземной гидросфере различных соединений, являющихся акцепторами электронов. Основными электроно-донорными реакциями, происходящие в аэробных водоносных горизонтах, являются (Heron et al., 1994):



При поступлении фильтрата в водоносном горизонте происходит изменение окислительно-восстановительных условий, и со временем в нем обособляются различные окислительно-восстановительные зоны.

Последовательность расположения этих зон, сформировавшихся в исходно аэробном водоносном горизонте при поступлении обогащенного органическим веществом филь-

трата со свалки Vejen в Дании в течение 15 лет представлена в (Heron et al., 1994; Heron, et al., 1994). Концентрации компонентов, определяющие выделение различных окислительно-восстановительных зон, приведены в табл. 2.3.1. Ближайшая к свалке восстановительная зона — метаногенная, за ней следует зона сульфатредукции, значительно перекрывающаяся с зоной восстановления железа и марганца протяженностью более 300 м от свалки. Зона восстановления нитрата распространяется до 400 и более метров от свалки и на глубину до 20 м.

Последовательность формирования окислительно-восстановительных зон определяется энергетической предпочтительностью протекающих реакций. Согласно (Barry et al., 2002), сначала происходит аэробная деградация, затем наступает анаэробная деградация в следующем порядке: восстановление нитрата, восстановление марганца, восстановление железа, восстановление сульфата и, наконец, метаногенез. Эта последовательность возникает в том случае, когда в водоносном горизонте в значительных количествах присутствуют компоненты-окислители: свободный кислород, нитраты и сульфаты в подземных водах и соединения железа (III) и марганца (IV) в твердой фазе. Окислительно-восстановительные зоны не имеют строго определенных границ и часто перекрываются, так что нельзя исключить возможность одновременного присутствия того или иного вида растворенного соединения ($\text{SO}_4^{2-}/\text{S}^{2-}$, $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$, $\text{Mn}^{4+}/\text{Mn}^{2+}$, $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$).

Высокое содержание растворенного органического вещества типично для подземных вод, загрязненных свалочным фильтратом. Органическое вещество само по себе может загрязнять подземные воды, но очень часто оно влияет на миграцию других компонентов, участвуя в окислительно-

восстановительных процессах, образуя комплексы с тяжелыми металлами и связывая гидрофобные органические соединения. Растворенное органическое вещество может связывать тяжелые металлы в комплексные соединения, увеличивая их подвижность в подземных водах. Однако, как показано на примере миграции Cd, Ni и Zn в подземных водах, загрязненных свалочным фильтратом, влияние комплексообразования на скорость миграции металлов незначительно.

Таблица 2.3.1

**Концентрации компонентов, определенные в пробах подземных вод
в окислительно-восстановительных зонах
(Heron et al., 1994)**

№ образца	Зона	O ₂	NO ₃ ⁻	Fe	SO ₄ ²⁻	S(-II) (следы)	CH ₄
		% насыщения	мг N/л	мг/л	мг S/л		мг/л
1	Метаногенная	<3	0,34	6	27	да/нет*	6
2	Восстановление сульфата	<3	0,21	11	21	да	16
3	Восстановление Fe(III)	<3	0,19	14	20	нет	2,8
4	Восстановление Fe(III)	<3	0,07	1,3	21	нет	0,14
5	Восстановление Fe(III)	<3	0,22	3,5	14	нет	0,1
6	Восстановление / осаднение Fe(III)	<3	2,9	3,2	17	нет	0,1
7	Восстановление нитрата	<3	4,8	0,8	28	нет	0,1
8	Аэробная	29	4,9	0,1	37	нет	0,1
9	Аэробная	35	4,9	1,3	30	нет	0,1

*В этой части водоносного горизонта концентрации сульфида значительно варьировали во времени.

Поступление органического вещества и восстановленных форм неорганических соединений, таких как метан, аммоний, сероводород и растворимые соединения железа, в аэробные водные пласты приводит к формированию буферных условий для окислительно-восстановительных реакций. Ряд окислительно-восстановительных зон, развитых в загрязненных водоносных горизонтах, контролируется комплексом геохимических реакций, включающих, помимо окислительно-восстановительных процессов, ионный обмен, растворение-осаждение, сорбцию. Отмечается также важная роль соединений Fe (III) в различных его формах, которое может быть основным окислительно-восстановительным буфером при восстановлении органических и неорганических соединений и таким образом замедлять их миграцию и ограничивать протяженность анаэробной части шлейфа загрязнения. Восстановленное Fe (II) может оставаться растворенным в подземных водах, участвовать в ионном обмене с твердой фазой, либо осаждаться в виде сульфида или карбоната. Фактическое распределение Fe (II) контролируется составом подземных вод и типом осадков. Если осаждаются значительные количества соединений в восстановленной форме, то будет ограничена их миграция и, следовательно, сократятся размеры анаэробной части шлейфа.

Окислительно-восстановительные процессы играют важную роль в миграции неорганических и органических соединений в подземных водах. Органическое вещество, поступающее в подземные воды со свалочным фильтратом, участвует в окислительно-восстановительных процессах и подвергается окислению.

Присутствие неорганических соединений в подземных водах может быть связано как с загрязнением фильтратами

свалок, так и с естественным поступлением из геологической среды, поэтому очень важно разделение источников и использование некоторых характерных для них неорганических элементов как индикаторов загрязнения. В работе (Looser et al., 1999) показано, что и находящиеся под влиянием свалочного фильтрата, и природные подземные воды могут содержать одни и те же элементы, причем природное влияние может быть сильнее, чем антропогенное. Такие элементы, как Co, Al, As, Cr, I, Li, Mo, Rb, U, могут использоваться в качестве индикаторов загрязнения только в том случае, если известен состав компонентов геологической среды. Выделены четыре основные группы неорганических элементов с их средними концентрациями:

1) *Макрокомпоненты*. Высокие концентрации общих неорганических компонентов этой группы составляют более 1 г/л. Это анионы – гидрокарбонаты, сульфаты, нитраты, нитриты и хлориды; катионы – калий, магний, кальций, натрий, аммоний.

2) *Элементы с малыми и следовыми концентрациями*. Малые концентрации составляют около 100 мг/л и характерны для Br, B, P, Sr, Fe, Mn. Следовые элементы имеют среднюю концентрацию менее 0,5 мг/л, но более 0,01 мг / л. К ним относятся I, Ba, Al, Zn, Rb, Ni, Li, Cr, Se, Ti, V, Co, Cu. В отличие от других элементов этой группы, следы Se всегда присутствуют в фильтратах.

3) *Микроэлементы*. Часть элементов этой группы имеют значения концентраций в области от 0,1 до 10 мкг / л. Это Mo, W, Zr, Cs, Ag, Sn, Pb, As, Sb, Cd, U, Sc, La, Bi, Ga, Hg. Некоторые из них не всегда определяются: W, Cs, As, Sb, Cd, Sc, Bi, Ga, Hg.

4) Некоторые следовые количества элементов не фиксировались в фильтратах из-за низкой концентрации (менее 0,1 мкг/л) – Be, Ge, Nb, Ru, Rh, Pd, In, Te, Hf, Ta, Re, Os, Ir, Pt, Au, Tl, Ce, Nd, Th.

Основным правилом относительно содержания элементов в фильтрате является снижение концентрации по мере возрастания атомного веса.

Содержание ионов металлов в растворенном состоянии в фильтратах — одна из наиболее важных проблем с точки зрения угрозы качеству подземных вод. Результаты изучения возможности нахождения в подземных водах комплексных соединений металлов с органическим веществом (Christensen et al., 1999) показали, что в загрязненных фильтратом подземных водах при концентрации органического вещества более 60 мг/л до 90% меди и свинца находится в виде комплексных соединений с органикой, однако миграция тяжелых металлов существенно зависит от pH фильтрата.

Так в околонеutralном свалочном фильтрате (pH 6,79) подвижность металлов располагалась в ряду $Cu > Zn > Pb > Cd$, но для кадмия и свинца она существенно ограничивалась осаждением $CdCO_3$ и $PbCO_3$ и в меньшей степени сдерживалась сорбцией. Миграция Cu^{2+} и Zn^{2+} при pH 6,79 тормозилась катионным обменом, при этом концентрация цинка была наиболее высокой, за ним следовали медь, свинец и кадмий. В целом, в нейтральных растворах Cd^{2+} и Pb^{2+} значительно менее подвижны, чем Cu^{2+} и Zn^{2+} . В более кислом фильтрате при pH 3,91 основным фактором, сдерживающим миграцию, был ионный обмен, и подвижность как Cd^{2+} , так и Pb^{2+} заметно возрастала. Ряд подвижности ионов металлов в кислой среде фильтрата: $Cd > Zn > Cu > Pb$.

Влияние pH существенно сказывается на миграции кадмия и свинца и намного меньше для меди и цинка (Wu et al., 1998).

Применяя геохимическое моделирование, D.L.Jensen и др. (Jensen et al., 1998) рассчитали формы нахождения Fe (II) и Mn (II) в загрязненных подземных водах и показали, что Fe (II) преимущественно находилось в свободной форме Fe^{2+} (около 80%), и около 20% железа (II) и марганца (II) присутствовало в комплексах с бикарбонатом. Комплексообразование марганца (II) с растворенным органическим веществом свалочного фильтрата было совсем незначительным и составляло около 5%.

Расчеты также показали, что подземные воды, загрязненные фильтратом, сильно перенасыщены в отношении сидерита (FeCO_3) и умеренно перенасыщены в отношении родохрозита (MnCO_3) (Jensen et al., 1998; Islam et al., 2001).

Перенасыщение относительно карбонатных минералов устойчиво из-за медленной кинетики осаждения или ингибируется комплексообразованием катионов с органическими лигандами в растворе. P.L.Vjerg и др. (Vjerg et al., 1995), применяя моделирование, показали перенасыщение в свалочном шлейфе в отношении FeS , FeCO_3 , CaCO_3 (кальцит), $\text{CaMg}(\text{CO}_3)$ (доломит) и MnCO_3 на расстоянии 60–90 м от свалки. Этот модельный расчет был подтвержден на примере водоносного горизонта в известняках, расположенного под муниципальной свалкой Winterthur (Швейцария) (Amirbahman et al., 1998).

Как видно из проведенного исследования, кислородсодержащие подземные воды находятся в равновесии относительно кальцита ($\text{SI} = 0$). Для кальцита величина SI несколько возрастает вдоль прохождения шлейфа. Во всех скважинах

подземные воды пересыщены по отношению к доломиту ($SI > 0$) и недонасыщены по отношению к магнезиту ($SI < 0$). Подземные воды недонасыщены по отношению к гиббситу, и избыточная концентрация сульфата, вероятно, поступает из свалочного тела. Концентрации растворенного марганца одинаковы во всех скважинах и находятся в околоравновесном состоянии с родохрозитом. Расчеты растворимости показали, что осаждение сидерита возможно непосредственно под свалкой. Околоравновесное состояние относительно растворимости аморфного сульфида железа FeS в скважинах 1 и 21 показывает, что концентрация железа в этих скважинах контролируется растворимостью FeS (Amirbahman et al., 1998).

В формировании загрязнения подземных вод значительную роль играет микробиологический фактор.

Водоносные горизонты, загрязненные органическим веществом, как правило, содержат обширные зоны, в которых восстановление железа (III) является основным конечным электроно-акцепторным процессом. Зона, где преобладает восстановление $Fe(III)$, находится ниже зоны образования метана и восстановления сульфата и выше зоны восстановления нитрата и $Mn(IV)$. Причина такого распределения заключается в том, что метаногенез и сульфатредукция могут стать конечными электроно-акцепторными процессами только тогда, когда микробиальное восстановление $Fe(III)$ будет подавлено из-за недостатка доступного для микроорганизмов $Fe(III)$ в твердой фазе. В присутствии $Mn(IV)$ и нитратов восстановление $Fe(III)$ снижается (Lovley et al., 2000).

На скорость и степень окисления органических соединений в железоредуцирующей зоне загрязненного водоносного

горизонта влияют различные факторы, из них определяющими являются количество и форма Fe(III). Большая часть железа в подземной гидросфере находится в форме трудно растворимых оксидов; их структура различна и изменяется от слабо окристаллизованных до кристаллических образований. Слабо окристаллизованные формы наиболее доступны для микроорганизмов и легко восстанавливаются, тогда как восстановление кристаллических соединений оксидов железа видами *Geobacter* происходит намного медленнее. В этой связи количество органического вещества, которое может быть окислено в водонасыщенном слое, ограничено количеством доступного слабо окристаллизованного железа (III). Однако в присутствии подходящих доноров электронов, например, ацетат-иона, который образуется в анаэробных условиях, и Fe(III) как акцептора электронов формируются новые популяции бактерий, родственных *Acidobacterium capsulatum* и *Holophagafoetida*, которые подобно видам *Geobacter* и *Geothrix fermentans* потребляют различные простые органические кислоты как доноры электронов. Еще один фактор, лимитирующий процесс деградации органических соединений, — восстановление нерастворимых оксидов железа (III) при прямом физическом контакте с ними микроорганизмов; это восстановление облегчается при добавлении хелатирующих агентов, среди которых особенно эффективны гумусовые вещества (Lovley et al., 2000).

Авторы работ (Coates et al., 1998; Lovley et al., 1998; Scott et al., 1998) предполагают, что микроорганизмы используют группу хинона в молекулах гумусовых веществ как акцептор электронов для восстановления железа либо переносят электроны к многочисленным другим внеклеточным хинонам и восстанавливают гумусовые соединения.

Микробиально восстановленные гумусовые и другие внеклеточные хиноны могут переносить электроны к нерастворимым оксидам Fe(III), которые в свою очередь окисляют гумус в форму, действующую как электронный акцептор для железовосстанавливающих микроорганизмов. В присутствии оксидов железа даже незначительные количества гумуса могут способствовать окислению значительных количеств органического вещества по механизму окисления/восстановления. Помимо этого гумусовые вещества помогают микроорганизмам восстанавливать такие устойчивые соединения Fe(III), которые они не могут восстановить в отсутствие гумуса, например, кристаллические оксиды железа (гетит и гематит) или структурное железо (III) в глинистых минералах (Lovley et al., 1998).

Железевосстанавливающие микроорганизмы переносят электроны не только к органическим соединениям, но и к металлам и металлоидам. Так, известно, что уран (VI) хорошо растворим в воде и легко мигрирует в подземных водах, но в присутствии микроорганизмов происходит его восстановление до урана (IV), который осаждается, что и предотвращает его дальнейшую миграцию (Lovley et al., 1991).

Загрязнение подземных вод технецием (VII) заметно снижается в присутствии Fe-восстанавливающих микроорганизмов, так как они переводят Tc(VII) в Tc(IV), соединения которого не растворимы в воде (Lloyd et al., 1996).

Сообщается о переводе растворимого и токсичного хрома (VI) в менее растворимый и менее токсичный хром (III) (Lovley, 1995), а также о восстановлении растворимого кобальта (III) в комплексе с этилендиаминотетраацетатом до кобальта (II), который, по всей вероятности, адсорбируется в водонасыщенном слое (Caccavo et al., 1994), и о восстанов-

лении растворимого селената до нерастворимого элементного селена (Laverman et al., 1995).

Одна из серьезных экологических проблем, связанных с окислительно-восстановительными процессами в подземных водах, — загрязнение подземных вод *ароматическими углеводородами*, поступающими со свалочными фильтраатами. Как правило, процесс их окисления происходит в анаэробных условиях в присутствии восстанавливающих микроорганизмов. При изучении деградации ароматических углеводородов при восстановлении железа были выделены культуры микроорганизмов, ответственных за этот процесс. Известно, что *Geobacter metallireducens* способны окислять толуол до диоксида углерода с помощью Fe(III) в анаэробных условиях. Эти микроорганизмы могут также окислять некоторые другие моноароматические соединения, включая фенол и п-крезол (Lovley et al., 1989, 1990).

Значительная деградация ароматических соединений в загрязненных водоносных горизонтах под свалками отмечалась в работах (Angelidaki et al., 2000; Lyngkilde et al., 1992; Rügge et al., 1995).

Изучение окисления бензола показало, что он устойчив в анаэробной среде, включая и породы, в которых восстановление железа было конечным электронно-акцепторным процессом. Однако в присутствии хелатирующих агентов, например, нитрилотриуксусной кислоты, процесс деградации бензола до диоксида углерода проходит примерно за 100 дней (Lovley et al., 1994, 2000; Rooney-Varga et al., 1999), а при участии гумусовых кислот время окисления заметно сокращалось (Lovley et al., 1996). Хелатирующие агенты увеличивают доступность железа, находящегося в твердой фазе,

для микроорганизмов, переводя его в растворенное состояние.

Таким образом, полигоны ТКО на разных стадиях своего функционирования, в том числе на стадии рекультивации, представляют собой источник загрязнения различных компонентов природной среды, что будет показано в следующей главе на конкретных примерах полигонов ТКО Московской области.

Глава 2.4. Примеры исследования влияния полигонов ТКО на компоненты природной среды

*(И.В. Галицкая, В.С. Путилина, И.А. Костикова,
Е.С. Соломатина, Ю.В. Трофимов)*

2.4.1. Исследования состояния полигона ТКО «Дубна Правобережная» для обоснования мероприятий по обеспечению геоэкологической безопасности в пострекультивационный период

В настоящее время в России в рамках Государственной программы Российской Федерации «Охрана окружающей среды» (утверждена постановлением Правительства Российской Федерации от 15.04.2014 № 326) и национального проекта «Экология» осуществляется реализация уникального Федерального проекта «Чистая страна». Одно из важнейших направлений работы по национальному проекту «Экология» — рекультивация полигонов ТКО. В проведении мероприятий по закрытию исчерпавших свои возможности полигонов с последующей их рекультивацией лидирующую позицию занимает Московский регион.

При выборе направления рекультивации нарушенных территорий принимается во внимание целый ряд характеристик, в том числе их фактическое и прогнозируемое состояние к моменту рекультивации. Необходимым этапом при разработке проектов рекультивации свалок и полигонов является проведение инженерных изысканий с целью получения необходимых и достаточных материалов для обоснования проектных решений, в том числе мероприятий по охране окружающей среды.

На примере полигона ТКО «Дубна Правобережная» рассмотрена важность ориентированности инженерно-геологических и инженерно-экологических изысканий на получение данных для оценки существующей гидрогеохимической ситуации и прогноза ее изменения с целью обоснования рекультивационных мероприятий, а также мероприятий по обеспечению геоэкологической безопасности в пострекультивационный период, включая разработку программы мониторинга.

Для прогноза изменения химического состава подземных вод на участках расположения свалок и полигонов ТКО большое значение имеет изучение современного состояния подземных вод, расположения окислительно-восстановительных зон (зоны восстановления нитрата, марганца, железа, сульфата и метаногенеза) в водоносных горизонтах и эпигнозная оценка их формирования. Однако в настоящее время при проведении инженерно-экологических изысканиях важность получения всех необходимых для этого показателей и компонентов в большинстве случаев не учитывается. На примере полигона «Дубна Правобережная» представлен подход к оценке состояния свалочного тела и подземных вод в условиях дефицита информации о показателях, необходимых для характеристики окислительно-восстановительных условий.

Характеристика полигона ТКО

Полигон ТКО «Дубна Правобережная» расположен на северо-западе Московской области. Полигон эксплуатировался более 60 лет. В 2020 г. рекультивация полигона завершена.

В геологическом строении до исследованной глубины 40 м принимают участие верхне-среднечетвертичные аллю-

виально-флювиогляциальные и среднечетвертичные моренные отложения, перекрытые сверху насыпными (техногенными) грунтами и почвенно-растительным слоем.

Насыпные (техногенные) грунты (tQIV) представлены пластиком, стеклом, металлом, древесиной, текстилем, органическим веществом, с поверхности до глубины 0,6 м перекрыты песчано-глинистым грунтом. Техногенные грунты представляют собой переслаивание ТКО мощностью ~ 5,0 м и суглинка тугопластичного мощностью 0,5–0,6 м. Мощность насыпных грунтов изменяется в широких пределах от 0,8 до 17,7 м.

Аллювиально-флювиогляциальные отложения (afQII-III) представлены суглинком опесчаненным, тугопластичным, реже – полутвердым, мощностью 0,7–1,6 м; песком пылеватым, глинистым мощностью 0,4–1,2 м. Моренные отложения (gQII) представлены суглинком, опесчаненным, с включением дресвы и щебня, полутвердым и твердым, вскрытой мощностью 13,5–21,4 м. Максимальная мощность насыпи – 21 м.

Информация о коренных отложениях района исследования получена по данным архивных материалов.

Коренные отложения представлены:

- нижнемеловыми (K_1) глинами опесчаненными, с галькой и валунами, мощностью до 23 м; песками разнозернистыми, глинистыми, с редкой галькой, мощностью до 20 м;
- верхнеюрскими (J_3) глинами черными, с прослоями пестроцветной глины, мощностью до 1 м;
- верхнекаменноугольными (C_3) известняками белыми, трещиноватыми, мощностью 2,3 м; глинами пестроцветными с прослоями известняка и мергеля, мощностью 9,7 м; известняками белыми, серыми, крепкими, окварцо-

ванными, с частыми прослойками мергеля и глины, мощностью 62,0 м.

Гидрогеологические условия характеризуются наличием безнапорного водоносного горизонта, приуроченного к техногенным (насыпным) и средне-верхнечетвертичным аллювиально-флювиогляциальным пескам. Мощность горизонта небольшая 0,7–1,0 м. Местным водоупором служат моренные суглинки мощностью примерно до 20 м.

Питание водоносного горизонта осуществляется за счет инфильтрации атмосферных и поверхностных вод. Разгрузка водоносного горизонта происходит в р. Волгу и ее притоки (реки Дубна, Сестра, Черная), а также в канал им. Москвы.

Верхнекаменноугольный артезианский водоносный горизонт отделен от грунтовых вод толщей юрских глин (региональный водоупор) значительной мощности, что предполагает его хорошую защищенность.

Материалы и методы

Для решения поставленных задач были использованы результаты инженерно-геологических и инженерно-экологических исследований, проведенных ООО «Комплекс Проект» в 2019 г. на участке расположения полигона ТКО и прилегающих территориях.

Оценка состояния свалочного тела осуществлялась на основании результатов анализа техногенных вод из дренажной канавы, подземных вод, отобранных под свалочным телом на глубине 17 м, у подножия полигона, с внешней стороны от обводной канавы с глубины ~ 1,2 м, а также в садовом товариществе из колодца, расположенном на расстоянии более 200 м к юго-востоку от полигона.

При анализе загрязненности подземных вод, а также фильтрата как источника опасности загрязнения подземных вод, применялись ПДК в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового назначения (ПДКв) по СанПиН 1.2.3685-21¹. Кроме того, так как реки в районе расположения полигона имеют рыбохозяйственное значение, для оценки потенциальной опасности подземных вод как источников загрязнения поверхностных вод (при разгрузке) также проводилось сравнение с ПДК в водах водных объектов рыбохозяйственного значения (ПДКрх)². Превышения ПДК представлены в виде обобщенных ассоциаций.

Сложность оценки состояния свалочного тела заключалась в том, что достоверное определение стадии разложения требует информации о целом ряде показателей: рН, химическом (ХПК) и биохимическом (БПК) потреблении кислорода, кислотности, щелочности, содержании летучих жирных кислот (карбоновые кислоты: уксусная, пропионовая, масляная), целлюлозы, лигнина; биохимического метанового потенциала (БМП); составе и содержании биогаза, микрофлоре (ацетогенные, сульфатредуцирующие и метаногенные бактерии).

Так как на исследуемом участке устанавливался ограниченный набор показателей, для определения состояния

¹ СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115>

² Приказ от 13.12.2016 № 552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения». URL: <https://docs.cntd.ru/document/420389120>

свалочного тела были использованы вспомогательные данные и ориентировочные показатели — ХПК, содержание растворенного кислорода, величина рН. В качестве основных исследуемых веществ (индикаторов загрязнения) выбраны соединения азота, хлорид-ион, сульфат-ион, железо, марганец, никель, кадмий, медь, цинк, хром.

Результаты оценки загрязнения вод по отношению к различным значениям представлены в виде геохимических ассоциаций химических элементов, где индекс справа от символа химического элемента — величина коэффициента концентрации K_c , равная отношению концентрации элемента к ПДК_в и ПДК_{рх}.

При рассмотрении особенностей миграции загрязняющих веществ в подземных водах основное внимание уделялось соединениям азота и металлам.

Состояние свалочного тела

В большинстве случаев свалочное тело по составу неоднородно, и происходящие в результате сложной серии биологических и химических реакций процессы деградации различаются скоростью и степенью разложения. Обычно считается, что свалочные отходы претерпевают по меньшей мере четыре фазы разложения: (1) аэробную, (2) анаэробную кислую (ацетогенез), (3) активного метаногенеза и (4) стабильного метаногенеза. Позднее было предложено выделять дополнительную гумусовую фазу разложения.

Поскольку отходы существуют на свалке в течение многих лет (в разных секциях и на разной глубине), довольно часто различные части свалки находятся в разных фазах разложения. Существует тесная связь между состоянием разложения отходов и связанными с ним характеристиками

фильтрата. Таким образом, состав фильтрата может варьировать в пределах свалочного тела.

Наиболее точная характеристика состава фильтрата может быть получена при опробовании техногенного водоносного горизонта в скважине, пробуренной в теле свалки. Однако в ряде случаев из-за технических сложностей при бурении скважин непосредственно в свалочном теле для представления о составе фильтрата используют пробы воды, отобранные из канав, дренирующих техногенный водоносный горизонт.

На исследуемом полигоне ТКО в техногенных водах не определялось большинство показателей, которые позволили бы оценить динамику изменения состояния свалочного тела, современную стадию разложения отходов и возможность поступления компонентов из свалочного тела. Следует отметить, что аналогичная ситуация с изучением стадий разложения отходов сложилась на большинстве старых и ряде новых полигонов. В качестве одного из возможных альтернативных подходов для оценки стадии разложения отходов возможно использование такого ориентировочного показателя как отношение БПК₅/ХПК.

Однако на рассматриваемом полигоне показатель БПК₅³ не определялся. Таким образом, представление о состоянии свалки можно составить только на основании результатов анализа в фильтрате pH, ХПК и растворенного кислорода.

Прежде всего, следует остановиться на трактовке аэробных и анаэробных условий. По мнению (Lyngkilde and Christensen, 1992), аэробные условия определяются концентрациями свободного кислорода, превышающими 1,0 мг/дм³,

³ БПК₅ — показатель окисления за 5 суток.

а в фильтрате содержание растворенного кислорода в техногенных водах (фильтрате) не превышало $0,1 \text{ мг O}_2/\text{дм}^3$, т.е. на момент исследования для свалочного тела были характерны анаэробные условия.

Высокое значение ХПК ($2780 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$) в техногенных водах также указывает на наличие анаэробных условий. Согласно (Глушанкова, 2004), значения ХПК от 500 до $60000 \text{ мг O}_2/\text{дм}^3$ характерны для анаэробных условий в стадии ацетогенеза. Однако некоторые исследователи (Kjeldsen et al., 2002) начальную стадию фазы активного метаногенеза соотносят с предельными значениями от 500 до $4500 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$.

Как показали результаты газогеохимической съемки, выполненной в составе инженерно-экологических изысканий, в газовых пробах свалочных отложений присутствуют основные компоненты биогаза – метан и диоксид углерода. В большинстве газовых проб обнаруживается дефицит кислорода – менее 20%, что объясняется процессами анаэробного разложения органики. Содержание метана на разных участках изменяется от $< 0,05$ до 20,28% об., что свидетельствует о разной интенсивности процессов метанообразования на различных участках.

На основании изучения содержания растворенного кислорода, значения ХПК, результатов газогеохимической съемки, расчетных значений Eh в фильтрате установлено, что на момент исследования свалочное тело находилось в анаэробных условиях, на одних участках – в фазе ацетогенеза, на других – в фазе активного метаногенеза.

Достаточно сложной проблемой на территориях полигонов ТКО является определение окислительно-восстановительного потенциала (Eh) в фильтрате и подземных водах. В настоящее время в большинстве случаев этот показатель

не определяется, тогда как его важность при оценке миграции переменновалентных элементов не вызывает сомнения.

Представление о величине Eh можно получить на основании данных о содержании в водах растворенного кислорода и экспериментально изученных природных эмпирических зависимостей между концентрациями кислорода в подземных водах и Eh (Крайнов, Швец, 1992). Использование эмпирических зависимостей при интерпретации состояния вод на территории исследуемого полигона позволило ориентировочно оценить диапазон значений Eh в фильтрате — до 150 мВ. Можно предположить, что в фильтрате в теле свалки содержание растворенного кислорода ниже определенного в дренажных водах, так как некоторое количество может поступать при выходе фильтрата в дренажную канаву, и, соответственно, значения Eh также могут быть ниже.

Химический состав и загрязненность техногенных и подземных вод

Как показали результаты анализа, техногенные воды (фильтрат) характеризовались нейтральным значением pH — 7,43, минерализацией (по сухому остатку) — 5,5 мг/дм³, ХПК — 2780 мг/дм³, перманганатной окисляемостью >100 мг/дм³, содержанием растворенного кислорода — 0,1 мг/дм³. Воды очень жесткие, общая жесткость — 13,9 мг-экв/дм³.

Ассоциации загрязняющих веществ в техногенных водах имеют следующий вид⁴:

⁴ В ассоциации загрязняющих веществ: Ф — фенолы, НП — нефтепродукты, цифра справа от наименования элемента — коэффициент концентрации, равный отношению концентрации загрязняющего вещества в воде к ПДКв или ПДКрх.

Cd_{210} НП₈₄ $\text{Mn}_{5,7}$ $\text{Ni}_{5,5}$ $\text{Pb}_{2,8}$ $\text{Cl}_{>1,4}$ $\Phi_{1,1}$ – по ПДК_в,
 Φ_{1110} НП₁₆₈ Mn_{57} Cu_{64} Cd_{21} Zn_{11} Ni_{11} $\text{Fe}_{2,7}$ $\text{Sr}_{2,2}$ $(\text{NO}_2)_{1,5}$ $\text{Cr}_{1,2}$ –
 по ПДК_{рх}.

Оценка *состояния подземных вод* проводилась на основании анализа проб, отобранных под свалочным телом, с внешней стороны от дренажной канавы, а также из колодца на расстоянии более 200 м к юго-востоку от полигона. Поступление с фильтратом целого ряда веществ в подземные воды привело к их значительному загрязнению, особенно в сравнении с нормативами для водных объектов рыбохозяйственного значения.

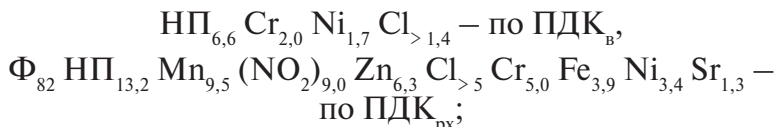
Подземные воды, отобранные из водоносного горизонта под свалочным телом с глубины 17 м, характеризуются нейтральным значением рН 7,61, минерализацией (по сухому остатку) – 2,2 г/дм³, общей жесткостью – 7,33 мг-экв/дм³, перманганатной окисляемостью > 100 мг/дм³, содержанием растворенного кислорода – 3,1 мг/дм³.

Подземные воды, отобранные с внешней стороны от обводной канавы с глубины ~1,2 м, характеризуются нейтральным значением (рН – 7,67), с минерализацией (по сухому остатку) – 1,9 г/дм³, общей жесткостью – 6,43 мг-экв/дм³, содержанием растворенного кислорода – 5,3 мг/дм³, перманганатной окисляемостью – 68,4 мг/дм³.

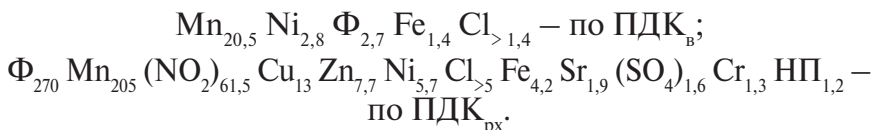
Подземные воды, отобранные на расстоянии более 200 м, характеризуются нейтральным значением рН – 7,51, минерализацией (по сухому остатку) – 2,8 г/дм³. Воды очень жесткие > 50 мг-экв/дм³, содержание растворенного кислорода – 6,1 г/дм³, величина перманганатной окисляемости – 2,28 г/дм³.

Ассоциации загрязняющих веществ имели следующий вид:

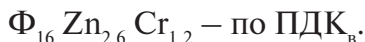
под свалочным телом —



с внешней стороны от дренажной канавы —



на расстоянии более 200 м —



Превышения $\text{ПДК}_\text{рх}$ не выявлены.

Поступление в подземные воды с фильтратом целого ряда веществ (фенолы, нефтепродукты, медь, кадмий, цинк, никель, железо, стронций, хром, хлориды, нитриты, сульфаты и др.) привело к их значительному загрязнению, особенно в сравнении с нормативами для водных объектов рыбохозяйственного значения. Судя по концентрации хлорид-иона, область загрязнения фильтратом в рассматриваемый период не распространялась на расстояние более 200 м.

Используя критерии выделения окислительно-восстановительных зон, сделан вывод, что по критерию содержания кислорода ($> 1 \text{ мг/дм}^3$) (Lyngkilde, Christensen, 1992) подземные воды на всех опробованных участках находились в аэробных условиях. Ориентировочные значения Eh, определенные на основании анализа природных эмпирических зависимостей (Крайнов, Швец, 1992), составляли в водах из скважины под свалочным телом — 150–350 мВ, из скважины за дренажной канавой — 210–400 мВ, из колодца — 220–450 мВ.

Как видно, разброс значений достаточно велик, но важно отметить, что значение Eh во всех случаях положительно.

Содержание растворенного кислорода в подземных водах увеличивалось при удалении от полигона ТКО от 3,1 до 6,1 мгО₂/дм³, соответственно возрастают и рассчитанные значения окислительно-восстановительного потенциала. В отличие от этого, величина ХПК при удалении от полигона уменьшается от 766 до 16 мгО₂/дм³, что свидетельствует о снижении содержания в подземных водах органического вещества.

Анализ формирования концентраций тяжелых металлов и соединений азота в подземных водах

В рассматриваемый период из свалочного тела с фильтратом поступает целый ряд тяжелых металлов. Количество концентрации металлов в фильтрате можно выразить следующей ассоциацией:



где цифра в нижнем индексе — концентрация элемента в мг/дм³.

Как отмечалось выше, концентрации тяжелых металлов (ТМ), поступающих в подземные воды, превышают установленные нормативы, в ряде случаев достаточно существенно:

В работе В.С. Путилиной и др. (2005) было показано, что наиболее опасные стадии «жизненного цикла» свалочного тела в отношении миграции ТМ в подземные воды — фазы аэробного окисления и анаэробного окисления в фазе ацетогенеза, в течение которых происходит образование карбоновых кислот и снижение pH, что обуславливает активное растворение металлов и образование комплексных соединений с органической материей. Интенсивность миграции

металлов в фильтрате за время «жизни» свалки изменяется по экспоненте и уменьшается на два порядка от фазы ацетогенеза до гумусовой фазы, но все же продолжается.

В фазе ацетогенеза в восстановительных условиях в свалочном теле многие металлы находятся в растворенном состоянии. Подвижность ТМ и опасность их выхода из свалочного тела частично зависят от комплексующей способности органической материи (в основном гумусовых веществ) и сульфидов в свалочных отходах. Гуминовые и фульвокислоты могут увеличивать растворимость и подвижность ТМ в свалочном теле за счет формирования растворимых комплексов при подкислении фильтрата. Однако значительная доля таких ТМ, как Cd, Ni, Zn, Cu, Pb, Cr, может быть связана с коллоидными фракциями гумусового вещества, в первую очередь, с размером от 0,001 до 0,01 мкм (Gounaris et al., 1993; Jensen et al., 1999; Klein et al., 1998). Минерализация свалочного фильтрата существенно влияет на формирование и подвижность растворимых комплексов металлов, способствуя их коагуляции и оседанию на поверхности твердой фазы.

В метаногенной фазе образуется большое количество твердого гумусового вещества, которое устойчиво в течение длительного периода времени и является прекрасным адсорбентом. Количество твердой фазы гумусовых веществ (ГВ) на несколько порядков превышает растворенную форму, и в этом случае можно предположить, что металлы в значительной степени связаны в неподвижной фракции ГВ.

Наибольшее сродство к органическому веществу характерно для меди, ее адсорбция составляет до 54,43% от общего количества металлов, адсорбированных ГВ, тогда как для Zn это 20,84%; Ni – 13,8%; Co – 7,61%; Mn – 4,32% (Путилина и др., 2005). По-видимому, этим объясняет наиболее

низкое содержание меди и более высокое содержание никеля, цинка, марганца в фильтрате рассматриваемого полигона.

Так как на момент изучения разложение отходов переходило в фазу активного метаногенеза, можно предположить, что наиболее интенсивный выход ТМ из свалочного тела уже произошел, и в рассматриваемый период наблюдался процесс затухания.

Сложность выводов о состоянии железа в подземных водах обусловлена отсутствием точной информации о величинах Eh и миграционных формах железа, в особенности его комплексах с органическими веществами гумусового ряда — фульво- и гуминовыми кислотами. На основании соотношения pH и рассчитанных значений Eh можно предположить, что в подземных водах на участке полигона железо может находиться преимущественно в форме Fe^{2+} (так как Eh в основном < 250 мВ).

В грунтовых водах на расстоянии 200 м железо присутствует в форме Fe^{3+} ($Eh > 250$ мВ). Возможно, на начальных этапах функционирования полигона железо, поступающее с фильтратом в подземные воды, осаждалось на окислительном барьере в виде гидроксидов. Гидроксиды железа и марганца имеют сильно развитую поверхность и являются прекрасным сорбентом для многих металлов, тем самым снижают их подвижность. Железо в различных формах может быть основным регулятором процессов адсорбции-осаждения и таким образом ограничивать протяженность анаэробной части шлейфа фильтрата. В дальнейшем, при развитии более восстановительных условий, ранее осажденное железо могло восстанавливаться, и сорбированные на свежесосажденном гидроксиде железа ТМ могли переходить в подземные воды.

Таким образом, потенциально возможны следующие пути поступления ТМ в подземные воды: 1 — со свалочным фильтратом, 2 — при восстановлении ранее осажденных гидроксидов железа и перехода сорбированных на них металлов в подземные воды.

Соединения азота. При проведении инженерно-экологических изысканий содержание иона аммония в подземных водах не определялось по данным инженерно-геологических изысканий в техногенных и подземных водах на участке расположения полигона концентрации иона аммония и нитратов составляли соответственно 18,8–23,1 и 7,2–8,8 мг/дм³, т.е. состав вод был в основном аммонийным. Преимущественно аммонийный состав подтверждается и расчетами величины Eh. По данным исследований (Крайнов, Швец, 1992), в околонеutralных подземных водах при Eh менее 200 мВ преобладает NH_4^+ , а при больших — NO_3^- . В скважине за дренажной канавой преобладает нитрат-ион, и можно предположить, что на этом участке существенное увеличение концентрации нитрат-иона происходит в результате процесса нитрификации аммония, поступающего с фильтратом.

Результаты оценки состояния свалочного тела и подземных вод на полигоне ТКО «Дубна Правобережная» наглядно показали важность определения более полного и представительного перечня показателей и компонентов для обоснованных выводов о сложившейся ситуации.

2.4.2. Защищенность подземных вод

Для оценки защищенности грунтовых вод от фильтрата было исследовано 17 полигонов, расположенных в Московской области, подлежащих рекультивации. Семь полигонов

размещены на аллювиальных грунтах, представленных песками различной крупности, остальные полигоны расположены на моренных суглинках с прослоями песка. Количественная оценка защищенности грунтовых вод проводилась по методике В.М.Гольдберга (Гольдберг, 1987), которая включает определение времени достижения загрязняющими веществами уровня грунтовых вод. Как показали полученные результаты, наиболее низкие показатели защищенности первого от поверхности водоносного горизонта в четвертичных отложениях характерны при размещении полигонов в аллювиальных песках. Кроме того, на всех полигонах отмечается постепенное поднятие уровня грунтовых вод, а в местах, сложенных относительно слабопроницаемыми грунтами, происходит процесс подтопления территории и формирование локального техногенного водоносного горизонта.

Водоносные горизонты в дочетвертичных отложениях характеризуются более высокой защищенностью (за исключением участков распространения гидрогеологических окон). Однако для получения точных оценок необходимо более детальное изучение гидрогеологического разреза в связи с существенной неоднородностью отложений. Так, например, неоднородность характерна для моренных суглинков, в которых на ряде участков отмечается большое количество прослоев песка.

Примером размещения полигона в аллювиальных отложениях может служить полигон ТКО «Шатура». Территория Шатурского района расположена в пределах слаборасчлененной заболоченной аллювиально-флювиогляциальной равнины центральной части Мещерской низменности. Гидрографическая сеть района представлена системой дре-

нажных канав и связана с геоморфологическими особенностями территории: слабой дренированностью, высоким положением уровня грунтовых вод, развитием процесса заболачивания. В геологическом строении территории участвуют: современные техногенные образования (tIV); современные озерно-болотные отложения (l,bIV); верхнечетвертичные аллювиальные и аллювиально-озерные отложения второй надпойменной террасы р. Поля (a,l2III); отложения оксфордского яруса верхнего отдела и келловейского яруса среднего отдела юрской системы ($J_3\text{ox}$ - $J_2\text{k}$); отложения доргомиловского, хамовнического и кревякинского горизонтов касимовского яруса верхнего отдела каменноугольной системы ($C_3\text{ksm}$). Гидрогеологические условия территории в пределах изученного разреза характеризуются наличием следующих водоносных горизонтов и разделяющих их слабопроницаемых слоев: надъюрский водоносный горизонт; слабопроницаемый слой юрских глин; касимовский водоносный горизонт. Надъюрский водоносный горизонт – безнапорный, уровень был вскрыт в пределах полигона ТКО на глубине 5,4–12,2 м (абсолютные отметки 119,3–119,6 м), на окружающей территории – на глубине 0,1–2,3 м (абсолютные отметки 119–120 м). На исследуемой территории у потока подземных вод нет единого направления, уровень водоносного горизонта тесно связан с уровнем воды в дренажной системе. Отдельные участки территории дренируются своими дренажными канавами, к которым направлен локальный поток. Водовмещающими породами горизонта являются пески разной крупности, торф, супеси (tIV; l,bIV; a,l2III). Подстилающим водупором служат слабопроницаемые юрские глины ($J_3\text{ox}$ - $J_2\text{k}$).

Характерной особенностью рассматриваемого полигона является изначально высокий уровень грунтовых вод в данном районе, в связи с чем создание полигона уже проходило в неблагоприятных условиях.

Примером размещения полигона на моренных суглинках может служить полигон ТКО «Часцы». Участок расположения полигона приурочен к водораздельной поверхности рек Москва и Десна. В геологическом разрезе площадки до глубины 16 м сверху вниз выделяются: современные техногенные образования (tIV); верхнечетвертичные озерно-болотные отложения (I,bIII); среднечетвертичные водно-ледниковые и озерно-ледниковые отложения московского горизонта (f,IgIIms); среднечетвертичные ледниковые отложения московского горизонта (gIIms). Надморенный водоносный горизонт — безнапорный, уровень был вскрыт по периметру полигона на глубине 1,9–4,2 м (абсолютные отметки 191,2–191,7 м), в пределах полигона — на глубине 39,0–45,3 м (абсолютные отметки 191,2–191,6 м). Водовмещающими породами являются: водно-ледниковые и озерно-ледниковые пески и песчаные прослои в озерно-болотных суглинках. Подстилающим водупором служат слабопроницаемые суглинки московской морены. Питается водоносный горизонт за счет инфильтрации атмосферных осадков и бокового притока, разгружается в нижележащий водоносный горизонт и в местную гидрографическую сеть. Водно-ледниковый горизонт в пределах участка работ распространен повсеместно. Горизонт приурочен к водно-ледниковым отложениям и озерно-ледниковым отложениям времени донского-московского возраста. Залегает на ледниковых отложениях донского возраста, перекрывается ледниковыми отложениями московской морены, в центральной

части участка исследований озерно-болотными отложениями микулинско-калининского возраста. Водовмещающие породы представлены песками крупными и средними с прослоями суглинков и супесей. Резкое снижение мощности отложений (0,6 м) на северной границе полигона объясняется наличием здесь палеодолины. Характерной особенностью является неоднородное строение флювиогляциальных и моренных отложений, что затрудняет точное определение защищенности подземных вод на данном участке.

Таким образом, на многих участках рекультивируемых и реконструируемых в Московском регионе защищенность грунтовых вод достаточно низкая, что связано как с отсутствием соответствующих нормативов при размещении старых полигонов, так и с подъемом уровня грунтовых вод при их эксплуатации. Соответственно, это определяет необходимость принятия дополнительных мер по изоляции чаш захоронения отходов. При оценке защищенности как грунтовых, так и напорных вод могут возникать систематические ошибки, связанные с подбором входных значений фильтрационных свойств грунтов, которые могут значительно различаться с неоднородным строением отложений.

На основании проведенных расчетов построена схема защищенности грунтовых вод. При построении схем были использованы различные методы. Все построения выполнены в программе Golden Software. Наилучшие результаты были получены при использовании метод крикинга и метода обратных взвешенных расстояний (IDW) (рис.2.4.1), так как количество точек небольшое, и при использовании других методов получены схемы с большими пропусками и окнами.

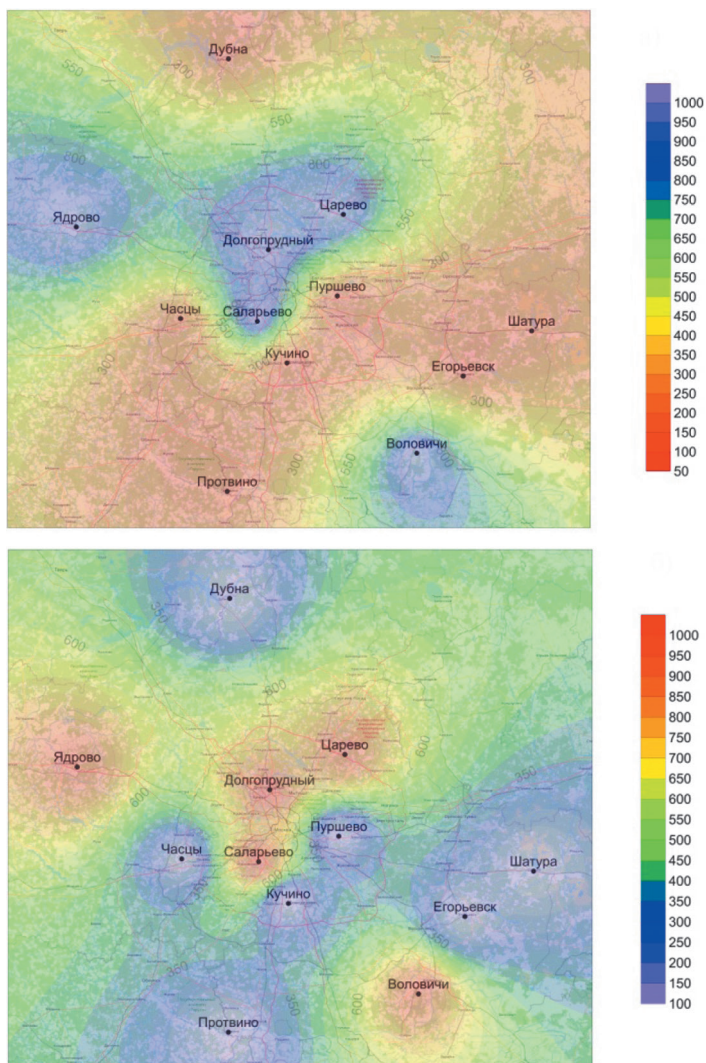


Рис. 2.4.1. Схемы защищенности подземных вод, построенные с использованием методов крикинга и обратных взвешенных расстояний (IDW)

Условные обозначения: шкала справа от схемы — время миграции консервативного химического вещества через зону аэрации (сут.)

Таким образом, на исследованных территориях в Московской области защищенность грунтовых вод достаточно низкая и требуются дополнительные меры по изоляции чаш захоронения отходов. Кроме того, необходимо учитывать постепенный подъем уровня грунтовых вод и подтопление территории. Повышение уровня подземных вод вызывает обводнение пород и развитие такого геологического процесса, как техногенный регрессивный литогенез. В процессе техногенного регрессивного техногенеза происходят существенные химико-минералогические преобразования пород, как, например, удаление растворимых солей, изменение обменного комплекса, гиббситизация глинистых минералов, каолинитизация гидрослюд, монтмориллонита и др. Это, в свою очередь, приводит к изменению состояния и инженерно-геологических свойств пород, наблюдается также изменение фильтрационных свойств пород.

2.4.3. Исследование отложений зоны аэрации на территории расположения полигонов ТКО как вторичного источника загрязнения

При решении данной задачи кроме исследования отложений зоны аэрации как вторичного источника загрязнения подземных вод также была проведена оценка опасности их воздействия на здоровье человека с использованием действующих нормативов (ПДК (ОДК) и фоновое содержание), были проанализированы преимущества и недостатки используемых подходов.

Для исследований был выбран ряд полигонов ТКО в Московском регионе, отличающихся размером площади участка захоронения отходов: малые — до 5,0 га, средние — 5–12 га,

крупные – 50–110 га. При оценке опасности загрязнения отложений на участках расположения данных полигонов были собраны и проанализированы материалы инженерно-геологических и инженерно-экологических исследований, проведенных различными организациями. В ходе изысканий в почвах на участках расположения полигонов были определены содержания в основном валовых форм химических элементов I–III класса опасности. Более широкий перечень химических элементов определялся только на крупных полигонах. Подвижные формы элементов выявлялись в редких случаях.

Оценка уровня химического загрязнения почв как индикатора неблагоприятного воздействия на здоровье населения проводилась по показателям, разработанным при сопряженных геохимических и геогигиенических исследованиях окружающей среды с действующими источниками загрязнения. Такими показателями являются: коэффициент концентрации химического вещества (Кс) и суммарный показатель загрязнения Zс. Кс определяется отношением фактического содержания определяемого вещества в почве в мг/кг почвы к фоновому. Суммарный показатель загрязнения Zс, по величине которого определяется категория загрязнения, рассчитывался как сумма n аномальных ($K_c > 1$) коэффициентов концентраций металлов I–III класса опасности – $Z_c = \sum K_c - (n-1)$. Для выяснения влияния различных фоновых содержаний на величину суммарного показателя загрязнения и структуру геохимических ассоциаций загрязняющих элементов при оценке уровня химического загрязнения грунтов проведен сравнительный анализ различных подходов к выбору фоновых концентраций веществ. В качестве фоновых значений были использованы: 1) нормативные значения для средней полосы России для дерново- под-

золистых песчаных и супесчаных почв по СП 11-102-97 (региональный фон); 2) базисные фоновые значения районов конкретных полигонов (локальный фон); 3) кларки почв (Лукашев, Лукашев, 1972). Следует отметить, что не во всех случаях при изысканиях определялся локальный фон.

Кроме того, при оценке опасности загрязнения почв использовался подход, заключающийся в оценке превышения концентрации компонента по отношению к ПДК (ОДК). Отметим, что использование ПДК (ОДК) для оценки опасности почв с позиций воздействия на здоровье населения остается дискуссионным, несмотря на широкое применение.

Для наглядности результаты оценки загрязнения почв по отношению к различным значениям представлены в виде геохимической ассоциации химических элементов, где индекс справа от символа химического элемента — величина коэффициента концентрации Кс (табл. 2.4.1).

Таблица 2.4.1

Геохимические ассоциации в поверхностном слое почв на участках максимального загрязнения

Геохимическая ассоциация	Z_c
<i>Полигон ТКО «Ядрово»</i>	
$Cd_{2,2} As_{1,5}^*$	2,6
$Hg_{6,5-7,0}^{**}$	6,5–7,0
<i>Полигон ТКО «Дубна Правобережная»</i>	
$Cu_{41,3} Zn_{10,5} Cd_{10,3} Hg_{4,7} Ni_{1,7} Pb_{1,4}^*$	64,9
$Hg_{47} Cu_{31} Zn_{9,5} Cd_{2,5} Pb_{2,2} Ni_{1,3}^{***}$	88,3
<i>Полигон ТКО «Каурцево»</i>	
$Cd_{6,6} Pb_{4,3-4,5} Zn_{2,7-2,8} Cu_{2,3-2,5}^*$	12,8–16,1
$Zn_{11,3-11,5} Cu_{7,2-7,8} Hg_{5,8} Pb_{4,1-4,3} Ni_{3,6-3,9} As_{1,9-3,9} Cd_{2,5-2,6}^{**}$	30,7–33,3

Окончание табл. 2.4.1

Геохимическая ассоциация	Z _c
Hg _{6,9} Pb _{6,4-6,7} Zn _{2,4-2,6} Cu _{1,7-1,8} Cd _{1,6} ***	15,1–15,6
<i>Полигон ТКО «Часцы»</i>	
Cd _{4,8-6,5} Pb _{2,4-4,5} Cu _{2,4-4,2} Zn _{1,9-2,9} *	15,8
Zn _{8,7-16,5} Cu _{7,5-13,2} Ni _{1,9-6,4} Pb _{3,1-5,8} As _{1,4-5,5} Cd _{2,1-2,8} Mn _{2,1-2,7} Hg _{1,8-2,5} **	26,1–39,5
Hg _{4,8-9,5} Pb _{3,6-6,7} Zn _{1,4-2,6} Cu _{1,8-3,2} Cd _{1,2-1,6} ***	9,7–16,0
<i>Полигон ТКО «Вальцево»</i>	
Pb _{4,6} Cu _{3,8} Cd _{1,8} *	8,2
Pb _{6,9} Hg _{6,8} Cu _{2,9} ***	14,6
<i>Полигон ТКО «Кучино»</i>	
Cd _{76,7} Cu _{12,1} Zn _{5,6} Hg _{4,9} As _{3,1} Pb _{2,8} *	100,2
Cd ₉₂ Cu _{16,7} Bi _{12,3} Hg _{10,7} Cr _{9,8} Zn _{8,6} W _{4,4} Mo _{2,5} Ni _{2,4} As _{2,1} Pb _{1,9} Sb _{1,3} Ba _{1,3} **	153,9
Hg ₁₆₀ Pb _{12,4} Cu _{4,4} Zn _{1,8} As _{1,3} ***	175,9
<i>Полигон ТКО «Тимохово»</i>	
Pb _{13,6} Cu _{2,5} *	15,1
Pb _{35,7} Cu _{10,1} Zn _{2,4} Ni _{1,4} Hg _{1,1} **	46,6
Pb _{20,4} Cu _{1,9} Hg _{1,8} ***	22,1

Примечание:

* отношение содержания элемента к региональному фону;

** отношение содержания элемента к кларку почв;

*** отношение содержания элемента к локальному фону.

Представленные данные позволили установить уровень полиметаллического загрязнения почв на рассматриваемых участках и определить основные геохимические ассоциации загрязняющих металлов и металлоидов, полученные с использованием различных реперных показателей.

*Полигоны ТКО, занимающие небольшую площадь
(до 3 га)*

Полигон ТКО «Ядрово»

По отношению к региональному фону ассоциация загрязняющих элементов в поверхностном суглинистом слое 0-0,2 м имела вид – Cd (2,2) As (1,5). Ниже по разрезу структура ассоциаций не изменялась, коэффициенты концентрации варьировали в незначительных пределах. Величина Zс в верхнем слое составляла 2,6, в целом по разрезу – 1,9–2,9. Таким образом, категорию загрязнения отложений можно оценить как допустимую.

По отношению к кларку почв вид ассоциации существенно изменился, ассоциация представлена только ртутью – Hg (6,5–7,0). Величина Zс в слое 0–0,2 м – 6,5–7,0, ниже по разрезу изменяется очень незначительно в пределах 4,2–7,1. В целом, несмотря на более высокие значения суммарного показателя загрязнения, категория загрязнения почв допустимая.

По отношению к ПДК(ОДК) превышений не зафиксировано.

Полигон ТКО «Дубна Правобережная»

По отношению к региональному фону уровень загрязнения отложений и ассоциации загрязняющих веществ на разных участках значительно изменялись. В поверхностном слое почв на участках максимального загрязнения ассоциации имели следующий вид: Cu (41,3) Zn (10,5) Cd (10,3) Hg (4,7) Ni (1,7) Pb (1,4), Hg (69,2) Cu (2,6) Cd (1,7) Zn (1,1) и Hg (25,7) Cd (2,6) Cu (1,3) (величина Zс – 27,7–71,6). На остальных участках ассоциация чаще всего была представлена одним элементом – кадмием, медью или цинком или сочетанием данных элементов, величина Zс не превышала 5,5.

По отношению к кларку почв в ассоциации на первое место вышла ртуть Hg (47) — Cu (31) Zn (9,5) Cd (2,5) Pb (2,2) Ni (1,3), на участках максимального загрязнения величина Zс достигала 693 (чрезвычайно опасная категория загрязнения). Однако нельзя исключить, что такие высокие содержания ртути связаны с ошибками анализа или обработки данных.

По отношению в ПДК отмечено превышение по ртути (до 3,3 ПДК), меди (до 4,7 ПДК) и цинку (до 2,1 ПДК).

По отношению к миграционному водному показателю превышения отмечены только на участке максимального загрязнения.

Полигоны ТКО, занимающие площадь 6–12 га

Полигон ТКО «Каурцево»

По отношению к региональному фону ассоциация загрязняющих элементов в слое 0–0,2 м имела следующий вид: Cd (6,6) Pb (4,3–4,5) Zn (2,7–2,8) Cu (2,3–2,5). Ниже, в слое 0,2–1,0 м структура ассоциаций изменилась, второе место в ассоциации заняла медь. Суммарный показатель загрязнения в целом варьировал в пределах 12,8–16,1 (допустимая категория загрязнения), повышенные значения отмечены в слое 0,2–1,0 м.

По отношению к местному фону ассоциация в поверхностном слое приобрела более сложный вид — Zn (11,3–11,5) Cu (7,2–7,8) Hg (5,8) Pb (4,1–4,3) Ni (3,6–3,9) As (1,9–3,9) Cd (2,5–2,6). Величина Zс составляла 30,7–33,3 (умеренно опасная и опасная категории загрязнения). Таким образом, категория загрязнения отложений стала более опасной. В слое 0,2–1,0 м величина Zс увеличилась, достигая 42 в основном за счет увеличения содержания меди.

По отношению к кларку почв в ассоциации на первое место выходит ртуть. В слое 0,0–0,2 м – Hg (6,9) Pb (6,4–6,7) Zn (2,4–2,6) Cu (1,7–1,8) Cd (1,6), величина Zc – 15,1–15,6 (допустимая категория). Ниже по разрезу существенных изменений в структуре ассоциации не прослеживается, но в отдельных слоях цинк и медь меняются местами.

По отношению к ПДК(ОДК) превышений не выявлено.

Полигон ТКО «Часцы»

По отношению к региональному фону так же, как и на предыдущих участках, в ассоциацию загрязняющих веществ входили кадмий, свинец, медь, цинк – Cd (4,8–6,5) Pb (2,4–4,5) Cu (2,4–4,2) Zn (1,9–2,9), но на разных участках соотношение свинца, меди и цинка изменялось. Величина Zc варьировала по разрезу незначительно и не превышала 15,8 (допустимая категория загрязнения).

По отношению к местному фону ассоциация в поверхностном слое приобрела более сложный вид – Zn (8,7–16,5) Cu (7,5–13,2) Ni (1,9–6,4) Pb (3,1–5,8) As (1,4–5,5) Cd (2,1–2,8) Mn (2,1–2,7) Hg (1,8–2,5). Величина Zc увеличилась, составляя 26,1–39,5 (умеренно опасная и опасная категории загрязнения). Таким образом, категория загрязнения отложений стала более опасной. В слое 0,2–1,0 м уровень загрязнения по Zc достиг 47,6 в основном за счет увеличения содержания цинка и меди.

По отношению к кларку почв ассоциация имела вид – Hg (4,8–9,5) Pb (3,6–6,7) Zn (1,4–2,6) Cu (1,8–3,2) Cd (1,2–1,6). Ниже по разрезу существенных изменений в структуре ассоциации не прослеживается, но в отдельных слоях свинец, цинк и медь меняются местами. Величина Zc составляла от 9,7 до 17,4 (категории загрязнения от допустимой до умеренной опасной).

Полигон ТКО «Непейно»

На большинстве обследованных участков ассоциация загрязняющих веществ по отношению к региональному фону представлена только кадмием — Cd (1,4–14,2), и только на одном участке зафиксирована более полная ассоциация — Cd (5,5) Pb (2,9) Hg (1,9) Cu (1,6) As, Ni (1,1). Величина Zс не превышала 14,2 (допустимая категория загрязнения).

По отношению к кларку почв ассоциация загрязняющих веществ в основном представлена ртутью, свинцом, кадмием, на участке максимального загрязнения — Hg (19) Pb (4,3) Cd (1,3) Cu (1,2). Величина Zс не превышала 14,2 (допустимая категория загрязнения), за исключением одного участка, где отмечена умеренно опасная категория загрязнения (Zс = 22,8).

По отношению к ПДК(ОДК) превышений не отмечено.

Полигон ТКО «Вальцево»

По отношению к региональному фону ассоциация загрязняющих веществ в основном представлена серебром или кадмием — As (1,1–2,1) или Cd (1,3–2,1). Только на двух наиболее загрязненных участках вид ассоциации усложняется — Pb (4,6) Cu (3,8) Cd (1,8) и Cd (45,5) As (1,5) Cu (1,1). Ниже по разрезу в слое 1.0–2.0 незначительные превышения фона отмечены для никеля. Значения Zс в основном не превышали 8,2 (допустимая категория загрязнения), за исключением одного участка, где величина Zс достигала 46,1 (опасная категория загрязнения), а ассоциация имела вид — Cd (45,5) As (1,5) Cu (1,1).

По отношению к кларку почв вид ассоциации изменился и на большинстве участков в ассоциации присутствовала только ртуть — Hg (1,1–6,8). На наиболее загрязненных

участках ассоциации имели вид – Pb (6,9) Hg (6,8) Cu (2,9) и Cd (10,9) Hg (3,6) и значения Zс не превышали 14,6 (допустимая категория загрязнения).

По отношению к ПДК(ОДК) превышения отмечены только на двух участках – Pb (1,06) и As (1,6).

*Полигоны ТКО, занимающие площадь более
60 га*

Полигон ТКО «Кучино»

В почвах этого полигона определялся наиболее полный перечень элементов I–III класса опасности – V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Sr, Mo, Cd, Sb, Ba, W, Hg, Pb, Bi. Все эти элементы в разной последовательности представлены в ассоциациях на участках опробования.

По отношению к региональному фону величина Zс изменялась от 1,1 до 100,2 (от допустимой до чрезвычайно опасной категории загрязнения). На участке максимального загрязнения ассоциация имела следующий вид: Cd (76,7) Cu (12,1) Zn (5,6) Hg (4,9) As (3,1) Pb (2,8).

По отношению к кларку почв вид ассоциации изменился и на большинстве участков на первое место вышла ртуть, на участке максимального загрязнения – Hg (160) Pb (12,4) Cu (4,4) Zn (1,8) As (1,3). Величина Zс составляла от 1,2 до 175,9 (от допустимой до чрезвычайно опасной категории загрязнения).

По отношению к местному фону величина Zс изменялась от 1,8 до 153,9 (от допустимой до чрезвычайно опасной категории загрязнения). На участке максимального загрязнения ассоциация загрязняющих веществ имела вид: Cd (92) Cu (16,7) Bi (12,3) Hg (10,7) Cr (9,8) Zn (8,6) W (4,4) Mo (2,5) Ni (2,4) As (2,1) Pb (1,9) Sb (1,3) Ba (1,3).

Полигон ТКО «Тимохово»

По отношению к региональному фону только на трех из 28 участков выявлены ассоциации загрязняющих веществ: As (2,6) Pb (13,6) Cu (2,5) и Zn (1,5). Величина Zс не превышала 15,1 (допустимая категория загрязнения).

По отношению к местному фону состав ассоциации существенно расширился, в ассоциацию вошли свинец, медь, цинк, никель, ртуть, мышьяк: Pb (35,7) Cu (10,1) Zn (2,4) Ni (1,4) Hg (1,1). Величина Zс составляла 1,1–46,6. Уровень полиметаллического загрязнения почв оценивается для большинства опробованных образцов как допустимый, на двух участках — умеренно-опасный, на одном — опасный.

По отношению к кларку почв величина Zс 1,4–22,1 (от допустимой до умеренно опасной категории). Ассоциации загрязняющих веществ на большинстве участков представлены ртутью, свинцом, медью, цинком на участках наиболее высокого загрязнения — Hg (9) Pb (3,9) Cu (3,2) Zn (2,5). Величина Zс — 1,1–15,5. Ассоциации загрязняющих веществ в основном представлены только ртутью, на участке максимального загрязнения — Pb (20,4) Cu (1,9) Hg (1,8).

По отношению к ПДК(ОДК) превышения отмечены только на одном участке — Pb (1,6).

Изучение форм нахождения тяжелых металлов в почвах

С целью более детального исследования почв как вторичного источника загрязнения подземных вод на территориях полигонов ТКО «Дубна Правобережная» и «Тимохово» проведен отбор проб почв и подземных вод, выполнены химико-аналитические исследования валового состава элементов (разложение спеканием с последующим кислотным разложением), форм их нахождения с использованием метода

вытяжек — водной, ацетатно-аммонийной и азотнокислой. По результатам анализа выделялись следующие группы закрепления элементов: 1 — водорастворимые; 2 — легкоподвижные (извлеченные ацетатно-аммиачным буферным раствором), включающие, главным образом, обменно-сорбированные формы (в вытяжку также могли перейти водорастворимые соединения, карбонатные и сульфатные формы, однако, как показывают результаты предыдущих исследований, в основном их доля незначительна); 3 — кислоторастворимые, позволяющие оценить уровень техногенного загрязнения грунтов.

Результаты проведенных исследований показали следующее.

На полигоне ТКО «Тимохово» превышения ПДК в почвах вокруг полигона наблюдались по мышьяку (1,5–3,2 ПДК) во всех пробах и никелю на одном участке (1,4 ПДК). Превышение ПДК по подвижным формам выявлено только на одном участке по меди (1,2 ПДК).

Процентное содержание подвижных форм элементов от их валового содержания в среднем составило (%): водорастворимых /обменных / кислоторастворимых — Co — 0,1-0,3/2-19/8-40, Ni — 0,1-0,2/2-9/5-22, Cu — 0,1-0,4/1-11/29-53, Zn — 0,1-0,4/9-18/12-39, As — 0,1-0,5/1-5/4-22, Cd — 0,1-0,3/19-39/34-58, Pb — 0,01-0,1/16-28/57-66.

На полигоне ТКО «Дубна Правобережная» превышения ПДК в почвах вокруг полигона зафиксированы по никелю (1,2-2,7 ПДК), меди (1,1-12 ПДК), мышьяку (1,0-2,0 ПДК) и на одном участке по цинку (13 ПДК) и кадмию (3,1 ПДК). Превышение ПДК по подвижным формам выявлено на одном участке по цинку (6 ПДК). Процентное содержание подвижных форм элементов от их валового содержания в

среднем составило (%): водорастворимых/ обменных/ кислоторастворимых Co — 0,2-0,7/3-12/12-75, Ni — 0,1-0,6/1-4/8-63, Cu — 0,2-0,5/1/13-66, Zn — 0,1-0,2/4-19/14-77, As — 0,3-0,7/1-2/6-15, Cd — 0,1-0,2/ 13-28/26-73, Pb — 0,003-0,2/5-20/48-65.

В целом на исследованных участках аэротехногенное загрязнение почв на полигоне «Дубна Правобережная» выше и состав элементов, превышающих ПДК, разнообразнее (Ni, Cu, As, Pb), несмотря на то, что размеры полигона ТКО «Тимохово» существенно больше. Интенсивность загрязнения почв, количественный и качественный состав форм нахождения элементов значительно отличаются на разных участках вокруг полигонов. Отмеченные различия, по-видимому, связаны не только с воздействием полигона, розой ветров, но и со спецификой почвенно-растительного покрова (наличием залесенных, пахотных, заболоченных и других участков) на прилегающих территориях. Значительные процентные содержания обменных форм Co, Zn, Cd, Pb (полигоны «Тимохово»/«Дубна»: Co — до 19/12, Ni — до 9/4, Cu — до 11/1, Zn — до 18/19, As — до 5/2, Cd — до 39/28, Pb — до 28/20) обусловлены высокой способностью почв на ряде участков к формированию сорбированных форм, а кислоторастворимых форм (полигоны «Тимохово»/«Дубна»: Co — до 40/75, Ni — до 22/63, Cu — до 53/66, Zn — до 39/77, As — до 22/15, Cd — до 58/73, Pb — до 66/65) свидетельствуют о высоком уровне техногенного загрязнения почв, так как в фоновых почвах содержание кислоторастворимых форм этих элементов обычно не превышает 1–5% от их валового содержания.

Таким образом, сочетание низкой защищенности грунтовых вод и существенного содержания подвижных форм

ряда химических элементов обуславливают опасность загрязнения подземных вод даже после рекультивации полигонов, что подтверждает необходимость проведения мониторинговых исследований не только на участках расположения свалочного тела, но и на прилегающих территориях.

Количественная оценка грунтов как вторичного источника загрязнения подземных вод

Как показали результаты изучения уровня загрязненности отложений на участках расположения полигонов ТКО, по отношению к миграционному водному показателю, наиболее опасный источник вторичного загрязнения подземных вод — полигон ТКО «Кучино», где была отмечена очень высокая степень опасности для хрома. В связи с этим в качестве объекта для применения подхода с использованием моделирования влаго- и массопереноса в зоне аэрации был выбран данный полигон, а в качестве загрязняющего вещества — хром.

Предполагалось, что: 1 — профиль загрязнения формируется за счет поступления с инфильтрацией ионов хрома в период функционирования свалки (50 лет); 2 — после рекультивации полигона в дальнейшем загрязнение не поступает и начинается процесс очищения зоны аэрации. Общее время моделирования составило 100 лет.

Интенсивность инфильтрации принималась постоянной — 100 мм/год, что соответствует среднесноголетнему значению. Концентрация ионов хрома в инфильтрационном питании принималась постоянной и равной содержанию хрома в пробе с максимальным из зафиксированных значений — 250 мг/л.

Профиль двуслойный. В верхней части песчаные отложения мощностью 6 м с коэффициентом фильтрации 10 м/сут., в нижней части суглинки мощностью 3 м с коэффициентом фильтрации 0,0005 м/сут. Глубина до уровня грунтовых вод — 5 м.

Расчеты проводились в несколько этапов при помощи программного комплекса WHI Un Sat Suite Plus версия 2.2.0.2, разработанного в Waterloo Hydrogeologic Institute в 2002 г.

Моделировалось формирование профиля загрязнения и последующее очищение зоны аэрации по модели VS2DT. Значения параметров дисперсии, молекулярной диффузии, плотности скелета сухой породы принимались для всех типов отложений по умолчанию из базы данных, включенной в Un Sat Suite Plus. Коэффициент распределения принят для верхнего слоя 2, для нижнего — 7.

Результаты расчета концентрации хрома в зоне аэрации для периодов формирования загрязнения и периода очищения приведены на рис. 2.4.2.

Формирование профиля загрязнения и последующая очистка ненасыщенной зоны моделировались по модели VS2DT. Значения параметров дисперсии, молекулярной диффузии и плотности скелета сухой породы взяты для всех типов отложений по умолчанию из базы данных, входящей в состав Un Sat Suite Plus. Коэффициент распределения принят для верхнего слоя 2, для нижнего слоя — 7.

При моделировании массопереноса в зоне аэрации принимались относительно высокая фильтрационная проницаемость отложений (10 м/сут.) и низкие значения K_d (2 мл/г). При этом результаты моделирования показывают процесс распространения загрязнения как медленный, время протекания которого измеряется десятками лет. Концентрации,

близкие к концентрации на входящей границе (250 мг/л), формируются в приповерхностном слое, достигая глубины 1,5 м только через 50 лет. С такими же скоростями происходит очищение загрязненного профиля. Через 50 лет на некоторых глубинах сохраняются концентрации более половины от исходного загрязнения.

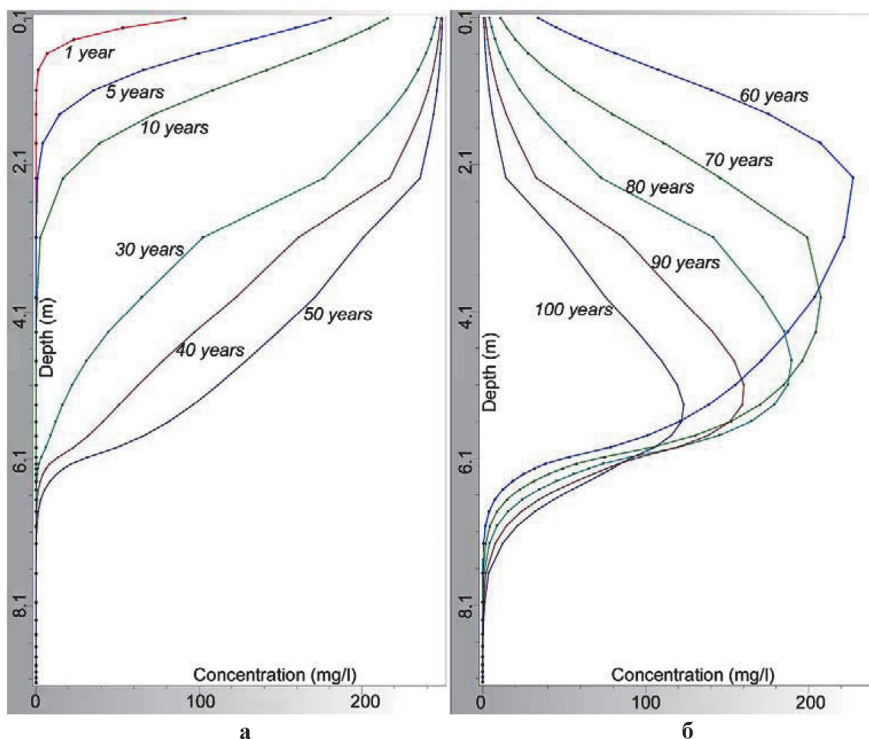


Рис. 2.4.2. Изменение содержания хрома в отложениях зоны аэрации:
а — период образования загрязнения; б — период очистки
(после рекультивации полигона)

Сравнение использования различных фоновых параметров (региональных и базисных) при оценке уровня загрязне-

ния отложений показало, что величина показателя общего загрязнения и, соответственно, категория загрязнения существенно зависят от выбора фоновых концентраций. Кроме того, происходит изменение структуры геохимической ассоциации, отражающей уровень аномальности химических элементов. Показана существенная разница в уровне загрязнения почв при использовании кларков элементов, региональных и локальных фоновых содержаний; сформулирован вывод о том, что при изучении процессов концентрации элементов в почвах целесообразнее использовать локальные (базовые) фоновые значения изучаемой территории.

При рассмотрении целесообразности применения базисных концентраций элементов в качестве фона надо отметить следующее. В действующих нормативных и нормативно-методических документах фон определяется как содержание вещества на территориях вне сферы локального антропогенного воздействия территорий, не подвергающихся техногенному воздействию или испытывающих его в минимальной степени. В то же время ряд исследователей считает (Москаленко, Гинзбург, 2001), что на урбанизированных территориях в качестве точки отсчета, относительно которой следует производить оценку состояния компонентов экосистемы и разрабатывать меры по восстановлению загрязненных городских территорий, следует применять базисные концентрации элементов, т.е. концентрации, характерные для данной экосистемы до начала планируемой хозяйственной деятельности в ее пределах. Несмотря на то, что в большинстве случаев вследствие интенсивного воздействия техногенных факторов городские базисные состояния экосистем характеризуются повышенными концентрациями химических элементов в сравнении с природными усло-

виями, в городах существуют базисные (нормальные для города) состояния экосистем. Кроме того, сравнение уровня воздействия на реципиентов с базисными концентрациями более обосновано, использование в качестве фона базисных параметров позволяет получить более структурированную модель загрязнения, с информацией о возможных источниках загрязнения и выявляющую участки базисного и переходного состояния почв (Москаленко, Гинзбург, 2001). Результаты, полученные при использовании предлагаемого «базисного» подхода для оценки опасности загрязнения отложений на участках расположения полигонов ТКО, подтвердили целесообразность его применения на урбанизированных территориях.

В современной практике оценка данных отложений как источника вторичного загрязнения подземных вод обычно проводится по степени их загрязнения подвижными формами химических веществ по отношению к ПДК подвижных форм или (что более обосновано) к миграционному водному показателю вредности. К основным недостаткам данного метода относятся следующие: 1) данный показатель разработан для ограниченного количества химических элементов; 2) использование метода не позволяет количественно оценить влияние вторичного источника загрязнения на подземные воды и время достижения загрязняющими компонентами уровня грунтовых вод.

Для оценки геохимической опасности зоны аэрации как вторичного источника загрязнения подземных вод металлами наиболее перспективным является подход, заключающийся в моделировании влаго- и массопереноса (прогноз концентраций, поступающих на уровень грунтовых вод в за-

данные периоды времени и в разрезе зоны аэрации). Для представления о влиянии поступающего в водоносный горизонт загрязнения на следующем этапе следует выполнять моделирование переноса загрязняющего вещества в водоносном горизонте (в исследуемой части площади). Сложность в применении данного метода заключается в основном в параметрическом обеспечении, а именно, в определении параметров сорбции. При применении лабораторных методов параметры сорбции, как правило, очень завышены. Кроме того, на участках расположения полигонов ТКО значительную роль играет органическое вещество, в связи с чем необходимо знать параметры сорбции комплексных соединений металлов с органическим веществом.

Глава 2.5. Принципы создания современного безопасного полигона ТКО

(В.Г. Заиканов, Ю.А. Мамаев)

2.5.1. Задачи исследований по разработке природоподобных технологий захоронения ТКО

Развитие природоподобных технологий в сфере обращения с отходами производства и потребления затрагивает много сторон данной отрасли и должно быть ориентировано на совершенствование технологий обустройства полигонов захоронения ТКО. Направления работ по созданию безопасных для окружающей среды «идеальных» полигонов весьма многогранные и должны исходить из основных принципов и задач, решаемых в рамках проводимой в настоящее время реформы обращения с отходами. Цели и задачи этой реформы уже нашли отражение в принятых в 2022 г. поправках к СП 320.1325800.2017 «Полигоны для твердых коммунальных отходов. Проектирование, эксплуатация и рекультивация». Целью строительства безопасных полигонов ТКО является обеспечение и полный контроль устойчивого и экологически безопасного функционирования данных объектов как на стадии длительной эксплуатации, так и после их закрытия.

Разработка природоподобных технологий обустройства безопасных полигонов ТБО должна опираться на следующие основные принципы:

- генеральный курс на снижение общего объема захораниваемых на полигонах отходов с постепенным увеличением до 100% отходов, направляемых на переработку, за счет

активного внедрения и совершенствования альтернативных методов обращения с отходами, максимального извлечения из них вторичных ресурсов в рамках перехода на рельсы экономики замкнутого цикла;

- отказ от захоронения отходов, не прошедших предварительную обработку; разработка методов предварительной механико-биологической обработки и стабилизации захораниваемых отходов;
- создание и совершенствование системы искусственных и природных барьеров в основании и вокруг полигона, обеспечивающих защиту природной среды от загрязнения, в том числе развитие методик поиска геологических массивов, надежно изолирующих свалочное тело;
- создание и совершенствование технологий природоподобного разложения свалочного тела с возвращением по прошествии времени массива ТКО в биосферу, без создания угрозы окружающей среде на основе изучения биохимических процессов, протекающих в свалочном теле.

2.5.2. Основные принципы размещения безопасных полигонов ТКО

Территориальное планирование размещения полигонов ТКО, их проектирование и строительство выполняются на основе разработанных и согласованных региональных программ и территориальных схем обращения с отходами.

Важными государственными документами, призванными регулировать размещение отходов, являются территориальные схемы обращения ТКО, функции эксперта которых призвана осуществлять публично-правовая компания «Российский экологический оператор». В Постановлении

Правительства РФ № 430 от 22 сентября 2018 г. «О разработке, общественном обсуждении, корректировке территориальных схем в области обращения с отходами производства и потребления, в том числе с твердыми коммунальными отходами, а также о требованиях к составу и содержанию таких схем» указывается в основном на необходимость сбора информации о накоплении отходов, их количестве, наличии объектов переработки и утилизации и т.д. Наряду с этим отсутствуют требования к сведениям о геологии, геоморфологии, гидрогеологии, охраняемых природных территориях, природно-климатических и других природных особенностях т.д. Таким образом, содержащаяся в конечном документе информация о степени загруженности территории отходами и объектами обращения с ними не отражают самое главное — механизм определения мест размещения полигонов. Главной причиной этого положения является то, что территориальная привязка объектов размещения ТКО носит чисто топографический характер и не связана с особенностями природных условий, являющимися основными факторами определения риска размещения отходов в земной коре.

По сути, любой полигон с течением времени становится частью геологической среды (точнее — техносферы) и функционирует по ее законам. Таким образом, территориальная схема должна содержать не только топографическую привязку места накопления отходов и объектов обращения с ними, но и характеристику природных условий, обуславливающих расположение полигонов как пространственных тел. Такая характеристика должна, по существу, представлять карту инженерно-геологического районирования территории, с выделением на ней отдельных областей или рай-

онов по степени их пригодности для создания полигонов (Козлякова и др., 2024; Осипов и др., 2024; Экзарьян, 2018).

Полигоны размещаются в геологической среде – приповерхностной толще пород, состав и свойства которых являются важнейшими факторами безопасности создаваемых полигонов. В зависимости от геологических условий полигоны могут быть заглублены частично в геологический массив (полуподземный вариант) или полностью погружены в толщу пород (подземный вариант). В первом случае дно и часть боковых стенок полигона находятся в природном массиве, а сверху перекрываются слоем грунта глинистого состава в сочетании с водонепроницаемыми пленками или другими гидроизолирующими материалами. При создании подземных вариантов дно и борта полигонов оказываются полностью в толще природного массива.

Таким образом, изолирующие свойства полигонов и их безопасность во многом определяются составом и свойствами пород, в которых они находятся. Важнейшими геологическими факторами, определяющими условия создания полигонов, являются: литологический состав пород и их свойства, гидрогеологические условия и развитие опасных природных явлений (землетрясения, наводнения, оползни, карстовые провалы и др.) (рис. 2.5.1).

Устройство полигонов на территориях со сложными инженерно-геологическими условиями: в горных и предгорных районах, в долинах рек, на участках, подверженных воздействию опасных геологических процессов, в толщах пород с неоднородным гранулометрическим составом, просадочными или низкими несущими свойствами – регламентируется нормами проектирования, изложенными в ГОСТах и сводах правил.



Рис. 2.5.1. Оползень в теле мусорной свалки вблизи г. Дели (Индия)
(Источник: URL: [https:// yandex.ru/images/ ok.ru](https://yandex.ru/images/ok.ru))

Наиболее пригодными для размещения полигонов ТКО являются территории с ровным слабо расчлененным рельефом, в геологическом разрезе которых присутствуют толщи или мощные горизонты глинистых слабопроницаемых пород, а грунтовые воды залегают на глубине 5 и более метров. Глинистые грунты с низким коэффициентом фильтрации являются природными барьерами для проникновения загрязняющих элементов из свалочных тел в природную (геологическую) среду.

Таким образом, территории для размещения объектов обращения с ТКО, и в первую очередь полигонов захоронения не утилизируемых отходов должны иметь определенные качества пригодности по геоморфологическим, геологическим и гидрогеологическим показателям. Для этой оценки проводятся инженерно-геологические съемки территорий и их целевое районирование.

Инженерно-геологическое районирование выполняется в разных масштабах для решения разных задач, а именно:

- мелкомасштабное (1:2500 000 – 1:500 000) для градостроительного планирования и разработки территориальных схем обращения с отходами в границах территорий субъектов Федерации и Федеральных округов РФ;
- среднемасштабное (1:200 000 – 1:50 000) для функционального зонирования и составления территориальных схем обращения с отходами территорий городских округов (муниципальных образований) в пределах субъектов Федерации;
- крупномасштабное (1:25 000 – 1:1000) для проведения изысканий, проектирования и строительства на выбранных участках объектов обращения с отходами, включая полигоны захоронения ТКО.

По природным признакам выделяются территории, пригодные, условно пригодные и непригодные для размещения полигонов ТКО. Отдельные участки из состава условно пригодных могут быть переведены в категорию пригодных путем применения строительных и инженерных мероприятий.

Инженерно-геологическая карта позволяет существенно повысить практическую ценность территориальных схем. Ее необходимо использовать как территориальную матрицу, на которую накладывается информация, предусмотренная в постановлении Правительства РФ № 1130. Только после создания такой информационной системы должна рассматриваться возможность разработки различных логистических схем связи между объектами обращения с ТКО и прогнозируемыми местами расположения полигонов.

Для более эффективного (оптимального) размещения объектов ТКО на территориях разного масштаба следует проводить их специальное тематическое зонирование с учетом природных и социально-экономических показателей,

определяющих пригодность территорий для реализации поставленных задач и целесообразность создания на них объектов обращения с ТКО и специальной транспортной инфраструктуры.

К природным оценочным критериям относятся показатели, характеризующие:

- географическое расположение территорий (внутриконтинентальные, прибрежные морские, горные и предгорные, пустынные, арктические и др.);
- климатические характеристики территорий (средние и экстремальные показатели температуры воздуха, влажности, направления и силы ветра, продолжительности экстремальных климатических периодов, случаи природных чрезвычайных ситуаций и катастроф);
- ландшафтно-геоморфологические условия (низменности, возвышенности, горные районы, тундра, леса, степи, пустыни, антропогенные измененные и др.);
- геологическое строение (состав, строение, состояние и свойства грунтовых толщ, залегающих с поверхности, особенности состава и режима подземных вод; современная активность эндогенных, тектонических, экзогенных и криогенных процессов).

Группа социально-экономических критериев оценки территорий для размещения объектов ТКО может включать следующие характеристики:

- населенность территории (южные районы всех субъектов РФ заселены существенно плотнее, чем северные, что диктует необходимость размещения здесь большего количества объектов обращения с ТКО);
- степень использования земель под объекты гражданского и транспортного строительства, промышленного и сельско-

хозяйственного производства, лесного хозяйства и другого назначения. Чем больше занятых земель и объектов на них, тем больше отходов производства и потребления;

- энергетическую обеспеченность и развитость транспортной инфраструктуры территории, которые обуславливают инвестиционную привлекательность её хозяйственного использования и высокие темпы социально-экономического развития, что также связано с формированием отходов.

Особое значение критерии второй группы имеют при разработке территориальных схем обращения с отходами при обосновании выбора мест сбора, хранения, сортировки, переработки, утилизации и захоронения ТКО. Здесь учитываются: объемы и морфологический состав ТКО, формирующихся на рассматриваемой территории; границы населенных пунктов, водных объектов, охраняемых территорий с защитными зонами. Определяются доступность и протяженность транспортных коммуникаций между объектами обращения с ТКО; необходимость и возможность применения строительных технологий и материалов для встраивания полигонов в природную (геологическую) среду.

В дальнейшем, в пределах благоприятных областей, определяются наиболее перспективные площадки для размещения полигонов ТКО, на которых проводятся инженерные изыскания с целью получения показателей, необходимых для их проектирования. По данным изысканий и анализа существующих планов по социальному и хозяйственному использованию, а также кадастровых ограничений, окончательно решается вопрос, какая площадка в наибольшей мере будет отвечать требованиям создания

безопасного полигона. Таким образом, инженерно-геологическое районирование уже на первых этапах решения вопроса о размещении пунктов захоронения ТКО позволяет оценивать принципиальную возможность принятия управленческих решений по созданию безопасного полигона с учетом его экологической и экономической эффективности.

2.5.3. Инженерное обустройство безопасных полигонов ТКО

Основная цель строительства полигонов ТКО как сложных инженерных сооружений, предназначенных для хранения, приема и консервации отходов, заключается в изоляции ТКО и продуктов их разложения от окружающей среды.

При проектировании полигона ТКО должны быть определены состав сооружений и предварительные технико-экономические показатели объекта: виды и объемы принимаемых отходов (суточные и годовые), вместимость участка захоронения, срок эксплуатации объекта, с возможностью реконструкции и увеличения емкости полигона, конструктивные и технологические схемы обустройства полигона и размещения ТКО.

Полигон ТКО состоит из взаимосвязанных территориальных частей (СП 320.1325800. 2017):

- участок размещения отходов с картами захоронения отходов и прудами для сбора фильтрационных вод;
- производственная зона с комплексами по обработке, обезвреживанию и утилизации отходов, а также установками для очистки фильтрационных вод и утилизации биогаза (рис. 2.5.2);

- вспомогательная зона для размещения сооружений административного, хозяйственного, бытового, складского, транспортного, контрольного и охранного назначения.



Рис. 2.5.2. Система удаления и утилизации биогаза из тела мусорной свалки

(Источник: URL: <https://yandex.ru/images/masaika.ru>)

К адаптационным технологиям встраивания полигона ТКО в геологическую среду можно отнести:

- инженерную подготовку территории под строительство полигона (сведение растительности, экскавацию, перемещение, отсыпку и планировку грунта);
- строительство основания (ложа), боковых конструкций и покрытий свалочных тел, с применением современных

материалов: геосинтетических пленок, полимерных геомембран, бентонитовых матов, геокомпозитных смесей, фитоматериалов и других;

- методы компостирования органических отходов в составе ТКО с применением минеральных и биологически активных добавок;
- получение метана из свалочного тела и его утилизацию в энергетических установках;
- сбор, отведение и очистку фильтрата из свалочных тел и поверхностных вод;
- строительство объектов инженерной защиты территории полигона и сооружений от опасных природных процессов (эрозии, оползней, провалов, затопления, подтопления);
- создание сетей производственного экологического контроля и мониторинга за состоянием полигонов, свалочных тел и прилегающих территорий.

Нормативные документы по проектированию и эксплуатации полигонов ТКО содержат требования по обеспечению устойчивости и безопасной работы полигона и, прежде всего, устойчивости свалочного тела. Для этого контролируются высота свалочного тела, крутизна его откосов, возможное развитие промоин, оползней, провалов (СП 320.1325800.2017). Для предупреждения этих процессов выполняются: уплотнение свалочного тела, планировка откосов, их террасирование, укрепление металлическими решетками, защита от атмосферных осадков с водоотведением, озеленение поверхностного слоя откосов.

Также нормативными документами предписываются меры соблюдения пожарной, биологической (химико-биологической) и радиационной безопасности объекта (СП 3.131130.2009, система противопожарной защиты; СП 499.1325800.2021,

инженерная защита; ГОСТ Р 59415-2021, биологическая безопасность; СНиП 2.01.28-85). Для соблюдения требований пожарной безопасности на территории полигона должны быть предусмотрены:

- система противопожарной защиты и сеть оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре;
- административный контроль за исполнением запретов на размещение взрыво-пожароопасных и самовоспламеняющихся отходов, сжигание ТКО, разведение огня. С целью недопущения возгорания отходов выполняются дегазация и вентилирование свалочного тела посредством скважин и траншей.

Выполнение требований биологической (химико-биологической) безопасности полигона ТКО обеспечивается ГОСТ Р 59418-2021 «Биологическая безопасность. Очистка сточных, технических, поверхностных вод и фильтратов полигонов твердых коммунальных отходов на основе обратного осмоса. Общие технические условия», который предписывает:

- выбор земельного участка для полигона ТКО со слабо фильтрующими грунтами в основании ложа участка захоронения, и глубиной залегания грунтовых вод не менее двух метров от уровня ложа;
- создание искусственного гидроизоляционного покрытия из геосинтетических материалов в основании полигона;
- строительство отдельных систем отведения, сбора и очистки сточных, технических, поверхностных вод и фильтрата из свалочного тела (ГОСТ Р 59418-2021, биологическая безопасность);
- систему сбора и обезвреживания свалочного газа; его утилизации на энергетических установках;

- постоянный производственный экологический контроль технологических процессов на территории полигона и мониторинг состояния окружающей природной среды.

Радиационная безопасность на полигоне ТКО достигается соблюдением запрета на размещение отходов, обладающих радиоактивными свойствами, а также использованием контрольно-измерительной аппаратуры, обеспечивающей входной и производственный контроль поступающих и обрабатываемых отходов. Для этих целей на территории производственной зоны должны размещаться: участок радиационного контроля за отходами, оборудованный рамкой или портативным детектором радиационного автоматизированного контроля, место для углубленного радиационного обследования и площадка для отстоя автотранспорта и другой техники с повышенным радиационным фоном.

Согласно принятым в западных странах правилам, проектирование полигонов ТКО определяет состав отходов, которые планируется на них размещать, поэтому для создания безопасных полигонов требуется сортировка отходов до их укладки на хранение. Твердые коммунальные отходы представляют неупорядоченные смеси остатков продуктов питания, бытовых и промышленных предметов потребления. Подсчитано, что в ТКО могут содержаться до 1700 различных компонентов, многие из которых сохраняют полезные качества и могут быть вторичным сырьем для воспроизводства новой продукции и производства электроэнергии. Эта часть отходов должна быть выделена из общей массы отходов и направлена на переработку. Следует подчеркнуть, что обращение с отходами без сортировки делает эту систему неэффективной и относит ее к затратному производству. Поэтому одним из требований реализации полигонной тех-

нологии является сортировка отходов с выделением вторичных ресурсов (Council directive 1999/31/EC of 26 April 1999; Постановление Правительства Российской Федерации от 12 октября 2020 г. № 1657).

Сортировка отходов — трудоемкий и дорогостоящий процесс. По данным западной прессы, цена сортировки составляет около 35% от общей стоимости обращения с отходами и равняется примерно 300–400 евро за 1 т отходов. По этой причине многие субъекты Российской Федерации отдают предпочтение полигонному захоронению ТКО без их сортировки и переработки, что не согласуется с мировой тенденцией.

Сортировка может осуществляться населением и носить селективный характер. Наряду с этим она может быть механизированной с применением индустриальных методов. На практике часто используется комбинированная сортировка на основе обоих подходов. Для организации селективной сортировки в жилых районах создается необходимая инфраструктура — емкости, маркированные для сбора отдельных видов отходов. При использовании промышленных комплексов мусор подвергается дроблению и сепарированию с применением специальных методов в соответствии с ресурсным предназначением. Компоненты, представляющие вторичные ресурсы, направляются на переработку, а не утилизируемая часть отходов — на полигоны, где она обезвреживается и захоранивается. Поэтому создание полигона предваряют действия, направленные на обеспечение сортировки ТКО.

Процедура управления потоками отходов определяет количество и качество отходов, поступающих на захоронение,

что, в свою очередь, влияет на протекание процессов в основном теле полигона и его эмиссию в окружающую среду. Процесс управления заключается в том, чтобы контролировать не только то, что попадает из полигона в окружающую среду (эмиссия вредных веществ), но и то, что попадает на полигон.

Естественная защита

К мероприятиям по естественной защите окружающей среды от сверхнормативного воздействия объекта захоронения относится выбор участка для размещения полигона на основании критериев минимизации постоянного негативного воздействия полигона на объекты окружающей среды. Снижение экологической опасности можно добиться путем использования элементов естественной защиты площадки полигона. Целесообразно обеспечить соблюдение определенных принципов:

- выбор площадки должен быть осуществлен таким образом, чтобы при любом вредном воздействии его последствия были минимальными;
- при проектировании системы противофильтрационной защиты необходимо рассмотреть естественные факторы самоочищения от загрязнений, которые могут впоследствии заменить искусственные мероприятия.

Процедура выбора площадки относится к инвестиционному этапу жизненного цикла полигона и включает стадии: поиск вариантов размещения площадки и их анализ; выбор оптимального варианта площадки; проведение инженерно-экологических изысканий; разработка предпроектной документации; экспертиза и согласование предпроектной документации; принятие решения о выборе площадки. Выбор

места размещения полигона осуществляется по санитарно-экологическим, социально-экономическим, градостроительным, ландшафтным, топографическим, геологическим, гидрологическим, гидрогеологическим, климатическим и другим критериям.

Обоснование принимаемого решения по выбору площадки осуществляется с учетом действующей нормативной базы на всех стадиях жизненного цикла объекта, оценки потенциального влияния объекта на окружающую среду, общественного мнения и процедуры согласования и экспертизы. Обоснование осуществляется для ограниченного числа площадок с выбором из их числа одной.

Искусственная защита

Искусственная защита включает организацию инженерно-технических сооружений для сокращения эмиссии полигона (методы аэробной стабилизации) или предотвращения попадания загрязняющих веществ в окружающую среду (система сбора, отвода и очистки фильтрата; системы дегазации и утилизации биогаза, окончательное покрытие и т.д.). Выбор технологии складирования и технического оформления процесса должен осуществляться в каждом конкретном случае в соответствии с качеством поступающих на полигон отходов и основными характеристиками площадки расположения полигона.

Технология процесса захоронения отходов должна реализовываться так, чтобы в период контролируемого функционирования полигона происходило как можно более полное разложение ТКО, снижающее потенциал их опасности. Массив складированных отходов, составляющий тело полигона, представляет собой непрерывно действующий био-

химический реактор, в котором субстрат (ТКО) находится на разных стадиях разложения.

Выполненные ранее исследования протекающих на разных этапах жизненного цикла в теле полигона позволили установить основные факторы, влияющие на характер и интенсивность процессов и сопутствующих им эмиссий. Основными внутренними факторами являются: содержание органического углерода (Сорг); соотношение целлюлоза/лигнин (С/L); влажность (W) и температура массива отходов (Т). Управление этими факторами позволяет в определенных пределах регулировать процессы, протекающие в теле полигона, влиять на интенсивность и состав эмиссии. Внутренние параметры полигона находятся под влиянием внешних факторов. Факторами внешнего воздействия являются качественный состав и свойства отходов, поступающих на захоронение, их физические характеристики (плотность, влажность и др.), климатические параметры (температура, альbedo снега, влажность атмосферного воздуха, гидрологические (поступление поверхностных вод (ПС), подтопление грунтовыми водами) показатели (Вайсман, 2012; Загорская, 2014; Перельман, 1966).

Задача разработки мероприятий по гидроизоляции полигона в организационно-методическом направлении требует разработки системы управления водным балансом полигона, а в техническом — устройства систем изоляции поверхности полигона и противодиффузионной защиты его основания. Объекты размещения отходов являются потенциальными источниками вторичного загрязнения окружающей среды. Основными факторами загрязнения являются эмиссии загрязняющих веществ в атмосферный воздух и объекты гидросферы. Наибольшую потенциальную опасность представляет воздействие на объекты гидросферы.

2.5.4. Обеспечение экологической безопасности полигонов ТКО

В основе создания безопасного полигона лежат два основных принципа, представляющие теоретическую основу полигонной технологии. Первый принцип заключается в предотвращении контакта ТКО с элементами окружающей среды. Это достигается путем размещения полигона в геологическом массиве пород с высокими изоляционными характеристиками, создающих природные барьеры (экраны), препятствующие взаимодействию отходов с атмосферой, а также с поверхностными и подземными водами. Важно добиваться всесторонней изоляции отходов с поверхности, основания и бортов. Для этого необходимо создавать своеобразный «мешок», в котором отходы находились бы в замкнутом пространстве.

В случае, когда массив, в котором создается полигон, сложен породами с недостаточными изоляционными показателями, обусловленными литологическим составом, трещиноватостью, структурной неоднородностью, а также их небольшой мощностью, возникает необходимость перехода на многобарьерную (мультибарьерную) защиту полигона. В этом случае наряду с природным барьером, создаются искусственные (техногенные) барьеры из различных непроницаемых пленок, глинистых матов, песчано-цементных смесей и др. В такой ситуации гидроизоляционная система полигона становится многобарьерной и мультибарьерной.

Второй принцип полигонной технологии — создание системы дренирования биогаза и загрязненных вод. Такие системы основываются на имеющихся методах дренирования газо- и водонасыщенных пористых тел. Важно, чтобы эти системы входили в инфраструктуру полигона и функциони-

ровали на протяжении всего срока его сосуществования. С помощью этих устройств собираемый биогаз передается в действующую электро- или топливную систему и утилизируется, а фильтрационные растворы, в зависимости от степени их очистки, используются при решении различных хозяйственных задач.

Создаваемые таким образом полигоны, окруженные природными и техногенными барьерами, позволяют удалять и утилизировать образующийся в отходах биогенный (свалочный) газ и загрязненную воду, что является важным фактором экологической безопасности полигонной технологии обращения с ТКО.

Природные и техногенные барьеры

К числу благоприятных природных факторов, значительно снижающих отрицательное воздействие полигона на водные объекты, относится наличие в его основании естественного геологического барьера — слоя пород (например, глинистых), который способен эффективно препятствовать выносу загрязнений полигона в горизонты подземных вод. Такой барьер одновременно выполняет функции естественного противofiltrационного экрана, уменьшающего общий объем инфильтрации загрязненных стоков; природного сорбционного и ионообменного фильтра, задерживающего значительную часть загрязнений из фильтрующихся через него стоков. Главной является функция очистки фильтрующихся стоков, поэтому нельзя сводить понятие геологического барьера только к его экранирующему эффекту. Защитный эффект естественного геологического барьера оценивается использованием аналогов или по результатам специальных исследований, проводившихся в сопоставимых условиях. От-

части функции такого барьера выполняет также и глинистый подстилающий слой пленочного экрана. Для максимального использования защитного эффекта геохимического барьера при выборе площадки под полигон предпочтителен вариант с глубоким залеганием подземных вод.

Барьеры на нижней границе полигона. Монолитность основания полигона и его противofiltrационная способность имеют первостепенное значение для предотвращения фильтрации из тела ТКО растворов и загрязненных подземных вод. Наиболее эффективные природные экраны образуют влажные глины монтмориллонитового, гидрослюдистого и смешаннослойного состава. Поэтому массивы, сложенные такими глинами, имеют наименьшие фильтрационные характеристики, не более 10^{-5} м/сут. Такие природные экраны толщиной от 1,5 м могут полностью обеспечить изоляцию ТКО в основании полигона (рис. 2.5.3, а).

При наличии в основании полигона менее гидрофильных глинистых пород (суглинки, тяжелые супеси) с коэффициентом фильтрации 10^{-5} – 10^{-3} м/сут. природный барьер можно считать эффективным при мощности толщи более 3 м. При меньшей мощности природного барьера или его большей фильтрационной способности (10^{-3} – 10^{-1} м/сут.) потребуется применение комбинированного (природно-техногенного) барьера. В этом случае над природным создается техногенный барьер (рис. 2.5.3, б), включающий (в основании) плотный гидроизолирующий слой, поверх которого укладывается основной гидроизоляционный слой в виде слоя полиэтиленовой пленки или других материалов, перекрытых сверху защитным слоем из песка и супеси. На техногенный барьер сверху насыпается 50–80 см дренажного материала, в котором укладывается перфорированная дренажная труба.

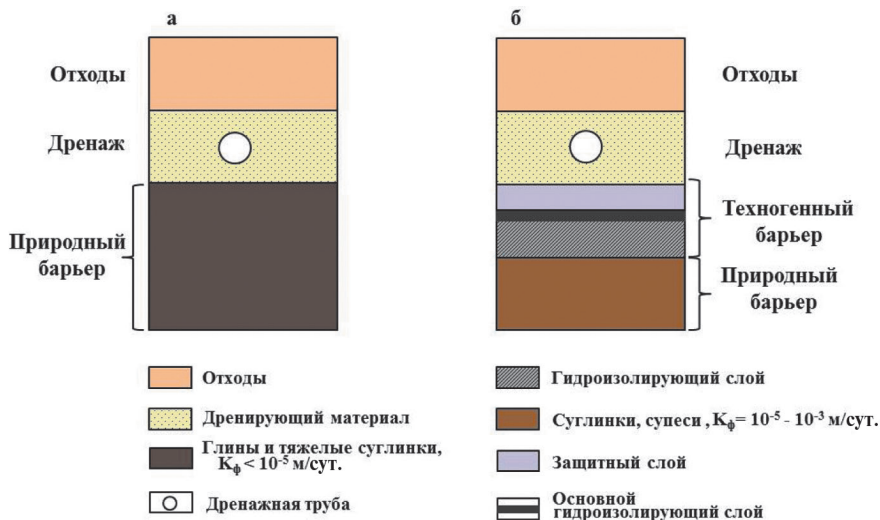


Рис. 2.5.3. Природный (а) и комбинированный природно-техногенный барьер (б) на нижней границе полигона

Барьеры на бортах полигонов. Наибольшую сложность представляет создание изоляционных барьеров в бортах полигонов, если они состоят из пород с невысокими изоляционными свойствами. Для обеспечения всесторонней изоляции такого полигона необходимо создание техногенного барьера по всему периметру полигона. Создание такого барьера в разрезе, состоящем из пород различного состава, который сохранял бы свою монолитность и изолирующие свойства, — задача довольно сложная. Тем более, что боковые стенки котлована полигона могут иметь различную крутизну, в связи с чем удержание на них полиэтиленовых пленок, глинистых матов и других гидроизолирующих покрытий часто не представляется возможным. Поэтому при создании техногенных барьеров в таких условиях целесообразно при-

менять методы технической мелиорации грунтов, позволяющие преобразовывать структуру и свойства грунтовых массивов. К числу таких методов относятся методы цементации, глинизации, горячей битумизации грунтов и др. (Воронкевич, 2005; Гончарова, 1973). Весьма перспективным для этих целей является метод «геокомпозит» (Осипов, Филимонов, 2002; Патент 2015248RU).

В момент рекультивации создаются барьеры перекрытия полигонов. Барьер, перекрывающий тело отходов с поверхности, возводится при заполнении полигона или при его реконструкции. Защитный поверхностный барьер является техногенным и имеет мощность не менее 1,5 м (рис. 2.5.4).

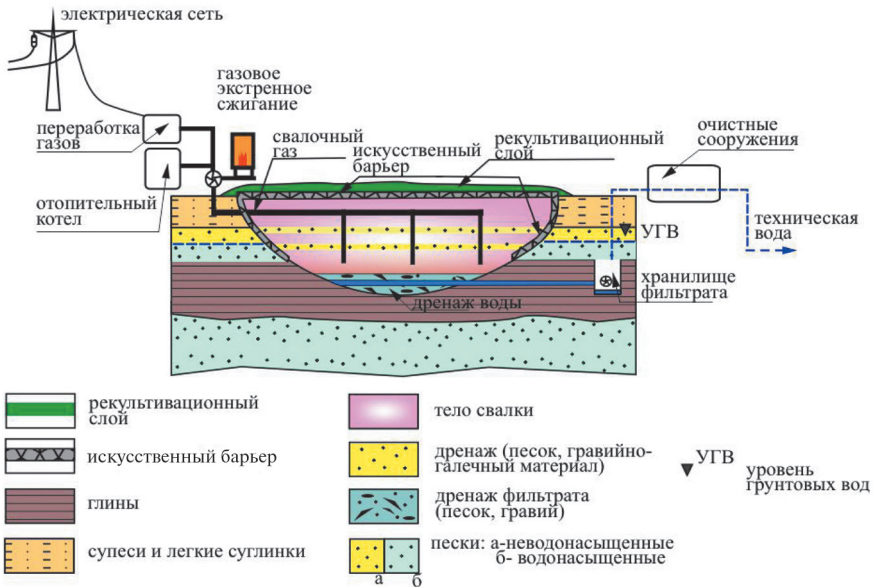


Рис. 2.5.4. Схема строения безопасного полигона в геологическом массиве

Перед созданием барьера поверхность отходов выравнивается и засыпается хорошо уплотняющимся материалом, на который накладывается гидроизоляционный слой, выполняющий основные защитные функции в создаваемом барьере. Для создания гидроизоляционного слоя применяются различные синтетические пленки, битумный материал, водонепроницаемые маты. Поверх гидроизоляционного слоя отсыпается рекультивационный материал, который покрывается сверху 0,15–0,30 м слоем почвы.

Системы сбора и утилизации биогаза и фильтрационных растворов

Для реализации техноприродного принципа обращения с отходами создающиеся полигоны должны включать постоянно действующую систему дренирования накапливающихся внутри полигона свалочных газов и загрязненных вод. Такие системы позволяют собирать вредные продукты разложения отходов и их утилизировать, обеспечивая экологическую безопасность создаваемых полигонов.

Система дренирования и утилизации свалочных газов. Система вентиляции и утилизации свалочных газов включает в себя создание в теле отходов вентиляционных проходов (каналов) для накопления, транспортировки и последующей утилизации газов. Каналы представляют собой прослойки обломочного материала (крупный песок, гравий, битый кирпич), толщиной около 0,5 м, укладываемые с расстоянием 2,5–3,0 м между ними. Вертикальная связь между вентиляционными слоями осуществляется с помощью перфорированных труб, постепенно наращиваемых при заполнении полигона. Система вентиляционных труб заканчивается ма-

гистральной трубой, по которой газ выходит на поверхность и направляется на утилизацию (см. рис. 2.5.4).

Система сбора и утилизации загрязненных вод. Дополнительно полигоны оборудуются и системой сбора и удаления загрязненных поровых вод, образующихся при разложении и уплотнении отходов. Для этого на дне полигона создается дренажный слой мощностью не менее 0,5 м, подобно слоям, предназначенным для дренирования и сбора газов. Дренажный слой и уложенные в нем трубы создают водозаборную систему полигона.

Описанные системы удаления с полигона свалочных газов и загрязненных вод могут носить нестандартный характер. Важно, чтобы эти сооружения входили в состав инфраструктуры полигона и функционировали на протяжении всего срока его существования.

Экологические требования к созданию безопасных полигонов ТКО

Рассмотренные выше принципы обращения с отходами на основе их разложения и последующей ликвидации (захоронения) позволяют сформулировать общие требования к размещению и созданию экологически безопасных полигонов. Общий вид такого полигона показан на рис. 2.5.4.

Основываясь на изложенном выше, можно сформулировать геоэкологические требования к полигонной технологии и созданию безопасных полигонов:

Отходы, предполагаемые к захоронению на полигоне, должны быть отсортированы, органические отделены от неорганических, так как этот вид захоронения — это только органические ТКО.

Отходы, укладываемые на полигоне, должны быть изолированы и не создавать угрозы загрязнения и снижения качества окружающей среды.

Размещение безопасных полигонов должно осуществляться на основании инженерно-геологического районирования и детальных инженерных изысканий территории с учетом литологического состава пород, гидрогеологических условий и развития опасных природных явлений.

Для обеспечения надежной изоляции отходов следует применять комплекс природных и искусственных барьеров.

При создании полигона наиболее благоприятной ситуацией следует считать наличие природного барьера достаточной мощности, сложенного породами с низким коэффициентом фильтрации. При отсутствии природных барьеров необходимо применение мультибарьерной защиты (сочетание природных и искусственных барьеров).

При создании барьерной защиты на боковых сторонах полигонов следует применять методы технических барьеров, в том числе технической мелиорации грунтов.

При рекультивации с поверхности полигон должен перекрываться техногенными грунтами толщиной не менее 1,5 м, содержащими на поверхности плодородный слой почвы.

Полигон должен быть оборудован дренажной системой для сбора и утилизации свалочного газа и очистки образующихся инфильтрационных вод.

Территория полигона не должна подвергаться действию опасных природных процессов (сейсмические явления, подтопления, наводнения, оползневые явления, карстовые и другие процессы).

Полигон должен быть оборудован постоянно действующей системой комплексного мониторинга для наблюдения за процессами разложения и нейтрализацией продуктов разложения, а также экологическим состоянием прилегающих территорий.

В последующих главах подробнее остановимся на методах подготовки отходов для захоронения на полигонах и принципах создания мультибарьерной защиты геологической среды.

Глава 2.6. Современные методы обработки отходов перед захоронением

(Т.И. Юганова)

2.6.1. Механико-биологическая обработка — инновационный метод обращения с ТКО

В последнее время в европейских странах ключевую роль в попытках избежать прямого захоронения биоразлагаемых отходов играет их механико-биологическая обработка (МБО) — аэробное компостирование и/или анаэробное сбраживание. МБО сокращает количество направляемых на полигоны органических отходов благодаря извлечению однородных фракций для использования при рекуперации энергии/материалов и производству биостабилизированного продукта с меньшим воздействием на окружающую среду.

В данном разделе на основе анализа литературных источников рассмотрены состав и качество стабилизированных отходов (СО), варьирующие в зависимости от источника сырья, степени разделения исходных отходов, технологии МБО, продолжительности стадии созревания, сезона компостирования. Проведено сравнение СО по уровню биологической стабильности с захороненными на полигоне обычными ТКО разного возраста.

Особенности метода.

Понятие о стабилизированных отходах

При ответственном потреблении и обращении с отходами на первое место ставится принцип снижения образования отходов, затем их вторичное использование и перера-

ботка и, наконец, сжигание и захоронение. Важнейшие цели мусорной реформы в России — сократить направляемый на полигоны объем отходов и уменьшить их негативное воздействие на окружающую среду. В странах ЕС, где мало свободных земель для размещения новых полигонов, захоронение считается наименее предпочтительным вариантом, применяемым только к остаточным фракциям предыдущей обработки (Lombardi et al., 2017).

ТКО содержат большое количество органических материалов — от 25 до 70% (Di Lonardo et al., 2012). Их негативное воздействие на окружающую среду при захоронении связано с выбросами метана и образованием сильно загрязненных фильтратов. Директива ЕС о полигонах отходов 99/31/СЕ (Council directive, 1999; Директива Совета, 2018) ограничивает количество захораниваемой биоразлагаемой фракции.

В отдельных странах ЕС практика управления отходами существенно различается. Так, Дания, Нидерланды, Швеция и Бельгия вывозят на свалки <1,4% ТКО, сжигают >35%, а остальное обрабатывают различными способами: механическая или ручная сортировка, компостирование, анаэробное сбраживание и т.д. Но в большинстве недавних членов ЕС, Испании и Греции наиболее распространенная стратегия управления отходами — захоронение на полигонах (>50%). Страны ЕС, широко практикующие рекуперацию материалов (включая компостирование), сжигают большую часть остаточных отходов (Lombardi et al., 2017).

Один из важнейших методов обращения с ТКО — их *механико-биологическая обработка* (МБО, MBT). Из двух основных ее продуктов — топливо из отходов и *стабилизированные отходы* (СО, MBT-waste) — последние обычно подлежат захоронению на полигоне из-за относительно вы-

сокого содержания некомпостируемых материалов (например, кусочков пластика и стекла) и тяжелых металлов (ТМ) по сравнению с биоотходами, которые можно использовать в сельском хозяйстве (Lieto et al., 2020). Этим СО отличаются от компоста, произведенного из отдельно собранных органических отходов; он обычно используется как кондиционер почвы для улучшения ее физических и химических свойств и в качестве удобрения.

МБО сокращает количество направляемых на полигоны органических отходов, производя СО, оказывающие при захоронении меньшее воздействие на окружающую среду. Однако растет интерес и к возможности использования СО. Государства ЕС могут разрешить применение СО, отвечающих определенным требованиям, в качестве компонента в искусственных почвах или на тех земельных участках, которые не предназначены для производства пищевых продуктов и кормов (например, для окончательного покрытия свалок, восстановления ландшафта в старых карьерах и шахтах, устройства противошумных барьеров, строительства дорог) (Di Lonardo et al., 2012). Поэтому оценка экологических характеристик различных видов СО имеет большое значение для увеличения их использования (Pantini et al., 2015) и определения критериев, *при которых отходы перестают быть отходами* (Lombardi et al., 2018). Пока такие критерии еще не выпущены на европейском уровне, но в некоторых государствах (например, в Италии и Австрии) имеются собственные правила в отношении требований к СО, пригодным для использования. Эти требования выражаются в терминах общего химического состава (например, общего содержания ТМ), но никаких ограничений по концентрациям в фильтрате, которые могут быть опасны для окружающей среды, не налагается (Lombardi et al., 2018).

Обычно предприятие МБО имеет стадию механической обработки, включающей сортировку, разделение, измельчение, просеивание и отделение пригодных для рециклинга материалов (металлы, стекло, пластмассы). На этой стадии образуются два отдельных потока: крупная фракция, которая затем обрабатывается для получения топлива из отходов, и фракция меньшего размера, богатая разлагающимися органическими соединениями. Последняя подвергается биологической обработке с использованием анаэробного или аэробного процесса, чтобы стабилизировать разложение (Di Lonardo et al., 2012).

Установки МБО различаются последовательностью этапов процесса и назначением: для захоронения или использования (Di Lonardo et al., 2012). Правила, касающиеся захоронения СО, различаются по Европе. Например, в Германии лучше разработаны процессы предварительной обработки отходов и установлены строгие критерии для захоронения СО. Это гарантирует высокие стандарты с позиций нескольких параметров, например, содержания общего органического углерода (ООУ) в этих отходах и образования биогаза за 21 сут. в анаэробных условиях. Напротив, в Великобритании установленных стандартов для СО нет, т.е. эти отходы, вероятно, будут иметь более низкое качество (меньшую стабильность), чем в Германии (Siddiqui et al., 2012). В некоторых странах (Швейцария, Австрия, Франция, Италия) в основном используются *аэробные* системы. Они обычно включают стадию первичной интенсивной обработки (закрытая система с принудительной аэрацией), за которой следует стадия созревания в туннелях для компостирования, с типичным временем выдержки 4 недели для первой стадии и 6–8 недель для второй. Установки МБО, использующие

анаэробный процесс, распространены в Испании и Германии. Здесь мелкая фракция обычно сбраживается с использованием процессов сухой или влажной ферментации (3–4 недели), а твердый остаток обрабатывается в системе туннельного компостирования в течение 3–6 недель (Di Lonardo et al., 2012).

В общем при МБО процессы разложения отходов, идущие бесконтрольно в теле полигона многие десятилетия, сокращаются до 0,5–6 месяцев (Загорская, 2014).

Качество СО может значительно варьировать в зависимости от источника сырья, конфигурации предприятия, процедуры компостирования и продолжительности стадии созревания (Di Lonardo et al., 2012). Предварительная обработка органической фракции ТКО влияет на поведение этих материалов в окружающей среде с позиций как эмиссии биогаза, так и качества и количества фильтрата (Robinson et al., 2005; Siddiqui et al., 2013; van Praagh, 2009). В последние годы было проведено несколько исследований СО, направленных на оценку их физико-химических свойств (летучие твердые вещества, общий и растворенный органический углерод, содержание ТМ) и биологических характеристик (дыхательная активность, потенциальная эмиссия биометана).

Разнообразие состава стабилизированных отходов

Механически отсортированная органическая фракция ТКО характеризуется малым размером частиц (<50–80 мм), высоким содержанием органических веществ (содержание летучих твердых веществ может варьировать от 50 до 80 масс.%) и высокой влажностью (40–55 масс.%). Биостабилизация на предприятиях МБО осуществляется двумя способами: аэробным компостированием и/или анаэроб-

ным сбраживанием. Хотя анаэробный процесс имеет преимущества (сокращение времени обработки и выделения запахов), аэробные системы также широко используются и иногда могут быть энергетически самоподдерживающимися из-за образования биогаза. После биостабилизации СО могут подвергаться дополнительной механической обработке — просеиванию до 10–20 мм, отделяющему крупногабаритную фракцию из некомпостируемых материалов (пластмасса, бумага, стекло) для размещения на полигоне или термической обработки (Di Lonardo et al., 2012).

Сезонные колебания характеристик СО на одном предприятии. Химические и физические свойства СО зависят от нескольких факторов: природа исходных ТКО, тип механической предварительной обработки, конструкция стабилизационной установки, условия эксплуатации, продолжительность биообработки и т.д. (Di Lonardo et al., 2012). Это обуславливает значительное разнообразие состава СО. Даже для одного предприятия МБО он может заметно варьировать. Так, сезонные колебания характеристик СО описаны в работе (Di Lonardo et al., 2012). Проанализированный материал — это СО с предприятия МБО в Италии, которое принимает ТКО. Образцы отбирались в ходе трех различных сезонных кампаний. Наблюдались заметные вариации содержания многих ТМ в зависимости от времени года, например, Al — на 34%, Co — 48%, Ni — 50%, Cu — 59%, Pb — 55%.

Сравнение состава некоторых СО из Великобритании и Германии. Значительно бóльшим разнообразием отличается состав СО в разных странах. Были изучены два различных вида СО: из Великобритании, обработанные аэробно, и из Германии, прошедшие анаэробную и аэробную обработку (Siddiqui et al., 2012, 2013). СО Великобритании были получены

на крупном предприятии по предварительной обработке отходов в Южной Англии. На механической стадии отходы сортировались для извлечения вторсырья. Оставшиеся отходы затем были разделены на более мелкие фракции путем измельчения и просеивания с последующим извлечением черных металлов. Далее отходы компостировались аэробно в принудительно вентилируемых валках с регулярным увлажнением и переворачиванием в полностью закрытых цехах в течение 6 недель. Затем материал вновь просеивался для извлечения любых оставшихся сухих материалов, пригодных к повторному использованию, в результате чего максимальный размер частиц остаточных СО был около 20 мм.

СО Германии были получены из Ганноверского центра обработки отходов. На механической стадии процесса отходы сортировались, измельчались и просеивались, а вторсырье и металлы удалялись. Фракция с высокой теплотворной способностью (в основном непереработанные бумага и пластмасса) отправлялась в качестве топлива из отходов на мусоросжигательный завод. Оставшиеся отходы анаэробно сбраживались в ферментационных танках в течение 3 недель, затем переносились в зону последующей аэробной обработки, где разлагались дальше в закрытых валках около 6 недель. Таким образом, эти СО проходили более продолжительную биообработку, чем СО Великобритании. Максимальный размер частиц остаточного материала был около 60 мм.

Репрезентативные образцы объемом около 25 кг СО из Великобритании и Германии были приготовлены из валовых выемок методом квартования и вручную отсортированы по различным категориям (табл. 2.6.1). Визуально не идентифицируемая категория составила более 50%. Далее следует стекло (22,8% в СО Великобритании и 24,3% Германии).

Жесткие и гибкие пластмассы вместе составляли около 10% каждого образца СО. Различие между СО двух стран отчасти может быть результатом разной предварительной обработки.

Таблица 2.6.1

**Компоненты СО (в процентах от сухой массы)
(Siddiqui et al., 2012; 2013)**

Компонент	Содержание, % СВ	
	СО Великобритании	СО Германии
Бумага	0.43	0.18
Гибкая пластмасса	4.57	2.4
Жесткая пластмасса	6.27	5.91
Древесина	1.57	3.22
Текстиль	1.33	0.63
Резина	0.18	0.25
Кости	0.27	0.37
Металлы	0.49	1.49
Керамика	2.29	4.25
Камни	1.73	3.17
Стекло	22.77	24.36
Неидентифицируемые >5мм	28.95	26.75
Неидентифицируемые <5 мм	29.15	27.02
Всего	100.00	100.00

Примечание. Выделены компоненты, которые отчасти можно отнести к органическим отходам.

Содержание органической фракции, к которой частично относятся выделенные компоненты в табл. 2.6.1 (всего порядка 60%), косвенно характеризуется показателями, представленными в табл. 2.6.2. Особенно велико различие в потере при прокаливании (23%), что соответствует большему содержанию органических фракций в СО Великобритании.

Разнообразие химического состава СО в странах Европы. Особый интерес представляет содержание ТМ в СО. Оно значительно варьирует в разных странах Европы. Поскольку в коммунальных отходах имеется множество источников ТМ (например, батарейки, содержащие Ni, Zn и Cd), которые могут проходить через механические сита, существенного снижения уровней ТМ в СО достигнуть не удастся. Как можно видеть в табл. 2.6.3 с данными нескольких исследований СО, содержание меди, свинца, никеля и цинка относительно велико и иногда превышает нормативные предельные значения некоторых европейских стандартов для захоронения на полигоне (Di Lonardo et al., 2012).

Таблица 2.6.2

Данные элементного анализа и анализа волокон СО
(Siddiqui et al., 2013]

Химический анализ	Содержание, % СВ	
	СО Велико-британии	СО Германии
Целлюлоза, % СВ	10.24	7.96
Гемицеллюлозы, % СВ	4.54	3.91
Лигнин, % СВ	12.63	13.01
Отношение (С + Н)/L*	1.17	0.91
Общий углерод, % СВ	22.68	19.85
Общий азот, % СВ	1.81	1.52
Потеря при прокаливании, % СВ	42.91	34.84

*С — целлюлоза, Н — гемицеллюлозы, L — лигнин.

Основной характеристикой для оценки СО является биологическая стабильность, обычно измеряемая индексами дыхания (динамический, DRI, или статический, AT_4) и анаэробным индексом (производство биогаза, BP_{21}). Эти по-

казатели описывают количество органического вещества, доступного для биоразложения в аэробных условиях, через количество кислорода, потребляемого микроорганизмами. AT_4 определяет совокупное потребление кислорода в течение 4 сут. (Загорская, 2014; Adani et al., 2004), а DRI измеряет абсолютные максимальные значения потребления кислорода. Индекс BP_{21} измеряет остаточный потенциал производства биогаза из предварительно обработанных отходов в анаэробных условиях за 21 сут. (или 90 сут.). Отходы считаются биологически стабильными, если DRI ниже 1000 мг O_2 /кг летучих твердых веществ (ЛТ)/ч (по нормативам Италии и ЕС), AT_4 ниже 5 или 7 мг O_2 /г СВ (Германия или ЕС соответственно), BP_{21} ниже 20 н.л./кг СВ (Германия и Австрия) (Di Lonardo et al., 2012; Загорская, 2014). Как видно из табл. 2.6.3, некоторые из этих индексов превышают нормативные предельные значения.

Состав СО из Германии и Швеции при различной МБО. Два вида СО из Германии и Швеции с различными происхождением и окончательной обработкой рассмотрены в работе (van Praagh, 2009) (табл. 2.6.4). Химический состав исходных образцов ТКО и его изменение в ходе МБО представлены в табл. 2.6.5.

Уменьшение ООУ и AT_4 в результате обработки обоих материалов сопровождается повышением степени деградации и стабильности. ООУ снижается на 38% и 50% по сравнению с исходными материалами М1 и М2 соответственно. AT_4 уменьшается на 95% и 90% соответственно. На усиление разложения органического материала указывает более высокое содержание твердых гуминовых кислот (ГК), связанное с длительным временем обработки. Из-за содержания сброженного ОСВ и компоста ожидалась более низкая степень разложения М2.

Характеристики и европейские стандарты качества СО (Di Lonardo et al., 2012)

Параметр	Единица	Различные источники										Стандарты качества		
					(Lornage et al., 2007)					(van Praagh et al., 2009)	(Bayard et al., 2010)	ЕС	Германия	Австрия
Размер частиц	мм				—	<20			5–10	<50	<25	<70	<80	
Время обработки	недель				25	3			2–12	9	9	21	4	
Содержание влаги	% вл. вес				33.37				24.3	17.4		39.6		
ЛП ^а	% СВ ^ж				39.4					47.8		38.9	46.9	
ООУ ^б	% СВ				20.64				13.3	19.7	11.51	24.3		18
РОУ ^в	г С / л								1.87	1.39			2.84	9.25
АТ ^г ₄	мг О ₂ / г СВ				16						4.1	11.6		5 7
DRI ^д	мг О ₂ / кг ЛП / ч								435–2303	1338.9			992.6	
ВР ^е ₂₁	н.л. ^з / кг СВ				12.3					55	6.5	27.7 (90 сут)		20
Сурьма	мг/кг								19.11				0.30	
Мышьяк	мг/кг					<0.5			3.01				2.41	
Кадмий	мг/кг	2.8	2.7	0.41	4.8	1.65			1.78		2	11.7	0.281	5 3
Хром	мг/кг	107	209	15.8	122				105.34		24	847.1	20.73	
Кобальт	мг/кг								5.5				1.56	
Медь	мг/кг	222	247	91.1	162	368			239		387	697.9	97.55	600 500

Параметр	Единица	Различные источники										Стандарты качества		
						(Lornage et al., 2007)				(van Praagh et al., 2009)	(Bayard et al., 2010)	ЕС	Германия	Австрия
Свинец	мг/кг	420	224	166.8	385	487		603	886	336.3		163.84	500	200
Марганец	мг/кг							278						
Ртуть	мг/кг	1.9	1.3	0.15	1.5	<0.5		2.16				0.35	5	3
Никель	мг/кг	84	149	31	69	97		56.15	55	467		24.88	150	100
Таллий	мг/кг							<0.1				10.20		
Ванадий	мг/кг							10.6				13.89		
Цинк	мг/кг	919	769	286	542	485		397	865	5160.9		241.87	1500	1800

^аЛТ – летучие твердые вещества; ^бООУ – общий органический углерод; ^вРОУ – растворенный органический углерод; ^гАТ₄ – статический индекс дыхания; ^дДРИ – динамический индекс дыхания; ^еВР₂₁ – биогазовый потенциал; ^жСВ – сухой вес; ^зн.л. – нормальный литр.

Выделены значения, превышающие хотя бы один из указанных стандартов качества (АТ₄, ДРИ или ВР₂₁).

В таблице представлены выходные характеристики только СО₂, полученных в результате аэробной биологической обработки.

Разложение органического вещества до диоксида углерода приводит к потере материала, на что указывает уменьшение потери при прокаливании (LoI) до и после аэробной обработки. Поэтому можно ожидать увеличения содержания ТМ, поскольку исследуемые металлы не улетучиваются при температурах биообработки (50–70°C) (van Praagh, 2009) . Повышение содержания ТМ в компостируемых отходах наблюдалось и ранее (Ciavatta et al., 1993). Снижение содержания меди в твердой фазе в ходе компостирования можно объяснить ее частичным переходом в растворимые органические комплексы.

Результаты инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье (FT-IR) в (van Praagh, 2009) показывают относительное уменьшение алифатических метиленовых групп в органическом веществе, снижение содержания альдегидов, кетонов, карбоновых кислот и сложных эфиров, повышение карбоната. Это очевидно для М1, но не для М2. Тем не менее результаты FT-IR означают разложение органического вещества и повышенную минерализацию (van Praagh, 2009) .

Влияние продолжительности биостабилизации на качество СО

Влияние продолжительности процесса биостабилизации подчеркивается в двух исследованиях. Первое (Di Lonardo et al., 2015) показало, что дополнительный процесс созревания после 28-суточной биообработки улучшил качество продукта, который продемонстрировал гораздо более высокую биологическую стабильность. Кроме того, в конце дозревания высвобождение металлов (Co, Cr, Cu, Ni, Pb и Zn) значительно снизилось по сравнению с продуктом 4-недельного процесса биостабилизации. Это также означает, что

металлы в основном связаны с твердым органическим веществом (хотя одной из причин может быть формирование осадков восстановленных форм металлов) (Lombardi et al., 2017). Поэтому предлагается расширить и оптимизировать биологическую обработку, применяемую на предприятиях МБО, с целью возможного использования выходного продукта вместо его захоронения (Di Lonardo et al., 2015).

Таблица 2.6.4

**Происхождение, обработка и конечное обращение с СО
(van Praagh et al., 2009)**

Характеристика	М1, Германия	М2, Швеция
Происхождение	Остаточная фракция ТКО	Остаточная фракция ТКО, компост садовых отходов, обезвоженный ОСВ
Обработка	Сортировка, просеивание, туннельное компостирование	Сортировка, перемешивание, компостирование в штабелях
Конечное обращение	Захоронение на полигоне	Использование в качестве покровного материала для полигона отходов или захоронение на полигоне

Таблица 2.6.5

Химический состав (по СВ) образцов отходов (van Praagh et al., 2009)

Параметр	Единица	М1, Германия				М2, Швеция		
		Исходный	2 недели	6 недель	9 недель	Исходный	24 недели	InL ^д
1	2	3	4	5	6	7	8	9
pH	—	5.5	6.9	7.9	7.5	н.о.	7.3	н.о. ^е
AT ₄	мг O ₂ /г	79.4	39.0	6.3	4.1	4.6	0.5	3.3
BP ₂₁	н.л/кг	248.4	187.6	17.8	6.5	< ^г	<	<

Окончание табл. 2.6.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9
ООУ	г/кг	185.5	196.1	126.5	115.1	143.5	71.9	н.о.
LoI ^a	%	42.6	44.4	28.0	25.6	30.1	22.7	н.о.
ГК ^б	г/кг	14.0	7.0	19.0	15.0	22.0	25.0	25.0
ГК ^в	г/кг	10.0	15.0	17.0	20.0	23.0	27.0	28.0
N	г/кг	9.9	10.0	8.4	7.8	8.6	6.8	н.о.
C/N	—	18.7	19.6	15.1	14.8	16.7	10.6	—
Cd	мг/кг	1.4	11.7	13.2	11.7	0.8	0.9	0.8
Cr	мг/кг	708.8	823.7	842.3	847.1	843.2	1007.3	1042.3
Cu	мг/кг	472.2	1848.2	1232.3	697.9	158.6	342.0	292.9
Ni	мг/кг	330.6	441.9	458.2	467.0	347.3	413.5	549.7
Pb	мг/кг	288.5	401.5	281.2	336.3	193.0	197.4	496.1
Zn	мг/кг	586.9	915.7	1055.3	1560.9	1006.7	595.4	797.8

^a Потеря при прокаливании. ^бГуминовые кислоты по методу НА1. ^вГуминовые кислоты по методу HS2. ^гНиже предела обнаружения. ^дНачальный образец, выщелоченный при отношении жидкой и твердых фаз (L/S) 10 л/кг. ^еНе определено.

Второе исследование (DiLonardo, Lombardi et al., 2015) показало, что после 4-недельной обработки отходы не были биологически стабильными: индекс DRI был значительно выше принятого в ЕС порога – 1000 мг O₂/кг ЛТ /ч. Содержание металлов (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) соответствовало требованиям для использования, но выщелачивание этих ТМ было довольно высоким и не соответствовало нормативным ограничениям Италии для рекуперации отходов. Для улучшения качества этих СО также предлагалось изменить рабочие условия биообработки, например, содержание влаги: выходной материал имел влажность 19,7 %, что значительно ниже рекомендованной для оптимизации аэробного биоразложения (40 %). Для улучшения качества продукта следова-

ло бы отделить фракции с размером частиц >10 мм (с высоким содержанием примесей и ТМ). Более мелкая фракция после эффективной биостабилизации может быть использована в мероприятиях по ремедиации окружающей среды, а более крупные фракции можно направить на предприятие по переработке отходов в энергию.

Сравнение СО и захороненных ТКО разного возраста с близкой биологической стабильностью

Можно сопоставить представленные в табл. 2.6.3 данные о составе СО с результатами сравнительного анализа возраста обычных ТКО, захороненных на полигоне, и их показателя дыхательной активности микроорганизмов AT_4 , т.е. уровня биологической стабильности. Такой анализ был проведен для 25 образцов отходов, отобранных в период 2013–2014 гг. на трех объектах захоронения ТКО Пермского края. На каждом объекте образцы отбирались в нескольких точках с разных глубин, причем был приблизительно известен возраст отходов в каждой точке. В табл. 2.6.6, модифицированной из (Загорская, 2014), результаты упорядочены по возрасту и AT_4 (уровень биологической стабильности не коррелирует с глубиной).

Из трех образцов СО в табл. 2.6. 3, для которых приводятся данные по AT_4 , в СО из (Lornage et al., 2007) и (Bayard et al., 2010) эти значения (16 и 11,6 мг O_2 /г СВ) значительно выше пороговых (5 или 7 мг O_2 /г СВ) и примерно соответствуют возрасту отходов 1–4 года и 2–6 лет, тогда как СО из (van Praagh et al., 2009) имеют $AT_4 = 4.1$ мг O_2 /г СВ ниже пороговых значений и соответствуют возрасту более 10 лет.

При этом авторы Lornage et al. (2007) ($AT_4 = 16$ O_2 /г СВ) признают, что средние характеристики их СО объяснялись

упрощенной механической обработкой (грубое измельчение без рекуперации материалов), неоптимальным биологическим процессом и характеристиками поступающих отходов. Биологической стабилизации препятствовали большой размер частиц отходов и высокое содержание медленно биоразлагаемых материалов (таких как бумага и картон). Авторы Bayard et al. (2010) ($AT_4 = 11.6 \text{ O}_2 / \text{г СВ}$) признают, что согласно балансу массы, некоторые этапы обработки нуждаются в улучшении (особенно механическая сортировка), поскольку часть отходов была захоронена с незначительной биообработкой или без нее.

При попытке определить «возраст» образцов СО в табл. 2.6.5 по табл. 2.6.6 на основе AT_4 для образца М1 6-недельной обработки получен сравнительный возраст 3–6 лет, для 9-недельной обработки — 6–10 лет. Это еще раз иллюстрирует степень «старения» отходов в ходе МБО.

Таблица 2.6.6

**Результаты определения свойств отходов
(Загорская, 2014)**

Точка опробования	Глубина	Возраст образца	AT_4	рН	Зольность	Органи- ческое вещество
№	м	лет	мг $\text{O}_2/\text{г СВ}$		%	%
1	2	3	4	5	6	7
<i>Полигон г. Краснокамска</i>						
1	3.5–4.0	1–2	17.2	7.6	52.8	47.2
1	2.5–3.0	1–2	19.0	7.0	54.8	45.2
1	5.5–6.5	1–2	23.2	7.4	46.3	53.7
2	2.5–3.0	2–3	7.0	8.1	44.6	55.4
2	1.0–1.5	2–3	9.6	7.9	73.9	26.1
2	5.5–6.5	2–3	12.3	8.5	44.1	55.9

Окончание табл. 2.6.6

1	2	3	4	5	6	7
<i>Свалка г. Кунгура</i>						
3	4.0–4.5	2–4	6.5	7.8	66.9	33.1
3	2.0–2.5	2–4	8.3	7.9	36.9	63.1
3	3.0–3.5	2–4	8.4	7.9	37.6	62.5
3	1.0–1.5	2–4	16.8	7.6	27.0	73.0
4	4.0–4.5	3–6	5.8	7.6	55.5	44.5
4	3.0–3.5	3–6	8.8	7.7	44.4	55.7
4	1.0–1.5	3–6	9.5	7.9	42.7	57.3
4	2.0–2.5	3–6	9.8	7.7	44.9	55.1
1	1.0–1.5	10–12	0.2	7.9	86.6	13.4
2	0.5–1.0	10–12	0.4	7.8	76.3	23.7
1	0.5–1.0	10–12	0.9	7.6	82.7	17.3
2	1.0–1.5	10–12	2.7	7.5	89.2	10.8
<i>Свалка «Голый Мыс»</i>						
2	1.2–1.8	>30	0.3	7.7	80.9	19.1
2	5.2–5.8	>30	0.3	7.8	70.8	29.2
1	1.2–1.8	>30	0.6	7.7	88.8	11.2
2	3.2–3.8	>30	0.7	7.7	76.3	23.7
1	2.2–2.8	>30	0.9	7.8	86.9	13.2
1	4.2–4.8	>30	1.0	7.7	87.8	12.3
2	4.2–4.8	>30	2.8	7.6	63.6	36.4

***Сравнение содержания тяжелых металлов
в различных СО и в обычных ТКО***

Содержание ТМ в образцах различных СО из Италии представлено в табл. 2.6.7 (Ciavatta et al., 1993). Образцы из органических домашних отходов (т.е. органических отходов, собранных отдельно) обозначены NT, SB и SS. В начале летнего и зимнего компостирования были отобраны

соответственно образцы S_0 и W_0 (ТКО), в конце – образцы S и W (СО). Образцы NT, SB и SS показали более низкие значения для ТМ (ниже предела для качества компоста в Италии), часто на несколько порядков меньше, чем для образцов S и W.

Таблица 2.3.7

Общее содержание ТМ и стандартное отклонение (\pm) в образцах СО и ТКО (Ciavatta et al., 1993)

Образец	Cu	Zn	Pb	Cr	Ni	Cd
	мг/кг СВ					
NT	118 \pm 6	351 \pm 5	79 \pm 2	38 \pm 3	24 \pm 3	1.5 \pm 0.1
SB	140 \pm 4	410 \pm 12	80 \pm 2	89 \pm 5	32 \pm 4	2.6 \pm 0.1
SS	69 \pm 2	313 \pm 2	82 \pm 21	24 \pm 4	22 \pm 0	0.7 \pm 0.0
S_0	183 \pm 9	626 \pm 16	150 \pm 3	56 \pm 7	23 \pm 2	1.4 \pm 0.2
S	737 \pm 99	1037 \pm 63	981 \pm 16	162 \pm 4	196 \pm 5	6.7 \pm 0.5
W_0	336 \pm 77	555 \pm 85	272 \pm 36	47 \pm 4	23 \pm 2	0.6 \pm 0.1
W	399 \pm 16	981 \pm 31	287 \pm 9	69 \pm 5	47 \pm 2	3.0 \pm 0.1
Официальные пределы в Италии	<600	<2 500	<500	<500	<200	<10

Общее содержание ТМ во всех образцах СО в конце периода стабилизации было выше, чем в образцах ТКО, отобранных в начале компостирования. В частности, увеличение было очень большим в образце СО, стабилизированном летом (S по сравнению с S_0), и колебалось от примерно 200 % для Zn до примерно 800% для Ni. Общее содержание Cu и Pb превышало официальные пределы, установленные в Италии для компоста. Увеличение содержания ТМ в конечных образцах СО можно объяснить: а) потерями органического углерода, особенно в виде CO_2 , во время стабилизации (ми-

нерализация органического вещества) и б) тем фактом, что некоторые из ТМ, которые в начале процесса компостирования не содержались в органической фракции, могли включиться в нее к концу процесса компостирования в ходе операций по очистке от стекла, металлов и пластмасс (Ciavatta et al., 1993).

Степень гумификации СО и растворимость металлов

Несмотря на меньший объем по сравнению с необработанными отходами, вызывают озабоченность показатели остаточных биологически разлагаемых материалов, измеряемые как растворенный органический углерод (РОУ) или биологическое потребление кислорода (БПК), соединения азота и ТМ (Kjeldsen et al., 2002). Было показано, что компостирование увеличивает содержание гумусовых веществ в биоразлагаемых отходах (van Praagh et al., 2009) .

В работе (Ciavatta et al., 1993) определялась степень гумификации (ДН) для образцов летнего и зимнего компоста (табл. 2.6.7), отобранных через определенные промежутки времени во время стабилизации органического вещества. ДН определяется соотношением $ДН (\%) = [(ГК + ФК) / ОЭУ] \times 100$, где (ГК + ФК) — гумифицированные соединения, ОЭУ — общий экстрагированный углерод. Для летнего компостирования ДН увеличилась за 55 сут. с 45,1 до 57,6 %, для зимнего — с 43 до 59,5 %. Линейный регрессионный анализ зависимости растворимости ТМ от ДН выявил существенные различия между металлами. Для большинства ТМ в летнем компосте корреляция между ТМ и ДН была незначимой или отсутствовала, но в зимнем компосте для Cr, Ni, Pb и Zn она была высокой и положительной. Cr, по-видимому, имеет тенденцию в ходе компостирования переходить

в нерастворимую форму и, таким образом, снижать растворимость (отрицательный коэффициент корреляции).

Отметим, что в обычных захороненных ТКО процесс гумификации может продолжаться сотни и даже тысячу лет (Глушанкова, 2004; Calace et al., 2001).

Таким образом, состав и качество СО, и в первую очередь, степень стабилизации значительно варьируют в зависимости от источника сырья, степени разделения исходных отходов, технологии МБО, продолжительности стадии созревания и даже от сезона компостирования. СО можно сравнить по уровню биологической стабильности с захороненными на полигоне обычными ТКО разного возраста: по мере биологической обработки отходы «стареют». Хорошо подготовленные СО соответствуют возрасту отходов порядка 10 лет.

При МБО в отходах уменьшается содержание твердого общего органического углерода. Снижается количество алифатических метиленовых групп, уменьшается содержание альдегидов, кетонов, карбоновых кислот и сложных эфиров, повышается содержание тяжелых металлов (ТМ), карбоната. На усиление разложения органического материала указывает более высокое содержание в СО твердых гуминовых кислот. Для некоторых ТМ степень гумификации СО положительно коррелирует с растворимостью металла.

2.6.2. Исследование выщелачивания загрязняющих веществ из обработанных отходов, захораниваемых на полигонах ТКО

В данном разделе рассмотрены экспериментальные исследования выщелачивания загрязняющих веществ (ЗВ) из СО, моделирующим захоронение на реальном полигоне

(в больших реакторах и в экспериментальной секции полигона ТКО, куда помещены СО), анализируются результаты этих экспериментов.

Другим важным аспектом проблемы обеспечения безопасности полигонов является захоронение остатков от сжигания ТКО. Несмотря на экологическую опасность, сжигание ТКО остается распространенным методом обработки отходов, так как он позволяет уменьшить их массу на 70% и объем до 90%. В России в настоящее время распространяется сооружение мусоросжигательных заводов (МСЗ), однако способы обработки и трансформация твердых остатков сжигания (ОСТКО) в окружающей среде недостаточно изучены. В связи с этим необходимо представлять, насколько опасно захоронение ОСТКО для окружающей среды. Во второй части настоящей главы рассмотрены образование и состав ОСТКО, вопросы рециклинга и экологического регулирования, выщелачивание загрязняющих веществ, способы обработки ОСТКО для уменьшения воздействия на окружающую среду.

Более детальное рассмотрение вышеизложенных вопросов представлено в статьях (Юганова, 2023; Юганова, Путилина, 2023).

***Выщелачивание загрязняющих веществ
из захораниваемых продуктов механико-биологической
обработки отходов***

Механико-биологическая обработка отходов (МБО) перед захоронением или использованием позволяет значительно снизить агрессивность фильтрата. При этом определение состава фильтрата является ключевым вопросом для оценки его долгосрочного воздействия на окружающую среду.

Долгосрочное поведение СО на полигонах будет отличаться от поведения необработанных ТКО из-за удаления определенных фракций отходов во время механической обработки и частичного разложения во время биологической обработки. Знание о газообразовании и выщелачивании СО необходимо для оценки риска загрязнения природных сред на территориях принимающих их полигонов, а также для эффективного проектирования, эксплуатации и последующего обслуживания полигонов, включая системы управления газом и фильтратом (Siddiqui et al., 2013). Важно, чтобы исследователи создавали и тестировали новые модели и/или инструменты для оценки качества СО, чтобы определить, можно ли не направлять их на полигоны, и в то же время оценить производство фильтрата и биогаза на полигонах, которые будут получать только остатки от переработки отходов (Lombardi et al., 2017).

Исследования в больших реакторах. Для изучения долгосрочного поведения на полигонах СО (с предприятий в Великобритании и Германии) были использованы большие консолидирующие анаэробные условия (Siddiqui et al., 2012, 2013). В реакторах моделировались анаэробные условия путем полного закрытия и установки соответствующих клапанов для регулирования потока газа и фильтрата.

Изменения окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) фильтрата в CAR2 показывают, что на ранней стадии создались восстановительные условия: ОВП резко снижался между началом компостирования и 30-ми сутками примерно от -200 до -300 мВ. Последнее является оптимальным для метаногенеза.

Производство биогаза и рН фильтрата, содержание летучих жирных кислот (ЛЖК) и углерода — индикаторы воз-

никновения и развития биоразложения. Изменение во времени рН фильтрата и общего содержания ЛЖК показано на рис. 2.6.1 для отходов СО Великобритании. После первой недели производство биогаза начало увеличиваться, а концентрации ЛЖК и общего органического углерода (ООУ) в фильтрате стали падать, т.е. начинался метаногенез. Сравнительные данные для свежих ТКО (Ivanova et al., 2008) представлены на рис. 2.6.2. Очень короткая ацидогенная стадия для СО по сравнению с 40 сут., наблюдавшимися для свежих ТКО в (Ivanova et al., 2008), согласуется с разложением органических соединений во время МБО.

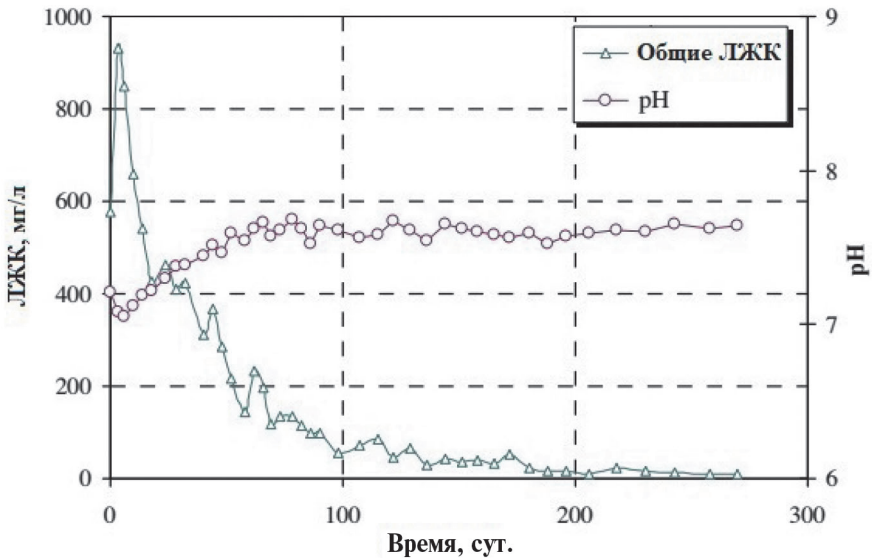


Рис. 2.6.1. Летучие жирные кислоты в фильтрате и рН для СО (Siddiqui et al., 2013)

Окончательные стабильные значения рН составляли от 7,5 до 7,7 (рис. 2.6.2). Низкие конечные концентрации ЛЖК

указывают на то, что бо́льшая часть доступного органического вещества была преобразована в биогаз и была достигнута биологическая стабилизация.

На рис. 2.6.3 показаны концентрации общего (ОА) и аммонийного ($\text{NH}_4\text{-N}$) азота в фильтратах из двух образцов СО. Концентрации как ОА, так и $\text{NH}_4\text{-N}$ увеличивались со временем, в отличие от снижения ООУ. Первоначальное резкое увеличение ОА и $\text{NH}_4\text{-N}$ можно объяснить прямым вымыванием аммония из отходов и микробиальным разложением азотистых органических соединений, включая белки и аминокислоты.

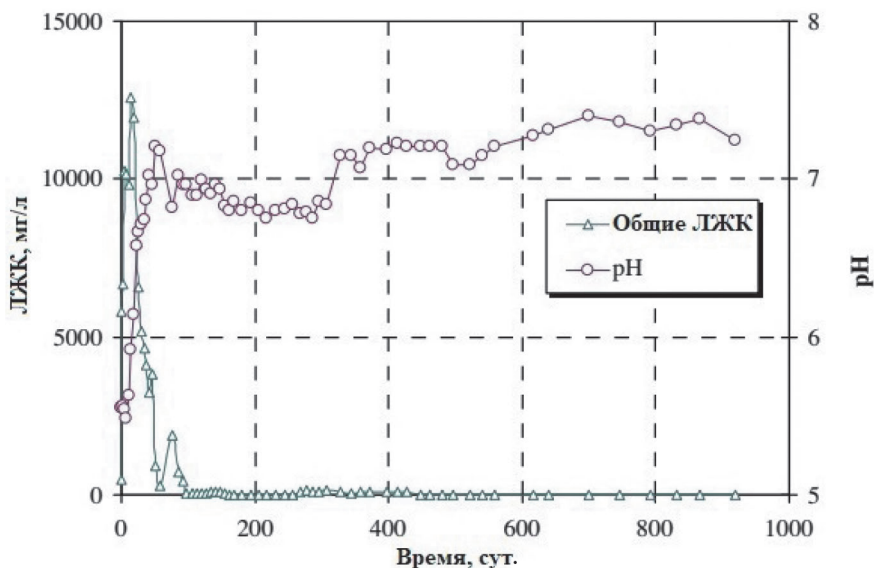


Рис. 2.6.2. Летучие жирные кислоты в фильтрате и pH для свежих ТКО (Ivanova et al., 2008)

После начального увеличения значения ОА и $\text{NH}_4\text{-N}$ оставались стабильными в течение определенного периода.

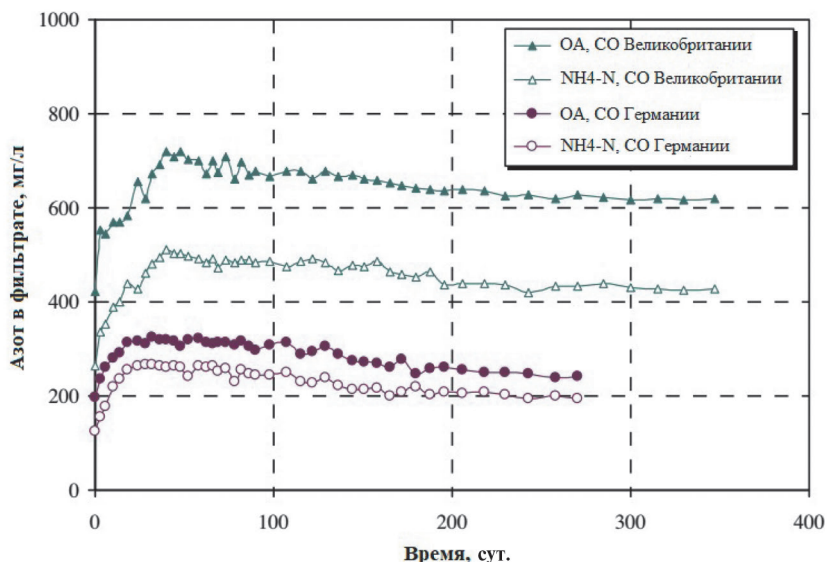


Рис. 2.6.3. Азот в фильтрате для СО Великобритании и Германии (Siddiqui et al., 2013)

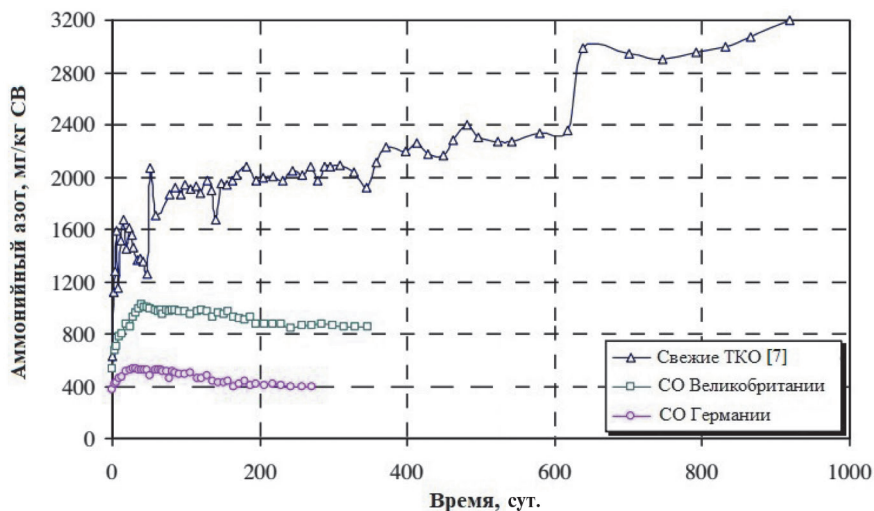


Рис. 2.6.4. Нагрузка NH₄-N в свежих ТКО и СО (Siddiqui et al., 2013)

Затем концентрация аммонийного азота очень медленно снижалась до стабильных значений примерно 425 мг/л и 195 мг/л для СО Великобритании и Германии соответственно. Возможные объяснения: сорбция на массе отходов; анаэробное окисление аммония (анаммокс) и преобразование в газообразный азот; микробное поглощение для роста новых клеток; формирование вторичного минерала, например, струвита (Siddiqui et al., 2013).

На рис. 2.3.2 сравниваются нагрузки фильтрата по аммонийному азоту, измеренные в исследовании (Siddiqui et al., 2013) СО, с данными, полученными в (Ivanova et al., 2008) для свежих ТКО (данные пересчитаны на массу СО). Концентрации аммония, измеренные для фильтрата из свежих ТКО, были не только значительно выше, но также заметно увеличивались со временем в отличие от постепенного снижения в СО. Преимущества предварительной обработки отходов в снижении нагрузки фильтрата аммонийным азотом очевидны, при этом наиболее тщательно обработанные отходы демонстрируют наименьшие начальные и остаточные потенциальные нагрузки загрязнения.

Средние концентрации ТМ, полученные ранее для фильтрата из свежих ТКО, составили 1,2; 0,45; 0,19; 0,15 и 0,003 мг/л для Zn, Cu, Ni, Pb и Cd соответственно, что выше, чем для предварительно обработанных отходов. МБО могла либо понизить содержание металла в отходах, либо сделать его менее подвижным (Siddiqui et al., 2013).

Исследования в экспериментальной секции полигона ТКО

Инфильтрация СО в природных условиях изучалась в (López et al., 2018). Система операций включала складирование уплотненных СО слоями с промежуточными слоями

глины. Фильтрат, собранный со всех слоев на различных этапах работы полигона, направлялся в регулирующие резервуары, а затем на обработку.

Состав СО в экспериментальной секции показан в табл. 2.6.8, откуда видно, что почти 10% отходов были классифицированы как неидентифицируемые. В эту категорию входят инертные, а также биоразлагаемые материалы.

Таблица 2.6.8

Состав СО в экспериментальной секции (López et al., 2018)

Компонент	Доля в сухом веществе, %
Жесткая пластмасса	0.8
Гибкая пластмасса	3.3
Бумага и картон	12.1
Текстиль	1.3
Древесина	4.1
Скорлупа и семена	7.0
Кости	2.0
Металлы	1.5
Стекло	51.5
Камни и керамика	6.6
Неидентифицируемые > 4 мм	3.1
Неидентифицируемые < 4 мм	6.7
Всего	100

Примечание. Цветом выделены частично биоразлагаемые материалы.

В работах (López et al., 2018; Christensen et al., 2001; Robinson et al., 2005) показаны: диапазоны изменения параметров фильтрата на протяжении всего исследования в экспериментальной секции; результаты, достигнутые для всего фильтрата, собранного на полигоне Meruelo; результаты, полученные на «обычных» молодых (кислотная фаза) и ста-

рых (метаногенная фаза) полигонах ТКО, а также на нескольких других полигонах разного возраста (Christensen et al., 2001); диапазоны значений для СО с различной степенью предварительной обработки компостированием (Robinson et al., 2005). Определенные авторами (López et al., 2018), концентрации металлов выше, чем в других исследованиях. Особенно выделяются достигнутые в экспериментальной секции концентрации ТМ меди (Cu), цинка (Zn) и никеля (Ni).

После первых 9 месяцев концентрация многих загрязняющих веществ в секции снизилась до менее одной трети от первоначального значения, демонстрируя, таким образом, эффект вымывания. Снижение более заметно для органических компонентов (рис. 2.6.5, *а, б*), что является результатом активного разложения. Значения ХПК (72 000 мг O_2 /л), ООУ (27 000 мг/л) и БПК (16 000 мг O_2 /л) изначально превышают диапазоны для отходов с предварительной обработкой со степенью компостирования от низкой до средней, с максимальными значениями 5000, 2000 и 200 мг O_2 /л соответственно (табл. 2.6.9). Эти параметры остаются на высоком уровне и даже увеличиваются в течение первых недель, а затем резко снижаются, когда начинает преобладать метаногенез. Это приводит к снижению концентраций БПК за период мониторинга на два порядка с окончательными значениями 200 мг O_2 /л. Видимо, стабильная фаза еще не была достигнута (López et al., 2018).

Концентрации ООУ совпадают с теми, которые были получены в (Robinson et al., 2005) для низких значений L/S в тестах СО. В экспериментальный период (Ivanova et al., 2008) высвобожденный ООУ (857 мг/кг СВ) находится в пределах диапазона, обнаруженного другими авторами для аналогичных отношений L/S на обычном полигоне во время ацидогенной фазы.

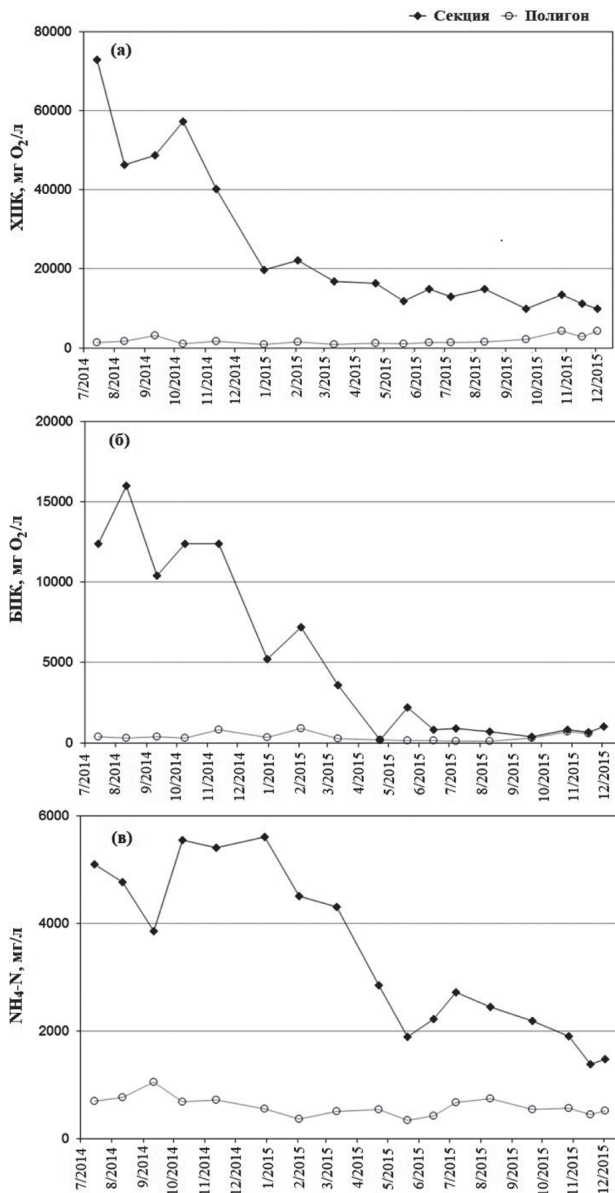


Рис. 2.6.5. Эволюция ХПК (а), БПК (б) и NH_4-N (в) в фильтрате (López et al., 2018)

Аммонийный азот, несмотря на первоначальное уменьшение (рис. 2.6.5, *в*), концентрации выше значений, достигнутых другими авторами. Например, в работе (Robinson et al., 2005) аналогичные концентрации были определены на свалках со свежим органическим веществом, но более низкие значения $\text{NH}_4\text{-N}$ (от 50 до 1000 мг/л) в фильтрате из отходов, подвергнутых предварительной слабоинтенсивной аэробной обработке.

Для аммонийного азота в экспериментальной секции (López et al., 2018) наблюдается несколько меньшее падение, чем для БПК. Это может быть результатом более медленного высвобождения $\text{NH}_4\text{-N}$ в сочетании с его устойчивостью в фильтрате, поскольку, в отличие от углеродсодержащего материала, азот не превращается в биогаз. С другой стороны, одним из ожидаемых преимуществ предварительной биологической обработки отходов является снижение нагрузки азотного загрязнения на полигонах (Siddiqui et al., 2012).

Основной причиной высоких концентраций аммония, отмеченных в начале мониторинга секции в (López et al., 2018), может быть аммонификация органического азота на предприятии МБО, в результате чего остается доступным большое количество $\text{NH}_4\text{-N}$. Поскольку отходы еще не подвергаются процессу, который способствовал бы их деградации (с образованием нитрат-иона), аммонийный азот высвобождается с момента их захоронения. Авторы (Siddiqui et al., 2012) в лабораторном исследовании наблюдали аналогичный эффект, т.е. быстрое высвобождение иона аммония, но они получили концентрации $\text{NH}_4\text{-N}$ лишь немного выше 1000 мг/л в наименее стабилизированных отходах. Однако, хотя отношение $L/S = 2$ л/кг было выше, чем в исследовании (López et al., 2018) (0,11 л/кг), количество азота, выде-

ленного в экспериментах (Siddiqui et al., 2012), – 850 и 390 мг/кг СВ для каждого из предварительно механико-биологически обработанных образцов отходов – близко к полученным в (López et al., 2018): 420 мг/кг СВ.

Следует отметить, что фильтрат из секции имеет значительно более высокие концентрации ЗВ, чем фильтрат с полигона, на котором она расположена (таблица. 2.6.9). Причина этого двоякая. Во-первых, полигон имеет гораздо большую площадь, подвергаемую дождям, что способствует большему разбавлению фильтрата. Кроме того, полигон старше секции, и поэтому отходы, которые также включают необработанную фракцию обычных городских ТКО, прошли более длительный процесс стабилизации. Средние концентрации различных неорганических параметров в фильтрате полигона остаются в пределах от 10 до 30% от значений, измеренных в фильтрате секции.

Таблица 2.6.9

Результаты оценки качества фильтрата в экспериментальной секции

Параметр	Единица	Экспериментальная секция ^a (17 образцов)	Полигон Meruelo ^a (17 образцов)
pH		7,9–9,6 (8,9)	–
Проводимость	мкСм/см	31,5–67,8 (46,8)	–
Общая ХПК	мг O ₂ /л	–	–
ХПК в растворе	мг O ₂ /л	–	–
Общая БПК ₅	мг O ₂ /л	–	–
БПК ₅ в растворе	мг O ₂ /л	–	–
ООУ в растворе	мг/л	–	–
NH ₄ -Н	мг/л	–	–
Сульфат (как SO ₄)	мг/л	–	–
Общие твердые	мг/л	22 258–138 706 (46 100)	4010–13 770 (7238)
Кальций	мг/л	–	–
Натрий	мг/л	–	–

Окончание табл. 2.6.9

Параметр	Единица	Экспериментальная секция ^a (17 образцов)	Полигон Meruelo ^a (17 образцов)
Магний	мг/л	—	—
Железо	мг/л	—	—
Хром	мг/л	—	—
Кадмий	мг/л	—	—
Медь	мг/л	—	—
Цинк	мг/л	—	—
Свинец	мг/л	—	—
Никель	мг/л	—	—
Мышьяк	мг/л	—	—
Ртуть	мг/л	—	—

^a В скобках указано среднее значение, найденное для каждого параметра (по-видимому, медиана).

Исключения: Са, средняя концентрация которого в фильтре свалки составляет 80% от концентрации в фильтрате секции (147 против 180 мг/л), и Си с концентрацией 5% от концентрации фильтрата из секции (0,12 против 2,14 мг/л). Небольшое различие в концентрациях кальция объясняется влиянием рН на его растворимость. Снижение растворимости кальция значительно больше в фильтрате секции, так как были определены значения рН выше 9 по сравнению с максимальным значением 8,6 в фильтрате полигона.

С другой стороны, Си — один из металлов, на который больше всего влияют процессы комплексообразования с органическими соединениями. Кроме того, комплексообразование Си резко возрастает с увеличением рН, что приводит к максимальной общей скорости миграции Си при высоких значениях рН (Christensen et al., 2001). Этим можно объяснить большое различие между концентрациями Си в фильтратах секции и полигона, поскольку не было выявлено

значительных различий в отношении содержания Си в твердой фазе.

Для органического вещества (ХПК, БПК) различие между средними значениями в фильтрах из секции и с полигона больше. Как видно на рис. 2.6.5, *а*, *б*, в течение первых месяцев разложения значения ХПК и БПК в секции очень высоки, но они сразу же снижаются до значений, аналогичных этим показателям на всем полигоне. Это свидетельствует о быстрой начальной стабилизации органических отходов.

Таким образом, СО в секции вносят свой вклад в загрязнение фильтра так же, как и остальная часть полигона, и показывают возможное влияние рН, поскольку он, по-видимому, изменяет состав и концентрации фильтра (López et al., 2018).

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

Для оценки процесса выщелачивания отходов удобно использовать лабораторные эксперименты с объединением различных процедур тестирования (например, статические эксперименты или инфильтрационные тесты в колонках с восходящим потоком). Однако реакторы-имитаторы полигонов или экспериментальные секции на реальных полигонах позволяют лучше прогнозировать качество фильтра в долгосрочной перспективе.

В экспериментах с крупномасштабными анаэробными реакторами изучалось возможное долгосрочное поведение стабилизированных отходов (СО) на полигонах ТКО путем моделирования анаэробных условий и сравнения с аналогичным экспериментом со свежими отходами из того же источника. Для СО наблюдалась очень короткая ацидоген-

ная стадия (менее недели) по сравнению со свежими ТКО. Низкие конечные концентрации летучих жирных кислот в фильтрате СО указывали на то, что большая часть доступного органического вещества (ОВ) была преобразована в биогаз и была достигнута биологическая стабилизация. Значения общего (ООУ) и растворенного органического углерода были очень близкими, т.е. большая часть органического углерода была растворена в фильтрате.

В реакторе наблюдалось более низкое содержание ОВ в фильтратах СО по сравнению со свежими ТКО. Данные по свежим ТКО подтверждают эффективность МБО в снижении концентрации ООУ в фильтрате как на начальном этапе, так и после стабилизации. Поэтому *предварительная обработка может быть полезной для снижения не только первоначального, но и долгосрочного потенциала загрязнения на полигоне.*

Концентрации $\text{NH}_4\text{-N}$ в реакторе вначале увеличивались со временем (в отличие от снижения ООУ). Этот резкий рост можно объяснить прямым вымыванием аммония из отходов и микробиальным разложением азотистых органических веществ, включая белки и аминокислоты. В дальнейшем $\text{NH}_4\text{-N}$ оставался постоянным в течение определенного периода, а затем концентрация очень медленно уменьшалась до стабильных значений. Возможные объяснения снижения аммония: сорбция, анаэробное окисление аммония (анаммокс) и преобразование в газообразный азот, микробное поглощение для роста, осаждение азота в виде струвита. В свежих ТКО концентрации $\text{NH}_4\text{-N}$ были не только значительно выше, но также наблюдалось заметное увеличение с течением времени в отличие от постепенного снижения, наблюдаемого в СО. Таким образом, *преимущества предварительной об-*

работки отходов в снижении нагрузки фильтрата аммонийным азотом очевидны.

После начала метаногенеза в реакторе с СО произошло значительное снижение концентраций всех металлов, кроме хрома и кадмия, из-за образования сильно восстановительной среды. Переход тяжелых металлов (ТМ) в нерастворимое состояние завершался примерно через 50 сут., и затем концентрации оставались относительно постоянными до конца эксперимента. Возможные процессы истощения или удерживания металлов – это образование осадков (в основном сульфидов или карбонатов) и сорбция отходами и взвешенными частицами. Средние концентрации металлов в фильтрате из свежих ТКО были выше, чем для СО. *Предварительная обработка ТКО могла понизить содержание ТМ в отходах либо сделать их менее подвижными.*

Балансы массы углерода и азота показали, что их значительная часть осталась в отходах и не была высвобождена. Количество углерода, оставшегося в СО после полного разложения, составляло 57–63% от количества для необработанных ТКО. *Предварительная обработка ТКО приводит к удалению большего количества углерода, чем оставление его для разложения в относительно неконтролируемой среде полигона.*

Таким образом, МБО может быть полезной для снижения не только первоначального, но и долгосрочного потенциала загрязнения отходов на полигоне. *Необходимо на каждом предприятии МБО отрегулировать технологию как механической, так и биологической обработки поступающих отходов для достижения приемлемого для захоронения качества СО, используя лабораторные эксперименты по выщелачиванию.*

2.6.3. Захоронение остатков от сжигания твердых коммунальных отходов (состав, выщелачивание загрязняющих веществ, обработка для уменьшения воздействия на окружающую среду)

Сжигание — распространенный метод обработки твердых коммунальных отходов, при этом большинство негорючих компонентов впоследствии концентрируется в относительно небольшом количестве остатков сжигания (ОСТКО) — шлаке и летучей золе, которые необходимо обрабатывать дополнительно и/или захоранивать на полигоне отходов.

При сжигании образуются так называемые остатки СТКО (ОСТКО), которые перед захоронением или использованием необходимо дополнительно обрабатывать для уменьшения воздействия на окружающую среду токсичных компонентов. Производятся два основных типа ОСТКО (Нукš, 2008): донная зола (bottom ash, BA) со шлаком (далее вместе «шлак»⁵) и летучая зола (ЛЗ, fly ash, FA). Массовое отношение шлака и ЛЗ обычно составляет от 4:1 до 5:1 (Luo et al., 2019), по другим данным, около 10:1 — примерно 20 и 2 масс.% поступающих отходов соответственно (Weibel et al., 2017). Например, в Дании ежегодно производится около 600 000 т шлака и 90 000 т ЛЗ из примерно 3 000 000 т сжигаемых ТКО: итого ОСТКО составляют 23 масс.%. ЛЗ обычно составляет около 2–6 % от исходной массы сжигаемых отходов (Нукš, 2008).

Шлак значительно обогащен токсичными микроэлементами по сравнению с исходным материалом отходов (Dijks-

⁵ В технологическом процессе сжигания донная зола обычно перемешивается со шлаком — несгоревшим остатком ТКО и не выделяется в отдельную категорию при классификации твердых остатков МСЗ.

tra et al., 2008), но после специальной обработки обычно захоранивается на полигонах либо используется, например, в качестве вторичного сырья в строительстве. ЛЗ содержит токсичные вещества в больших количествах, чем шлак. Такие тяжелые металлы (ТМ), как Cd и Pb, могут легко вымываться из ЛЗ и загрязнять почву и грунтовые воды, создавая высокую опасность для окружающей среды и здоровья человека. Поэтому ЛЗ подлежит постоянному хранению на полигонах опасных отходов либо специальной обработке с последующим захоронением с менее строгими требованиями или использованием, например, для производства стекла и керамики (Luo et al., 2019).

Основной проблемой при захоронении и переработке ОСТКО является поступление опасных компонентов, таких как ТМ и токсичные органические соединения (например, диоксины и фураны). Перед использованием и/или захоронением ОСТКО требуется *количественная оценка выщелачивания*, в частности ТМ (Luo et al., 2019), которая может также рассматриваться как важная часть процедуры оценки воздействия жизненного цикла (ОВЖЦ, LCIA) различных сценариев обращения с отходами (Юганова, 2020). Для правильной оценки этих сценариев необходимо знать об эмиссиях загрязнителей (например, о выщелачивании из шлака, используемого в дорожном строительстве, и/или о выщелачивании из захороненной ЛЗ) (Нукš, 2008).

На процесс выщелачивания *в природных условиях* влияет ряд факторов, включая pH, отношение жидкой и твердых фаз (L/S), свойства ОСТКО, их выветривание и выдерживание (в отвалах, на полигонах отходов); а *в экспериментах* — методы выщелачивания, продолжительность контакта и мас-

штаб исследования. Для оценки выщелачивания ОСТКО используются статические серийные тесты и динамические тесты с колонкой. Тесты выщелачивания из колонки предоставляют более надежную информацию, поскольку данные на основе инфильтрации получаются по схеме потока, близкой к природным условиям (Luo et al., 2019).

Следует отметить, что выщелачивание необходимо количественно оценивать как в краткосрочной, так и в долгосрочной перспективе. Краткий срок может означать срок службы дороги или полигона (т.е. <100 лет), тогда как долгий срок может означать «навсегда» (на столетия). Полномасштабные данные о длительном выщелачивании ОСТКО в натурных условиях отсутствуют. Поэтому количественно выщелачивание обычно определяется с помощью лабораторных экспериментов. Они являются лишь грубым приближением полномасштабных процессов, для завершения которых могут потребоваться десятилетия и столетия. Условия выщелачивания во время лабораторных экспериментов не обязательно отражают условия полномасштабных сценариев (например, равновесие). Таким образом, имеющиеся уровни концентрации загрязняющих веществ (ЗВ), полученные в результате лабораторных экспериментов по выщелачиванию, могут не отражать те, которые наблюдались бы при полномасштабном сценарии выщелачивания с теми же материалами. Поэтому при использовании лабораторных данных в качестве исходных для геохимического моделирования полномасштабных сценариев необходим тщательный анализ, поскольку несоответствия между лабораторными и полномасштабными данными могут существенно повлиять на прогнозы выщелачивания (Нукš, 2008).

Образование, виды и состав остатков сжигания ТКО (ОСТКО)

Образуются несколько потоков ОСТКО как в процессе собственно сжигания, так и в результате последующей очистки дымовых газов. Первая часть включает донную золу и отсеб с колосниковой решетки, которые обычно собираются вместе как *шлак*. Вторая часть, *летучая зола* (ЛЗ), включает золу бойлера; золу зоны рекуперации⁶ энергии; золу, собранную в электростатическом пылеулавливателе; остатки скруббера⁷ и др. Эти отдельные потоки впоследствии часто смешиваются в зависимости от вариантов дальнейшей обработки и/или действующего законодательства (Нукš, 2008).

Серьезной проблемой сжигания отходов является загрязнение воздуха. Для его минимизации и обеспечения соответствия экологическим стандартам на современных МСЗ предназначена система очистки дымовых газов. Количество опасных химических соединений в полученном от СТКО шлаке намного ниже, чем в ЛЗ, поэтому шлак, как правило, не включается в категорию опасных отходов. Однако ЛЗ обычно классифицируется как опасные отходы из-за присутствия токсичных ТМ и диоксинов (Li W et al., 2019).

В нескольких исследованиях были получены или собраны данные о химическом составе шлака и ЛЗ (Lindberg, 2015). Основными элементами являются Si, Al, Fe, Ca, Mg, K, Na, S, P и Cl, которые содержатся в ОСТКО в виде оксидов, силикатов, фосфатов, хлоридов и сульфатов. Важными элементами являются As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb и Zn из-за их токсичности. В ОСТКО обычно присутствуют следовые ко-

⁶ Рекуперация – возвращение части расходуемой энергии для повторного использования в том же процессе.

⁷ Скруббер – устройство для очистки дымового газа.

личества высокотоксичных органических соединений. Эти СОМЗ представляют собой полициклические углеводороды (ПАУ), хлорбензолы (ХБ), полихлорированные бифенилы (ПХБ) и полихлорированные дибензо-*n*-диоксины (ПХДД) и фураны (ПХДФ). В шлаке Si, Fe, Ca и Al обычно являются наиболее распространенными элементами (не считая O и C), тогда как в ЛЗ чаще в наличии Cl, Ca, Si, K и Na. Часть кальция может происходить из добавок или сорбентов на основе извести, а не из сжигаемых ТКО. Металлы на МСЗ переносятся вместе с дымовыми газами и обогащаются в минеральных агрегатах (кварц, полевой шпат, волластонит, стекло) или испаряются и конденсируются в виде хлоридов или сульфатов.

В табл. 2.6.10 приведены диапазоны содержания элементов и СОМЗ в шлаке и ЛЗ (Luo et al., 2019). Их состав существенно различается, причем ЛЗ содержит значительно больше загрязняющих веществ (ЗВ), включая тяжелые металлы (ТМ) и диоксины, и классифицируется как опасные отходы. Тем не менее многие аспекты обращения с ОСТКО схожи для шлака и ЛЗ: проблемы рециклинга, экологическое регулирование, оценка токсичности, методы тестирования и геохимического моделирования выщелачивания ЗВ, способы обработки.

Таблица 2.6.10

Диапазоны химического состава шлака и ЛЗ от СТКО [(Luo et al., 2019)]

Элемент	Единица	Шлак		ЛЗ	
		min	max	min	max
1	2	3	4	5	6
Al	г/кг	21.9	72.8	6.4	93
Ca	— “ —	0.37	123	46	361

Продолжение табл. 2.6.10

1	2	3	4	5	6
Cl	—“—	0.8	4.19	45	380
Fe	—“—	4.12	150	0.76	71
K	—“—	0.75	16	17	109
Mg	—“—	0.4	26	1.1	19
Mn	—“—	0.083	2.4	0.2	1.7
Na	—“—	2.87	42	6.2	84
P	—“—	1.4	6.4	1.7	9.6
S	—“—	1	5	1.4	32
Si	—“—	91	308	36	190
Ti	—“—	2.6	9.5	0.7	12
Ag	мг/кг	0.28	36.9	0.9	192
As	—“—	0.12	189	18	960
Ba	—“—	400	3000	34	14000
Cd	—“—	0.3	70.5	16	1660
Co	—“—	6	350	1.9	300
Cr	—“—	23	3170	72	570
Cu	—“—	190	8240	16	2220
Hg	—“—	0.02	7.75	0.1	51
Mo	—“—	2.5	276	9.3	49
Ni	—“—	7	4280	19	710
Pb	—“—	98	13700	254	27000
Se	—“—	0.05	10	0.7	31
Sn	—“—	2	380	367	5900
Sr	—“—	85	1000	<80	500
V	—“—	20	122	4	150
Zn	—“—	613	7770	4308	41000
ПАУ	мкг/кг	н.д. *	н.д.	18	5600
ХБ	—“—	—“—	—“—	0.03	890

Окончание табл. 2.6.10

1	2	3	4	5	6
ПХБ	—“—	—“—	—“—	<40	
ПХДД	—“—	—“—	—“—	0.7	1000
ПХДФ	—“—	—“—	—“—	1.4	370
ТХДД	ЭКВ	—“—	—“—	0.8	2.5
ООУ**	г/кг	—“—	—“—	4.9	17
LOI***	—“—	—“—	—“—	11	120

* н.д. — недоступно; ** ООУ — общий органический углерод. *** LOI — потеря при прокаливании.

Выщелачивание элементов из ОСТКО

Выщелачивание ЗВ — основная проблема при захоронении и переработке ОСТКО. Поэтому предварительно требуется количественная оценка выщелачивания. Тесты различаются по испытательной установке, отношению жидкой и твердых фаз, размеру частиц материала и продолжительности тестирования. Различаются серийные тесты (зависимости от рН или без регулирования рН), тесты с колонкой, тесты для связанных применений (таких как использование шлака в качестве заполнителя в бетоне); натурные тесты или тесты с реакторами-имитаторами полигонов отходов. Из-за общей сложности процесса выщелачивания считается, что один тип тестов не может дать адекватного описания явлений, регулирующих высвобождение ЗВ. Поэтому, чтобы получить лучшую оценку поведения материала при выщелачивании в конкретном сценарии, следует использовать комбинацию различных типов тестов.

В результате многочисленных исследований с различными ОСТКО были определены три основных типа процессов

выщелачивания и удерживания, и соответственно элементы тоже были разделены на три группы (Нукš, 2008; Luo et al., 2019).

I. Элементы, выщелачивание которых происходит из хорошо растворимых доступных минералов (например, Na, K). Высокая растворимость таких минералов, присутствующих в ОСТКО (например, NaCl), способствует быстрому выщелачиванию металлов. Другими словами, поскольку минерал легко растворяется, ограничивающим фактором является его доступность. Соответственно, разные значения pH обуславливают лишь незначительные различия в концентрациях металлов в растворах. В тестах с колонкой выщелачивание этого типа характеризуется довольно высокими исходными концентрациями (от десятков до сотен граммов в литре) с последующим довольно быстрым снижением по мере истощения.

II. Элементы, которые выщелачиваются из минеральных фаз: оксидов, карбонатов и сульфатов (например, Ca, S, Si, Al, Ba, Zn). Выщелачивание многих металлов обусловлено растворением обычных минералов. Это связано с растворением оксидов металлов, присутствующих в твердом веществе ОСТКО, таких как (гидр)оксиды алюминия и железа и оксид цинка, или осаждением этих оксидов, а также карбонатов и сульфатов. Растворение минеральных фаз происходит в том случае, когда при контакте с твердым веществом раствор насыщается относительно рассматриваемого элемента (Luo et al., 2019). Выщелачивание при этом ограничено растворимостью минералов, поэтому в pH-статическом тесте могут наблюдаться как отсутствие выщелачивания, так и большие различия в пределах диапазона pH. Первое происходит в случае единственного «контролирующего минера-

ла», на растворимость которого не влияют изменения рН, например, гипс. Последнее можно увидеть в случае многих металлов, проявляющих *амфотерное поведение*, — интенсивное выщелачивание как при высоком, так и при низком рН с минимумом при нейтральном рН (Нукš, 2008).

В тестах с колонкой выщелачивание элементов группы II характеризуется довольно стабильными концентрациями в растворе в течение длительных периодов времени, поскольку рН не изменяется. Растворение одного минерала и его замена другим могут привести к изменению концентрации в растворе (Нукš, 2008).

III. *Элементы, выщелачивание и удерживание которых определяют процессы сорбции / комплексообразования* (например, Cd, Cu, Pb, Ni). Этот тип выщелачивания характерен для многих металлов. Как правило, при высоких значениях рН, наблюдаемых в фильтрах из ОСТКО, катионы этих металлов имеют тенденцию сорбироваться на отрицательно заряженных реактивных поверхностях, таких как водные (гидр)оксиды трехвалентного железа (НFO) и алюминия (AlO). Концентрация этих металлов в растворе снижается с увеличением площади реагирующих поверхностей (Нукš, 2008). Подобные механизмы выщелачивания возможны для As, Se и Ag. Поведение Cr, Cu, Zn и Pb в фильтрате тоже может определяться сорбцией либо осаждением. В частности, было показано, что выщелачивание Cr могло происходить из минералов BaCrO_4 , а Pb в фильтрате в основном присутствовал в виде соединений с сульфатом и фосфатом. На основании результатов тестов выщелачивания был сделан вывод, что Cu и Zn в ЛЗ связываются с Ca-содержащими соединениями посредством осаждения и сорбции, а это приводит к снижению их концентрации в фильтрате. Понимание

этих механизмов является ключевым шагом для прогнозирования высвобождения микроэлементов и количественной оценки потенциальных рисков при использовании и захоронении ОСТКО (Luo et al., 2019).

Комплексообразование металлов с растворенным органическим углеродом (РОУ) хорошо известно, при этом выщелачивание многих металлов пропорционально количеству РОУ (Нукс, 2008).

Сорбция на HFO/AlO – не единственный процесс, посредством которого металл может удерживаться в твердой фазе. Например, значительные количества многих металлов в ОСТКО могут перейти в неподвижное состояние во время образования гидратированных фаз цемента, таких как этtringит ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$), и, таким образом, их концентрация в фильтрате будет определяться растворимостью.

Кроме того, механизм выщелачивания для данного элемента может меняться во времени. Поэтому для получения желаемой информации может использоваться несколько типов тестов выщелачивания. Однако важно понимать, какие условия выщелачивания рассматриваются. Например, существуют значительные различия в выщелачивании при сравнении инфильтрации через гранулированный материал с проточным типом инфильтрации, наблюдаемой для монолитных материалов. Следовательно, тип теста выщелачивания должен точно соответствовать изучаемому сценарию обращения с ОСТКО.

Было сделано предположение, что для оценки полномасштабного выщелачивания элементов из групп I и II могут быть использованы результаты лабораторных экспериментов с колонками. Однако во избежание значительных недооценок при изучении выщелачивания элементов из группы III

необходимо описать зависящую от времени миграцию РОУ в тестируемой системе или минимизировать физическое неравновесие во время лабораторных экспериментов (например, использовать большую колонку, меньшую скорость потока) (Нукš, 2008).

Общеизвестно, что pH является одним из наиболее важных факторов, влияющих на выщелачивание и неорганических, и органических компонентов из твердой фазы в раствор. Значение pH свежих ОСТКО часто бывает высоким (~10–12), что может быть связано с образованием в результате реакции гидратации щелочного гидроксида кальция – $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Растворимость ТМ сильно зависит от pH, однако степень чувствительности различается для разных металлов. Большинство из них (например, Cd, Cu, Pb и Zn) следуют *катионному выщелачиванию*, т.е. концентрации элементов снижаются с увеличением pH раствора. Для сравнения, максимальное выщелачивание As наблюдается в сильноокислых (pH ~2) и сильнощелочных (pH ~12) условиях и относится к *амфотерному типу выщелачивания*. Se проявляет *оксанионный характер* выщелачивания, и самые высокие концентрации достигаются в сильнощелочных условиях (pH >11) (Luo et al., 2019).

Размещение на полигоне отходов может снизить pH *шлака* с 10–12 до 8–8,5, и, таким образом, выщелачивание замедляется. Выщелачивание ТМ из выветрелого шлака предположительно зависит от сорбционной способности вновь образовавшихся (гидр)оксидов Fe и Al для металлов. Однако на выщелачивание из ЛЗ пребывание на полигоне не оказывает значительного влияния (Zhang et al., 2016).

Основная экологическая проблема обращения с ОСТКО – выщелачивание ЗВ в окружающую среду из захороненных остатков и переработанных материалов, полученных в результате их применения. Для уменьшения этих воздействий

применяются различные методы обработки. Эти методы используются и для шлака, и в большей степени для ЛЗ.

Для уменьшения выщелачивания ЗВ в окружающую среду из захороненных ОСТКО и или произведенных из них материалов применяются различные методы обработки. В основном это химическая и физическая сепарация (процессы, включающие экстракцию и удаление определенных компонентов), стабилизация и отверждение (процессы связывания и удерживания ЗВ с помощью химических реакций) и термическая обработка (процессы, связанные с нагреванием ОСТКО и изменением их физических и химических характеристик). Предлагается также экстрагирование ТМ путем биовыщелачивания.

Таблица 2.6.11

Сводка принципов и методов обработки ОСТКО (Luo et al., 2019)

Принципы обработки	Процессы / методы
1	2
Химическая и физическая сепарация	Промывание
	Электрокинетическая ремедиация
	Вихретоковая сепарация
	Электролиз
	Химическая экстракция / перевод в подвижное состояние
	Химическое осаждение
	Кристаллизация / испарение
	Адсорбция
	Дистилляция
	Ионный обмен
	Магнитная сепарация
	Сепарация на основе плотности и размера частиц

Окончание табл. 2.6.11

1	2
Стабилизация и отверждение	Химическая стабилизация
	Гидротермическое отверждение
	Ускоренная карбонизация
	Выдерживание / выветривание
	Использование вяжущих и добавок
Термическая обработка	Остекловывание
	Плавление
	Спекание
	Испарение / конденсация

В табл. 2.6.11 приведена сводка принципов и методов обработки ОСТКО. Лишь небольшая часть предлагаемых методов обработки в настоящее время используется в коммерческих целях, часто методы были протестированы только в лабораторном или пилотном масштабе (Luo et al., 2019; Management, 2008).

Таким образом, в результате многочисленных исследований с различными ОСТКО были идентифицированы три основных типа процессов выщелачивания элементов: связанные с (I) доступностью легкорастворимых минералов, (II) растворимостью минеральных фаз и (III) сорбцией на активных поверхностях и/или комплексообразованием с РОУ. При этом механизм выщелачивания для данного элемента может меняться во времени. Результаты экспериментов с колонками могут быть использованы для оценки полномасштабного выщелачивания элементов групп I и II. Для группы III необходимо описать зависящую от времени миграцию РОУ в тестируемой системе.

Выщелачивание ТМ сильно зависит от pH, но характер зависимости для разных видов металлов различен. Боль-

шинство из них (например, Cd, Cu, Pb и Z) следуют механизму *катионного выщелачивания*. Максимальное выщелачивание As наблюдается в сильноокислых ($\text{pH} \sim 2$) и сильнощелочных ($\text{pH} \sim 12$) условиях и относится к *амфотерному типу выщелачивания*. Se проявляет *оксианионный характер* выщелачивания: самые высокие концентрации достигаются в сильнощелочных условиях ($\text{pH} > 11$).

Краткосрочное количественное определение выщелачивания может быть выполнено непосредственно с использованием полномасштабных данных. Но долгосрочные количественные оценки (на столетия) в значительной степени опираются на перспективное геохимическое моделирование.

Для уменьшения выщелачивания ЗВ в окружающую среду из захороненных ОСТКО и/или произведенных из них материалов применяются различные методы обработки. В основном это химическая и физическая сепарация (процессы, включающие экстракцию и удаление определенных компонентов), стабилизация и отверждение (процессы связывания и удерживания ЗВ с помощью химических реакций) и термическая обработка (процессы, связанные с нагреванием ОСТКО и изменением их физических и химических характеристик). Предлагается также экстрагирование ТМ путем биовыщелачивания.

Описанные проблемы обращения с ОСТКО и оценки выщелачивания относятся как к шлаку, так и к ЛЗ. Однако из-за существенно различного состава этих ОСТКО особенности выщелачивания ЗВ, допустимость захоронения и возможности использования необходимо исследовать отдельно для шлака и ЛЗ.

Глава 2.7. Принципы мультибарьерной защиты геологической среды от воздействия полигонов ТКО

(В.Г. Заиканов, И.Н. Заиканова)

Полигоны ТКО являются природоохранными сооружениями и предназначены для сбора, обезвреживания и захоронения бытовых отходов. Однако сам полигон — это объект, являющийся сооружением повышенной геохимической опасности, источником загрязнения окружающей среды. Применяемые в настоящее время методы изоляции являются, во-первых, дорогостоящими, во-вторых, недостаточно надежными. Наличие систем барьеров — это для нашей страны новый, требующий концептуальных решений подход.

Иное для природной среды тело должно быть изолировано от контактов до тех пор, пока его воздействие не станет нейтральным. Для полной локализации свалочного тела используются различные подходы, но главное условие — это возведение «стены» между свалочным телом и контактирующей с ним геологической средой, подземными водами, почвами и другими компонентами природы. Причём «стена» должна быть химически непроницаемой, долговечной, сохраняющей свои функции достаточно продолжительное время. Таким целям служат образования, носящие название — барьеры (рис.2.7.1). Барьеры — это граница, переходная область, где одна устойчивая обстановка на сравнительно коротком расстоянии сменяется другой. По мнению некоторых авторов (Перельман, Касимов и др.), барьер — это участок литосферы, где резко уменьшается ин-

тенсивность миграции химических веществ и, как следствие, происходит аккумуляция элементов и соединений (Перельман, 1966; Касимов, Перельман, 1999; Максимович, Хайрулина, 2011). Причем эти участки могут быть естественные и созданные искусственно.

Искусственные барьеры могут быть спроектированы в зависимости от поставленной цели. Отличительной особенностью таких барьеров является возможность аккумуляции веществ, не встречающихся в естественной среде, например, пестициды, нефтепродукты и др. С другой стороны, количество химических веществ, концентрирующихся на техногенных барьерах, зачастую выше, чем на природных аналогах.

2.7.1. Применение мультибарьеров при проектировании полигонов ТКО

Для обеспечения долгосрочной безопасности полигоны ТКО должны быть оборудованы несколькими защитными барьерами в соответствии с так называемой мультибарьерной концепцией. Эта концепция основана на том, что даже если какой-то барьер выйдет из строя, все равно будет обеспечена эффективная защита окружающей среды. Для этого необходимо использовать комплекс искусственных и естественных барьеров, который включает следующие составляющие:

1. Раздельный сбор отходов.

Этот барьер обеспечивает возможность разных подходов к захоронению или утилизации отходов. Важным следствием этого барьера на пути к свалке является уменьшение массы захороняемых отходов, а значит и размера полигонов.

2. Предварительная обработка отходов.

Отходы, содержащие биоразлагаемые и другие органические компоненты, такие как ТКО, по мнению западных специалистов, должны быть предварительно обработаны на мусоросжигательных заводах или заводах механико-биологической очистки, прежде чем они будут отправлены на полигоны. Это способствует уменьшению загрязняющих атмосферу свалочных газов и загрязненных фильтрующих вод.

3. Геологический барьер.

Геологическим барьером называется естественный грунт, залегающий под свалкой и вокруг нее, который своими характеристиками и размерами в значительной степени препятствует распространению загрязняющих веществ.

Геологический барьер в основном состоит из естественных отложений слабопроницаемых пород достаточной мощности высокого потенциала удержания загрязняющих веществ. Предполагается, что геологический барьер имеет обширное распространение за пределами зоны залегания.

4. Минеральный уплотнительный слой.

Прослойка (с коэффициентом проницаемости K_f не менее 5×10^{-10}) с мощностью 0,50 м и конвекционным замком, также это может быть пластиковая прокладка толщиной 2,5 мм из пленки в качестве комбинированного уплотнения.

5. Мощный дренажный слой.

Создается для удержания фильтрата. Толщина 0,3 м из гравия 16/32 с трубами для отвода воды.

6. Характер ограждающих стен и днища полигона.

Внутри полигона происходят биологические, химические и физические процессы. Таким образом, для защиты окружающей среды он должен быть прочным и иметь такую

конструкцию, чтобы не допускать утечки свалочного газа и фильтрата в геологическую среду.

7. Система гидроизоляции основания полигона с захватом и обработкой фильтрата.

Защита геологической среды и почв может быть достигнута за счет сочетания геологического барьера и системы гидроизоляции в основании свалки. На полигонах ТКО достаточно установить слой минерального дренажа толщиной не менее 0,3 м над геологическим барьером, тогда как на полигонах с более высокими классами требуются дополнительные компоненты гидроизоляции (например, глина, пластиковая гидроизоляционная пленка).

8. Контроль фильтрата.

Оператор полигона должен поддерживать минимальное количество фильтрата, насколько это возможно в соответствии с современным уровнем оборудования полигона. Образующиеся фильтраты собираются и при необходимости обрабатываются на соответствующей очистной установке.

9. Система гидроизоляции поверхности полигона и сбора атмосферных осадков после его закрытия.

Поверхностное уплотнение должно предотвращать попадание осадков в корпус свалки, а также утечку любого возможного свалочного газа. Например, на полигоне ТКО достаточно нанести мелиоративный слой.

То же самое относится к дренажному слою, двум компонентам гидроизоляции и при необходимости к гидроизоляционным элементам. Требуются выравнивающие и отводящие газ слои. Рекультивационный слой можно заменить техническим функциональным слоем, если этого требует целевое использование полигона (например, в качестве транспортной зоны, парковки и т.п.).

10. Последующий уход. Если свалка засыпана, устанавливается необходимая система поверхностной гидроизоляции и производится вывод из эксплуатации. Измерения и проверки, производимые на этапах осаднения и эксплуатации, должны продолжаться и после вывода из эксплуатации на этапе последующего наблюдения. Должны измеряться следующие данные: количество осадков, количество и состав фильтрата, поверхностные воды и свалочный газ, уровень и состав грунтовых вод. Кроме того, компоненты гидроизоляции регулярно проверяются на работоспособность. Только после того, как на этапе наблюдения будет достигнуто состояние свалки, при котором больше не может быть постоянного ущерба для населения без необходимости дальнейших технических или эксплуатационных действий, ответственный орган должен освободить свалку от последующего наблюдения.

Понятно, что весь комплекс названных выше действий должен получить своё подтверждение в соответствующих нормативных документах, чего сейчас нет.

2.7.2. Геохимические барьеры

В последнее десятилетие для защиты окружающей среды от загрязнения наметилась тенденция использования геохимических барьеров, применение которых в ряде случаев позволяет отказаться от строительства сложных очистных сооружений и проведения других дорогостоящих природоохранных мероприятий. Однако широкое использование геохимических барьеров сдерживается отсутствием теоретических основ их практического применения при проектировании полигонов ТКО.

Как отмечал А.И. Перельман, широкий спектр проблем охраны окружающей среды выявил важнейшую научную и прикладную область применения геохимических барьеров—участков пространства, на которых происходит резкое уменьшение интенсивности миграции химических элементов и, как следствие, их концентрация (Перельман, 1966).

Необходимо различать типы барьеров по характеру миграции загрязняющих веществ. Есть барьеры «останавливающие» их перемещение. К ним относятся всякого рода преграды: из бетона, пленок, глинистых грунтов и др. Геохимические барьеры, в понимании Перельмана, — это барьеры «пропускающие», они не препятствуют движению растворов (фильтрата), но меняют их кислотность, осаждают на себе загрязняющие вещества, вступают с ними в реакцию и т.д. Учитывать особенности обоих типов барьеров очень важно, как и возможность их комплексного использования.

В настоящее время наметилось широкое применение в качестве барьера бентонитов, которые, кроме того, что являются по гранулометрическому составу «останавливающей» разновидностью барьеров, но отличаются также своей высокой способностью адсорбировать различные вещества, такие как масла, металлы, бактерии и токсины. Помимо прочего, они используются еще и в качестве осушающего агента.

Использование геохимических барьеров в области охраны геологической среды при создании полигонов ТКО позволяет решать возникшие проблемы наиболее простым способом, учитывая естественные защитные функции окружающей среды. Для этого существуют методы, основанные на ускорении естественной трансформации загрязняющих

веществ в неопасные формы или их целенаправленной концентрации на определенных, ограниченных по площади участках литосферы. Основываясь на теории геохимических барьеров, можно сформулировать принцип стратегического подхода к защите геологической среды от загрязнения.

Геохимические барьеры есть во всех природных обстановках, часто они моделируются и используются в хозяйственной деятельности. Образование физико-химических барьеров связано с резким изменением физико-химических условий: температуры, давления, окислительно-восстановительных, щелочно-кислотных и др. По факторам, определяющим концентрацию элементов, А.И. Перельман выделил классы барьеров, обозначенные им буквами латинского алфавита: кислородный (А), сульфидный или сероводородный (В), глеевый (С), щелочной (D), кислый (Е), испарительный (F), сорбционный (G), термодинамический (H), сульфатный (I).

Главными показателями барьера являются градиент (G), который характеризует изменение геохимических показателей (температура, давление, Eh, pH и др.) в направлении миграции химических элементов в зависимости от ширины барьера, и контрастность (S), которая является отношением величины геохимических показателей в направлении миграции до и после барьера. Емкость барьера представляет собой величину, характеризующую максимальное количество веществ, способных накапливаться в единице массы субстрата.

При создании геохимического барьера в дне и склонах полигона ТКО, на этапе его проектирования должно проводиться определение целого спектра исследований, включая показатель фильтрации каждого литологического пласта,

составляющего геологическое строение территории, а также их химического состава и инженерно-геологических свойств. Если на доступной для строительства полигона глубине есть глинистые горизонты, они могут служить природным барьером, препятствующим попаданию фильтрата в нижележащие горизонты и грунтовые воды. В качестве примера можно привести полигон «Кучино», расположенный на месте отработанного глиняного карьера Кучинского керамического комбината (Фисун, 2018).

В РФ и других странах принято, что глинистый слой на полигоне ТКО должен быть не менее 2–3 м. Если такой слой отсутствует в геологическом разрезе, его создают искусственно.

Для выбора типа барьера кроме выполнения комплекса лабораторных исследований, которые позволяют оценить естественные защитные свойства среды, необходимо выбрать реагенты, способные выполнить роль барьеров. После этого может быть создана модель барьера и технологическая схема его разработки: количество реагентов, способы их внесения, конструктивные особенности и т.д. Частным случаем этого принципа может являться разработка методов, основанных на поиске естественных участков литосферы с подобными свойствами в отношении загрязняющих (Фисун, 2018). В качестве материалов для создания геохимических барьеров могут служить почвы, грунтовые толщи, торф и др. А также для искусственных геохимических барьеров могут использоваться: отходы горно-промышленного комплекса, содержащие химически активные материалы, смеси химически активных и модифицированных различным образом минералов, продукты и отходы химико-металлургической переработки руд и концентратов и др.

В зависимости от состава загрязнителей, могут применяться в комплексе с природными образованиями и производственные отходы, что значительно снижает затраты и в известной мере решает проблему их утилизации. В ряде случаев локализация загрязнения может осуществляться, если при выборе участков складирования отходов используются и активизируются барьерные свойства самой природной среды.

Для создания геохимических барьеров, обеспечивающих условия консервации отходов и их полного разложения, необходимо учитывать не только фильтрационные, но и адсорбционные свойства грунтов оснований и бортов полигонов. Поскольку фильтрат обычно имеет кислую реакцию, для выпадения из него загрязняющих веществ могут использоваться карбонатные породы.

2.7.3. Разновидности искусственных мультибарьеров

Нередко спектр загрязнителей не позволяет защитить окружающую среду с помощью какого-либо одного вида барьеров, поэтому для создания геохимических барьеров применяются природные или природоподобные материалы в комбинации в виде комплексных искусственных барьеров. Полезную информацию при этом может дать изучение природных и техногенных аналогов геохимических барьеров. Например, применение для минимизации вредного влияния на окружающую среду отходов Карабашского медеплавильного комбината (Южный Урал) был использован аналог природного материала – модифицированный торф с повышенным содержанием гуминовых кислот (Богуш, Трофимов, 2005). В качестве дополнительного сорбента был добавлен мраморизованный известняк Салаирского рудного поля

с примесью доломита. При добавлении известняка происходит нейтрализация кислых растворов, а применение гуматов способствует образованию труднорастворимых соединений, в том числе с участием тяжелых металлов.

К первой группе техногенных барьеров относятся технические средства, предназначенные для задерживания загрязняющих веществ: фильтры, очистные сооружения, отстойники. Ко второй — так называемые встроенные техногенные геохимические барьеры, возникающие из-за введения в природную среду веществ, резко меняющих геохимию природных процессов. Вторичные (попутные) техногенные геохимические барьеры возникают из-за техногенно обусловленных изменений хода природных процессов (Солнцева, 1998).

Отличительной особенностью *искусственных геохимических барьеров* является возможность аккумуляции таких веществ, как нефтепродукты, полиароматические углеводороды, пестициды и др. Концентрации веществ, имеющих природные аналоги на искусственных барьерах, в ряде случаев значительно выше, чем на природных.

При использовании барьеров второго типа — «пропускающих» — необходимо учитывать такую их особенность, как кольматаж, то есть снижение фильтрационных характеристик фильтрующих элементов. В зарубежной литературе термин «кольматация» применяется для обозначения процесса механического осаждения частиц в поровом пространстве, а для обозначения химического осаждения различных минеральных соединений используется термин «инкрустация» (от англ. *incrustation* — образование корки, кора, плотное отложение). Эффективность работы фильтрующих барьеров значительно зависит от кольматационно-суффозионных

процессов на контакте тела полигона и геохимического барьера, а также образования на нем осадков механического, физико-химического и биологического происхождения. Эти явления определяют как мощность (ширину, по Перельману), так и продолжительность действия такого барьера.

Сущность этих процессов необходимо знать для разработки методов подбора, расчета мощности барьера и продолжительности их службы.

Сама кольматация может способствовать образованию **искусственного механического** барьера, ее можно использовать для уплотнения контакта склонов и днища полигона с его телом. В результате кольматации происходит процесс заполнения порового пространства грунта или разного рода покрытий, защищающих полигон от проникновения фильтрата в геологическую среду, более мелкими частицами, находящимися во взвешенном состоянии в фильтрате. Кольматация в данном случае происходит благодаря двум причинам — простому механическому заполнению пор грунта и поверхностному взаимодействию частиц. Твердые взвешенные частицы суспензии, которой является фильтрат, могут механически задерживаться в порах грунтов, а также вступать в физико-химические взаимодействия со скелетом грунтового барьера и друг с другом с образованием коагуляционных связей (Воронкевич, 2005; Грунтоведение, 2005).

Особую группу барьеров представляют **искусственные биогеохимические барьеры** — те, которые могут применяться для микробиологической очистки. Например, использование сообщества микроорганизмов, которые активно участвуют в процессах оглеения с выносом загрязняющих веществ их трансформацией. В основе биоорганического комплекса, предназначенного для выщелачивания металлов, лежит торф с различными добавками.

Одним из возможных способов удаления взвешенных частиц могут быть искусственные, а в ряде случаев и естественные **механические геохимические барьеры**, предусматривающие пропускание фильтрата полигонов ТКО через фильтры из местных грунтов и отвалов. Подобные механические геохимические барьеры применяются для очистки от взвешенных частиц вод, образующихся при угледобыче (Лесин, 1986). Исследования, проведенные Ю.В. Лесиным, показали, что наиболее простую конструкцию имеют фильтры, размещенные в естественных или искусственных выемках (оврагах, логах, старых горных выработках и т.п.) (Лесин, 1986).

В ходе эксплуатации любого типа барьеров должен проводиться мониторинг его эффективности, вноситься необходимые корректировки в технологию. Эти действия должны обязательно найти свое отражение в нормативных документах по проектированию и эксплуатации полигонов ТКО.

Широкое применение геохимических барьеров сдерживается отсутствием методологии, позволяющей перейти от учения о геохимических барьерах к их практическому использованию при проектировании полигонов ТКО.

Особо надо остановиться на укреплении дна полигона свалок, поскольку через его поверхность может осуществляться миграция фильтрата в геологическую среду и подземные воды. Применяемые в настоящее время в нашей стране изоляционные материалы не всегда являются оптимальным решением, поскольку подвержены со временем разрушению в том числе и после рекультивации свалки, когда в ней не исключается действие процесса образования фильтрата. Поэтому, учитывая долгосрочную перспективу существования полигонов захоронения ТКО, необходимо

принять особо строгие меры по изоляции их днищ с образованием соответствующих барьеров.

В качестве одного из положительных примеров создания таких барьеров можно привести опыт Германии (рис. 2.7.1).

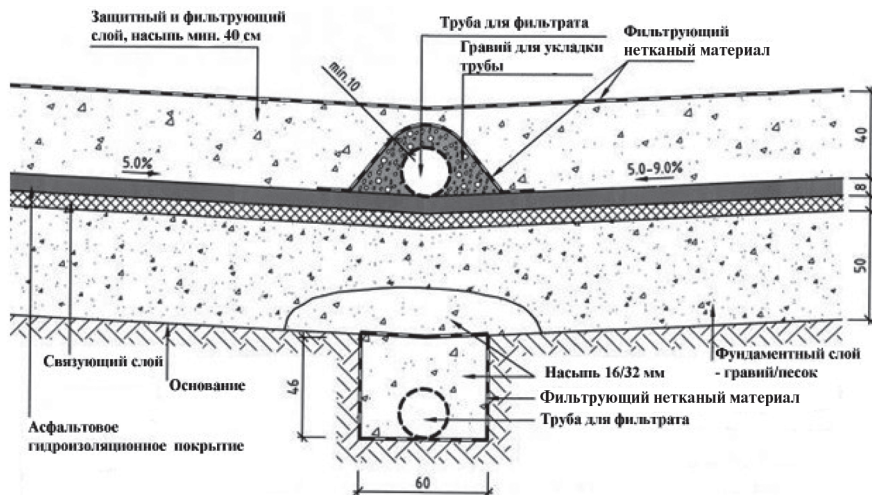


Рис.2.7.1. Принципиальная схема гидроизоляции и уплотнения основания свалки

(Источник: URL: <https://www.abfall-sh.ch/pflumm/content/deponietechnik/basisabdichtung-und-entwaesserungssystem/>)

Здесь применено несколько барьеров:

- Защитный и фильтрующий слой, верхняя насыпь мин. 40 см.
- Труба для фильтрата, находится на асфальтовом покрытии.
- Гравий для укладки трубы.
- Фильтрующий нетканый материал применяется для гидроизоляции поверхности всей системы изолирующих барьеров и насыпей труб для удаления фильтрата.
- Асфальтовое гидроизоляционное покрытие.

- Связующий слой под асфальтовым покрытием.
- Фундаментный слой — насыпь из гравия и песка.
- Насыпи для прокладки труб.
- Труба для фильтрата ниже контакта мультибарьера и основания свалки.
- Система траншей под свалкой для прокладки труб и др.

Для проектирования барьеров на полигонах ТКО необходимо выполнение нескольких условий. Во-первых, должны быть разработаны теоретические основы применения разных видов барьеров при проектировании полигонов ТКО в разных типах геологических условий (в зависимости от механического, химического состава, гидрогеологических условий, опасных экзогенных геологических процессов и др.). Барьеры для этого типа хозяйственного использования должны быть классифицированы, их применение должно быть теоретически аргументировано, особенно это касается искусственных природно-техногенных и техногенных видов барьеров, которые применяются без должного опытного обоснования.

Во-вторых, должны быть разработаны нормативные требования к применению барьеров для полигонов с учетом региональных особенностей, к ним относятся: области распространения многолетнемерзлых пород, карста, горные и предгорные территории, природно-климатические зоны, болотные системы и др. Все эти условия необходимо учитывать при проектировании безопасных для геологической среды полигонов ТКО.

Концептуально активное применение барьеров при проектировании и эксплуатации полигонов ТКО с учетом всего вышесказанного может быть достигнуто, если будет осуществлена последовательность действий:

1. Разработка классификации типов барьеров для полигонов ТКО в геологической среде.

2. Разработка теоретических и методических основ проектирования полигонов с применением барьеров для различных природных и селитебных обстановок.

3. Разработка законодательных и нормативных основ проектирования, эксплуатации и контроля состояния полигонов ТКО с использованием теоретической и методической базы.

4. Разработка и внедрение новых природных, искусственных и смешанных барьеров, направленных на нейтрализацию и локализацию свалочных масс, особенно химической, геохимической и биогеохимической направленности.

5. Широкое использование имеющегося в настоящее время опыта нейтрализации отходов металлургической и горнодобывающей промышленности для нейтрализации негативного воздействия полигонов ТКО на геологическую среду.

Таким образом, современное состояние управления отходами требует принятия концептуальных решений. Одним из них является применение системы барьеров при строительстве полигонов ТКО, которая может сократить расходы и обеспечить оптимальные условия изоляции отходов. Представленные выше рекомендации по устройству мультибарьеров на полигонах ТКО, обеспечивающих их безопасность для окружающей среды, разработаны с использованием опыта зарубежных стран.

Исходя из того, сколько и каких барьеров предполагается использовать при проектировании полигонов ТКО, столько необходимо разработать соответствующих рекомендаций и методик.

Созданные рекомендации и методики должны получить подтверждение и развитие в нормативных документах, разработка которых еще предстоит.

Исключительно национальным достижением нашей науки является разработка учения о геохимических барьерах, позволяющих сократить затраты на обустройство полигонов ТКО, разработка которых должна быть продолжена.

Предлагаются варианты применения геохимических барьеров, использованных при проектировании природоохран-ных установок, получивших положительные результаты, которые с успехом можно внедрять при проектировании полигонов ТКО.

Глава 2.8. Внедрение принципов природоподобных технологий на современных полигонах ТКО (на примере полигона «Тимохово»)

(О.Н. Еремина)

Как показывают многочисленные исследования (Алешина, Чернышов, 2012; Заиканов, Заиканова, Булдакова, 2018; Дементьев, 2000; Джамалов и др.; 2018; Трушин, 1994 и др.), среди действующих в настоящее время полигонов ТБО ни один не может отвечать абсолютно «идеальным» критериям и полностью соответствовать требованиям безопасного полигона с геоэкологической точки зрения (СанПиН 2.1.7.1038-01). Тем не менее необходимо признать, что проводимая в настоящее время комплексная реформа системы обращения с отходами в нашей стране уже приносит некоторые положительные результаты, в том числе она благоприятно отразилась на реорганизации и улучшении инфраструктуры действующих полигонов ТКО. Сегодня идет речь о создании крупных современных комплексов – «хабов», обеспечивающих сортировку, переработку (включая компостирование), утилизацию (сжигание и пиролиз) и захоронение ТКО (Титов, 2019). Как отмечалось в предыдущих главах, в СП 320.1325800.2017 с поправками 2022 г. говорится, что в состав полигона ТКО помимо участка размещения отходов в обязательном порядке должен входить цех по обработке и сортировке отходов, участок дробления крупногабаритных отходов, участок компостирования и радиационного контроля. Свалочное тело полигона оборудуется инженерными системами и сооружениями для сбора и утилизации биогаза, а также очистными сооружения-

ми фильтрационных вод. Исключение проникновения фильтрационных вод в подземные горизонты достигается за счет сочетания геологического барьера и системы гидроизоляции основания полигона (противофильтрационного экрана). Для обустройства геологического барьера (в случае применения геосинтетических материалов) и противофильтрационного экрана должны использоваться геосинтетические материалы разных видов (бентонитовые маты и полимерные геомембраны). Захоронение следует проводить послойным чередованием ТКО и инертных материалов. В качестве инертных материалов могут использоваться инертные природные материалы, грунты или техногенные грунты (СП 320.1325800.2017). Достаточность для обеспечения безопасности полигона указанных мер и их реализуемость на практике мер являются предметом отдельного изучения.

Кроме того, следует учитывать, что захоронению должны подвергаться только отходы, прошедшие специальную обработку. Одним из передовых методов подготовки отходов для захоронения является механико-биологическая обработка, активно применяемая в передовых странах (Юганова, 2023). Суть метода была подробно описана в главе 2.6.

Наши исследования по разработке природоподобных технологий для полигонного захоронения ТКО также включали работы по натурному обследованию действующих полигонов Московского региона с точки зрения соответствия их технологического цикла условиям безопасного для окружающей среды «идеального» полигона. Результаты этого направления работ покажем на примере одного из крупнейших в Европе полигонов ТКО «Тимохово», расположенного в Московской области.

Полигон «Тимохово»⁸ в Ногинском районе Московской области — один из немногих примеров современного полигона ТКО, представляющего собой комплекс по переработке и утилизации отходов, который в наибольшей степени отвечает требованиям безопасного полигона. Полигон расположен в 14 км юго-западнее районного центра — г. Ногинска, в 800 м к югу от дер. Тимохово (рис. 2.8.1; 2.8.2). Это крупнейший объект размещения ТКО в России и один из крупнейших в Европе (Аревкин, 2002; Труфанов и др., 1997). Полигон эксплуатируется уже 45 лет, начиная с 1977 г., его площадь составляет 113,8 га. В 2017 г. в связи с закрытием Кучинского полигона в 2017 г. согласно территориальной схеме обращения с ТКО по Московской области нагрузка на полигон «Тимохово» увеличилась. В настоящее время общий объем захороненных на полигоне отходов оценивается в 35 млн т (Постановление Правительства Московской области от 11.01.2022 № 3/1).



Рис. 2.8.1. Спутниковый снимок полигона «Тимохово»

⁸ URL: <https://xn----dtbbtcolffdeabb6cxc.xn--p1ai/>



Рис. 2.8.2. Главный въезд на КПП полигона «Тимохово».
Фото О.Н. Ереминой, май 2023 г.

Складирование отходов первоначально производилось в отработанных карьерах гжельско-кудиновских глин (J_2kd), глубиной 10–15 м. В настоящее время высота насыпи отходов достигает 60–70 м при мощности 80 м. Полигон ТКО «Тимохово» закладывался во время, когда отсутствовали нормативные требования к месту расположения площадки, ее обустройству, к технологиям складирования отходов. Специальной подготовки ложа для складирования отходов не производилось, и разработанный горизонт кудиновских глин служил единственным природным барьером для проникновения загрязнения в нижележащий геологический массив. Многочисленные геоэкологические проблемы, возникавшие в результате работе полигона, неоднократно освещались как в публикациях СМИ, так и в научных трудах (Трушин, 1994; Харькина, 2018; Осипенко, Громова, 2018; Аревкин, 2002; Труфанов и др., 1997).

Глобальная реорганизация и реконструкция полигона были начаты в 2014 г. по проекту, разработанному ЗАО «Спецгеоэкология»; к настоящему времени этот полигон превращен в крупнейший в Московском регионе комплекс по переработке отходов, в перспективе нацеленный на полное исключение их захоронения. Согласно принятой территориальной схеме обращения с ТКО полигон будет работать до 2032 г. Следует отметить, что согласно плану реконструкции, к 2030 г. этот полигон войдет в состав одного из трех крупных модернизированных комплексов по переработке отходов, причем 12 из 15 ныне действующих полигонов на территории Московской области будут закрыты к этому сроку (Постановление Правительства Московской области от 11.01.2022 № 3/1).

Проведенные к настоящему времени мероприятия по созданию «Комплекса по переработке отходов с реконструкцией и рекультивацией полигона ТКО «Тимохово» включают следующие (Шевелева, 2015):

- Реконструкция и модернизация существующего сортировочного комплекса с увеличением годовой производительности на входе до 650 тыс. т ТКО (рис. 2.8.3).
- Строительство участка грохотов мощностью на входе 250 тыс. т в год, для выделения органической фракции из «хвостов» отсортированных отходов с других сортировочных комплексов, расположенных в Московской области, с увеличением общей мощности сортировочного комплекса до 400 тыс. т в год (рис. 2.8.6; 2.8.7).
- Строительство биогазового комплекса анаэробного сбраживания отходов ТКО с биотенками (ферментаторами) для переработки органических отходов общей мощностью 200 тыс. т в год и участком электрогенерации из пяти блоч-

ных ТЭС для получения электроэнергии мощностью по 2 МВт каждая (рис. 2.8.8).

- Строительство участка компостирования органической фракции пенального типа с использованием укрывного материала мощностью 150 тыс. т. Участок состоит из 32 бетонных пеналов размером 45,0×8,5 м (рис. 2.8.4; 2.8.5).
- Сооружение дренажной системы для сбора, транспортировки и очистки фильтрата
- Строительство системы сбора поверхностного стока и очистных сооружений поверхностных сточных вод с территории производственных площадок, дорог и тела полигона.
- Строительство системы активной дегазации со сбором биогаза для обезвреживания на высокотемпературных факельных установках.



Рис. 2.8.3. Комплекс по сортировке и переработке отходов реконструированного полигона ТКО «Тимохово»
(Источник: URL: <https://ntc-tbo.ru/catalog/kompost>)

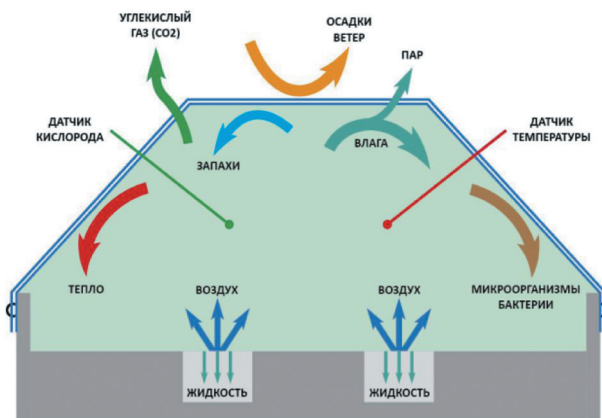


Рис. 2.8.4. Схема процессов, протекающих в буре на участке компостирования органических фракций пенального типа



Рис. 2.8.5. Компостирование органической фракции ТКО в бетонных пеналах (буртах). Фото О.Н.Ереминой, май 2023 г.



Рис.2.8.6. Автоматическая линия просеивания компоста (грохочения) из отсева органической фракции ТКО.
Фото О.Н.Ереминой, май 2023 г.



Рис.2.8.7. Фракция, полученная в результате просеивания на грохотах компоста. Фото О.Н.Ереминой, май 2023 г.

Таким образом, в настоящее время на мусоросортировочных линиях, установленных на полигоне «Тимохово», отбирается до 30% вторичного сырья (картон, бумага, все виды пластмассы, металл). Сортировка отходов позволяет сократить объемы захоронения отходов; снизить пожароопасность полигона; использовать часть отходов в качестве вторичного сырья; увеличить срок службы полигона. Сортировка и переработка отходов обеспечиваются установкой для дробления железобетонных отходов; цехом переработки ПЭТФ-тары, исходным сырьем для которого являются ПЭТФ-бутылки, отобранные в процессе сортировки отходов, а конечной продукцией механической переработки — пластиковые хлопья размером 10–20 мм.

Важным этапом сортировки и переработки ТКО, поступающего на полигон, является его компостирование. Компостирование осуществляется в буртах пенального типа мощностью 160 тыс. т в год (рис. 2.8.5). Схема процессов, протекающих в буртах, представлена на рис. 2.8.4. Органические отходы складировются в специально оборудованные пеналы для перегнивания и последующего применения в качестве удобрений. В стандартном варианте полное разложение растительной органики занимает до 5–7 месяцев. Готовый компост подвергается дополнительному отсеvu на грохотах (рис. 2.8.6). На образование полноценного удобрения (рис. 2.8.7) уходит до 1 года. Компостирование считается самым экологичным способом переработки отходов.

Сбор фильтрата из свалочного тела происходит в пруде-накопителе, расположенном в самой низкой точке полигона; для очистки фильтрата по технологии обратного осмоса используется установка фирмы «HAASE» (Германия), по-

звolyающая очистить фильтрат с эффективностью 98%. Внутри тела полигона проложена дренажная система, отводящая фильтрат. Она оснащена контрольными колодцами глубиной 10–12 м, которые выполнены из железобетонных блоков и обтянуты геотекстилем, препятствующим попаданию внутрь механических частиц. Из дренажной системы фильтрат подается на очистные сооружения (Шевелева, 2015). На поверхности тела полигона оборудован противофильтрационный экран, представляющий собой покрытие из геосинтетических материалов, переложенных минеральными слоями из суглинистых грунтов. Противофильтрационное перекрытие препятствует поступлению атмосферных осадков в тело полигона и выходу свалочного газа (биогаза) из тела полигона в атмосферный воздух.

На полигоне действует система сбора и обезвреживания свалочного газа на высокотемпературных факельных установках, для чего в теле свалки пробурено 60 скважин для сбора, очистки и утилизации газа.

Необходимо отметить также тот факт, что на полигоне «Тимохово» недавно построена первая в России система анаэробной переработки отходов в биогаз, так называемый биогазовый комплекс для получения электрической и тепловой энергии по принципу когенерации. Энергоцентр, работающий на биогазе, включает 3 энергогенераторные установки по 2000 кВт. Вырабатываемая из отходов электроэнергия используется в первую очередь для собственных нужд полигона, а излишки подаются в общую сеть (см. рис. 2.8.8).

Таким образом, из выполненного в мае 2023 г. натурного обследования видно, что проведенная реконструкция полигона «Тимохово», внедрение современных технологических решений позволили преобразовать этот ранее проблемный

в геоэкологическом отношении полигон в современный комплекс по переработке и утилизации отходов, отвечающий требованиям времени. Как утверждает на официальном сайте полигона, в настоящее время полигон ТБО «Тимохово» полностью соответствует природоохранным и санитарным требованиям, предъявляемым к объектам размещения и переработки отходов⁹. Ответ на вопрос, насколько это утверждение верно, может быть получен только путем



Рис. 2.8.8. Биогазовый комплекс анаэробного сбраживания отходов ТКО с участком электрогенерации. Фото О.Н.Ереминой, май 2023 г.

⁹ URL: <https://xn----dtbbtcolffideabb6cxc.xn--p1ai/index.php/razmeshchenie-otkhodov>

проведения комплекса специальных лабораторных и полевых исследований. Тем не менее, выполненные визуальные обследования позволяют сделать вывод, что с точки зрения технологических решений этот полигон может соответствовать требованиям, предъявляемым к безопасным полигонам.

Таким образом, все вышеизложенное в главах 2.1–2.8 позволяет заключить, что решение проблемы складирования и захоронения твердых коммунальных отходов требует комплексного подхода — поиска новых технологических решений, дальнейшего развития системы природных и искусственных барьеров и оптимизации выбора мест размещения отходов с учетом природных геологических барьеров.

Несмотря на постоянные совершенствования различных технологий переработки ТКО, полигонное размещение отходов остается неотъемлемой частью системы обращения с ними. Задача заключается в том, чтобы полигоны отвечали современным научным достижениям, соответствовали требованиям законодательных и нормативных документов и обеспечивали экологическую безопасность. Рассмотренная выше усовершенствованная природоподобная полигонная технология включает несколько этапов реализации — от сортировки отходов до возвращения занятых полигоном земель в хозяйственный оборот и дальнейшего использования их без ограничений. Применение этой технологии позволит создавать с экологической и экономической точки зрения более эффективную систему землепользования и обращения с отходами. Дальнейшая разработка предлагаемой технологии может стать основой для развития системы обращения с ТКО в России.

Часть 3. Научно-методологические подходы к выбору мест для оптимального размещения полигонов ТКО. Оценка опасности и риска

Глава 3.1. Современные методы выбора мест размещения объектов ТКО

(О.Н.Еремина, И.В.Козлякова, Ю.А.Мамаев)

3.1.1. Направления научных исследований для оптимального размещения объектов ТКО

Проблема обращения с отходами — одна из крупных экологических проблем современности. О том, как её надо решать, много говорится в настоящее время (Зотов, 2016; Осипов, 2019; Осипов, Мамаев, Козлякова, 2020; Хмельченко, 2017; 2018). К исследованиям, направленным на обеспечение безопасного обращения с бытовыми и промышленными отходами, привлечено внимание специалистов разных стран мира (Cremiato et al., 2018; Nakhaei et al., 2015; Ogola et al., 2011; Zelenović et al., 2012). Как следует из анализа отечественной и зарубежной научной литературы, в настоящее время исследования, связанные с проблемами размещения ТКО, ведутся в основном по двум направлениям:

1. *Оценка опасности и риска существующих свалок и полигонов ТКО.* При исследованиях в этом направлении, как в нашей стране, так и за рубежом разрабатываются методики определения экологических рисков воздействия уже суще-

ствующих свалок, в том числе старых, на разные компоненты окружающей среды и человека (Balogun-Adeleye et al., 2019; Cremiato et al., 2018; Nakhaei et al., 2015; Yannah et al., 2019). Такие методики часто основаны на балльной оценке по группам критериев, учитывающих территориальное размещение объектов, геологические и гидрологические условия среды, техническое обеспечение объектов и т.д. (Слюсарь, 2016; Schueler, 2011).

Отечественные исследования опасности и риска отдельных полигонов ТКО проанализированы в статье В.Н. Буровой и др. (Бурова и др., 2022). Так, например, оценке опасности свалок на территории Краснодарского края посвящена работа А.В. Погорелова и Д.А. Липилина (Погорелов, Липилин, 2014). Исследователи провели анализ площадного распределения свалок и полигоны складирования ТБО, ранжируя их по критерию площади (мелкие, средние, крупные) и степени опасности воздействия на ландшафтную среду. Современное геоэкологическое состояние свалок и полигонов твердых бытовых отходов Московской области изучали сотрудники НИУ МГСУ (Алёшина, Чернышев, 2012). Г.В. Ильиных, В.Н. Коротаев, Я.И. Вайсман (ФГБОУ ВПО «ПНИПУ») предложили алгоритм оценки экологической нагрузки на объекты окружающей среды путем расчета предотвращенного экологического ущерба при реализации различных технологий обращения с ТКО на основании данных об их составе (Ильиных и др., 2014). Примеров подобных исследований, проводимых для конкретных объектов ТКО, много. Меньше внимания уделяется региональной оценке опасности и риска территорий, находящихся под воздействием свалок и полигонов ТКО. Практически нет работ,

посвященных картографированию природно-техногенного риска территорий. Между тем предварительный риск-анализ обширных территорий в мелком масштабе с целью оценки их экологического неблагополучия с учетом существующих свалок представляет собой на сегодняшний день важную задачу.

2. Выбор подходящих мест для будущего размещения полигонов ТКО или предприятий по их утилизации. Это весьма серьезная проблема, сопряженная с решением спорных вопросов. Сложность проблемы обусловлена, прежде всего, ее мультидисциплинарным характером с большим числом социально-экономических, технологических и экологических аспектов, которые необходимо учитывать. В число заинтересованных сторон, влияющих на принятие решения о выборе места размещения объектов обращения с отходами, входят: население, муниципальные и региональные администрации, государственные регулирующие органы, бизнес (компании по транспортировке ТКО, компании по эксплуатации полигонов ТКО), инвестиционные фонды, общественные организации для защиты окружающей среды, экспертное сообщество. Учитывая тот факт, что проблема выбора места для размещения объектов обращения с отходами весьма разноплановая, затрагивает широкий круг участников и требует учета множества разнообразных, а порой и противоположных, мнений, для ее решения необходим многокритериальный механизм, который позволил бы выработать компромиссное и объективное решение, учитывающее интересы всех участников. В последние десятилетия развитие ГИС-технологий и инструментов многокритериального анализа позволило привлечь этот математический аппарат для решения вопроса о выборе мест размещения объектов

обращения с отходами. Для этих целей используются такие методы многокритериального математического анализа, как ANP, ANP, PROMETHEE, ELECTRE, TOPSYS и др., доказавшие свою эффективность (Юганова, 2019).

Как отмечает академик В.И.Осипов, среди инженерно-геологических задач, возникающих при выборе мест расположения полигонов ТКО, выделяется необходимость районирования территорий для оптимального размещения площадок временного складирования, переработки и захоронения ТКО, чтобы создаваемые объекты не становились новым источником техногенного загрязнения окружающей среды (Осипов, 2019). Картографические исследования с использованием многокритериального анализа, направленные на выбор площадки размещения объектов ТКО, ведутся, как правило, в крупном масштабе, на уровне выбора площадок и сводятся к сравнению альтернативных вариантов расположения объектов ТКО (Bottero, 2011; Chauhan, Singh, 2016; Erkut, 2008; Wang, 2008). Реже многофакторному анализу на региональном уровне подвергается обширная территория для предварительного оконтуривания перспективных участков расположения объектов ТКО. Такие исследования подразумевают построение карт на основе ГИС путем наложения тематических слоев, включающих данные по социальному (демографическому), экономическому (тип землепользования, характер застройки, степень хозяйственного освоения территорий) и природному (гидрологические, геоморфологические, геологические условия) блокам. Построение таких карт в масштабах 1:25 000-1:100 000 выполнено для различных регионов земного шара, например, для окрестностей индийского города Гувахати (Phukon, 2005); для муниципалитета Панчево (Djokanović, 2016) и региона

Срем (Zelenović, 2012) в Сербии; для окрестностей Стамбула (Guler, 2017), для различных регионов Ирана (Khodaparast, 2018; Rahmat, 2017) и др.

3.1.2. Применение ГИС в информационной системе управления ТКО

Принятие научных, управленческих и инженерных решений по территориальному планированию размещения и безопасному встраиванию объектов обращения с ТКО в природную (геологическую) среду базируется на анализе больших объемов фактической информации и предусматривает, как правило, составление нескольких вариантов решений с целью выбора оптимального. Для этого необходимо применение автоматизированных компьютерных геоинформационных систем (ГИС), предназначенных для сбора, хранения, обработки и анализа числовых количественных показателей в виде тематических банков данных и построенных на их основе математических моделей; визуализации пространственных (территориальных) данных на картографических моделях: картах, схемах, графиках трендов; использовании текстовых, табличных, нормативных и справочных материалов (Миронов, 2000).

В последнее время в систему управления ТКО приходят современные технологии и применение методов науки о данных¹. К разделам управления ТКО, которые могут извлечь

¹ Наука о данных — раздел информатики, который изучает проблемы анализа, обработки и представления данных в цифровой форме. Основная практическая цель профессиональной деятельности в науке о данных — обнаружение закономерностей в данных и извлечение знаний из данных в обобщённой форме.

наибольшую пользу из информации, основанной на данных, относят прогнозирование образования отходов, оптимизацию маршрутов сбора и развитие технологий переработки (Козлякова и др., 2024). Перспективы расширения роли науки о данных заключаются в привлечении геоинформационных исследований для управления отходами. Например, картирование горячих точек образования отходов в режиме реального времени, прогнозирование емкости свалок, оптимизация маршрутов сбора отходов с использованием данных о дорожном движении в реальном времени (Muhammad Tajammal Munir, 2024).

Применение ГИС позволяет с высокой эффективностью решать вопросы территориального планирования и управления обращением с ТКО; проектирования и строительства объектов переработки, утилизации и захоронения отходов (СП 320.1325800. 2017, 2022); обоснованного научного выбора технологий переработки отходов на основе анализа их компонентного состава и свойств; обеспечения экологической безопасности объектов и территорий размещения ТКО, включая методы экологического контроля и мониторинга. Безусловным преимуществом ГИС является многоаспектность и многократность использования первичной информации о природных условиях, геологическом строении территорий, объектах техносферы, включая: транспортную и инженерную инфраструктуры, промышленные, гражданские, сельскохозяйственные и водные объекты, особо охраняемые земли, а также социально-экономические показатели территорий, на которых планируется размещение объектов ТКО (Миронов, Полеводова, 2018).

Целью создания информационной системы управления (ИСУ) ТКО в составе территориальных схем обращения

с отходами производства и потребления для территорий любого масштаба является многоаспектное информационное обеспечение системы принятия долгосрочных и оперативных решений административно-управленческого, территориально-планировочного, проектно-строительного и инженерного характера в области управления обращением с ТКО, а именно: планирования размещения, проектирования, строительства и эксплуатации объектов обращения с ТКО; рационального использования и защиты природной среды осваиваемых территорий; оценки экологического состояния и изменений территорий; перспективного управления хозяйственно-экономической деятельностью в целях безопасного развития территорий; контроля за оптимальной логистикой транспортных средств, занятых в перемещении отходов.

ИСУ ТКО должна быть открытой системой, позволяющей добавлять новые функциональные возможности путем включения программных модулей и устанавливать связи с другими информационными системами территориального управления. Она должна интегрировать информацию других специализированных информационных систем и баз данных: административно-управленческого, нормативного, статистического, реестрового, экономического, природного, в том числе геологического и экологического содержания, а также данные о топографии территории, геодезической привязке важных объектов промышленности, транспорта, сельского хозяйства и жилищно-коммунального комплекса. ИСУ ТКО должна содержать информацию о геодезической и адресной привязке всех действующих и строящихся объектах сбора, временного хранения, переработки, обезвреживания и утилизации ТКО, а также полигонах и свалках не-

утилизируемых отходов. Важной частью ИСУ ТКО являются картографические материалы: электронные схемы, карты, планшеты с транспортной инфраструктурой и действующими логистическими схемами движения специального транспорта, занятого в перемещении отходов.

О.К. Миронов отмечает, что структура программного обеспечения ИСУ ТКО должна включать следующие функциональные блоки (Миронов, 2000):

- ядро системы, обеспечивающее информационное взаимодействие и функционирование всех подсистем, доступ к базам данных, управление информационными потоками, интерфейсы с автоматизированными рабочими местами конечных пользователей, обмен информацией с внешними пользователями, определение полномочий пользователей и администрирование запросов к информации;
- систему управления базами фактографических данных;
- систему управления базами графических данных (карт, схем, таблиц и др.);
- систему обслуживания запросов по фактографическим и топологическим параметрам;
- систему визуализации результатов запросов (в графическом, табличном и текстовом виде);
- систему графического моделирования;
- систему интерпретации материалов дистанционных съемок;
- систему решения прогнозных и расчетно-аналитических задач и задач математического моделирования;
- экспертные системы с базами знаний по проектно-строительным, геологическим и экологическим вопросам строительства и эксплуатации полигонов и других объектов ТКО.

Важными требованиями к программному обеспечению ИСУ ТКО являются:

- информационная совместимость различных систем;
- использование единой системы геодезической привязки объектов, единой системы координат и номенклатуры геодезических планов и объектов.

В настоящее время в отдельных субъектах РФ (Московской, Свердловской, Владимирской областях и других) разработаны и внедряются в практику обращения с отходами отдельные элементы ИСУ ТКО, например, электронные карты территорий с указанием мест размещения и характеристик крупных объектов обращения с ТКО и направлениями движения основных потоков отходов между ними.

3.1.3. Многокритериальная оценка территорий для выбора мест оптимального размещения объектов ТКО

ГИС-технологии находят широкое применение на этапе выбора оптимальной площадки размещения полигонов ТКО. Решение задачи выбора перспективных площадок для строительства полигона ТКО с помощью ГИС-технологий должно проводиться в такой последовательности (Миرونнов, Полеводова, 2018):

1. Определение набора факторов (критериев), влияющих на выбор места расположения площадки и составление карт распространения каждого фактора.
2. Определение допустимых значений каждого фактора (критерия) и выбор интегрального показателя благоприятности территории для строительства.
3. Применение ГИС-технологий для нахождения наиболее благоприятных территорий.

О.К. Миронов и С.Н. Полеводова разделяют факторы, влияющие на выбор площадки, на 3 блока: социально-экономический, геологический и экологический. Авторы приводят следующий ориентировочный перечень факторов, учитываемых в различных документах и конкретных примерах выбора мест размещения полигонов хранения ТКО (Миронов, Полеводова, 2018):

Социально-экономические факторы:

- район, в котором осуществляется подбор участка для размещения полигона;
- расстояние от жилой застройки;
- расстояние от аэропортов;
- расстояние от газо- и нефтепроводов;
- расстояние от линий электропередач;
- расстояние от автомобильных и железнодорожных магистралей;
- расстояние до культурных достопримечательностей;
- расстояние до источника отходов;
- возможность использования местных строительных материалов (суглинков) для обустройства полигона;
- размер предлагаемой площадки.

Геологические факторы:

- тип инженерно-геологического строения;
- защищенность подземных вод;
- глубина залегания грунтовых вод;
- уклон поверхности;
- наличие геологических разломов, зон трещиноватости;
- азимут уклона поверхности;
- абсолютные высоты поверхности;
- сейсмическая активность.

Экологические факторы:

- возможность загрязнения воздуха в жилой застройке вблизи полигона ТКО;
- степень заболоченности территории;
- наличие участков с выходами грунтовых вод в виде ключей;
- типизация растительного покрова (зоны распространения ценных пород деревьев и т. п.);
- расстояние до водоохранных зон водозаборов, минеральных источников, крупных водоемов, водотоков;
- сведения об интенсивности, испаряемости, площади водосбора атмосферных осадков;
- типизация землепользования.

В зависимости от специфики фактора его критериальные значения могут быть заданы в номинальной, ранговой или числовой шкале. Для наиболее важных факторов могут быть заданы пороговые значения, запрещающие строительство полигонов хранения ТКО в соответствующих зонах. Перечень факторов и пороговые значения могут задаваться государственным законодательством, отраслевыми стандартами, строительными нормами и правилами (СНИП), постановлениями местных органов власти, а также техническим заданием на выбор площадки для полигона ТКО.

Подробно критериальные условия для выбора площадок полигонов ТКО проанализированы в монографии Я.И. Вайсмана и др. (Вайсман и др., 2012). Все критерии авторы объединяют в следующие группы: градостроительные, ландшафтно-топографические, климатические, геологические, гидрогеологические, гидрологические, транспортные, ресурсно-экологические, санитарно-гигиенические. Для каждого фактора должен быть составлен тематический слой кар-

ты обследуемого региона, показывающий распространение различных значений этого фактора (критерия). Источниками информации могут быть выборки из топографических и тематических карт; результаты анализа топографических карт (расчеты по цифровой модели рельефа, построение буферных зон объектов и т. п.); результаты географического анализа тематических (геологических, геоморфологических и других карт); результаты специальных исследований (расчеты распространения загрязнений в различных средах). Для наиболее важных факторов могут быть заданы пороговые значения, запрещающие строительство полигонов хранения ТКО в соответствующих зонах. На тематических слоях факторов зоны, не относящихся к прямым запретам, целесообразно ранжировать в соответствии со степенью благоприятности выбора (например, по удаленности от поселений или водоемов). После составления тематических слоев карт каждого используемого фактора из всего района, в котором осуществляется подбор участка, удаляются зоны, запрещенные по какому-либо фактору, и дальнейший анализ проводится для оставшейся области. Выбор участков для размещения объектов обращения ТКО осуществляется на основании существующих санитарных правил, которые устанавливают ограничения и запреты на территории размещения полигонов в зависимости от удаленности от населенных пунктов и водных объектов, особенностей рельефа и геолого-гидрогеологических условий. Последовательное наложение ограничений позволяет оконтурить оставшиеся после исключения из рассмотрения участки.

Большое количество граничных условий, накладывающих ограничения на размещение объектов захоронения от-

ходов, увеличивает вероятность появления ошибок при проведении этапа выбора площадки под полигон ТКО. Для решения многофакторной задачи определения географического места размещения объекта, удовлетворяющего ряду граничных условий, а затем выбора оптимального варианта по широкому спектру критериев используются алгоритм и процедура выбора мест размещения полигона путем наложения информационных слоев карты с использованием ГИС (рис. 3.1.1).

На этом этапе производится выбор критерия благоприятности места размещения полигонов хранения ТКО и составление синтетической карты на его основе. Исходная информация – зональные тематические слои факторов. Задача осложняется значительными различиями в содержании факторов и столкновением интересов большого числа служб, принимающих участие в принятии решения.

Для принятия корректного решения согласно этой методике необходимо формирование коллектива экспертов и обеспечение его взаимодействия с ГИС-специалистами. Следует отметить, что не существует универсального решения поставленной задачи. Набор факторов (критериев) и их итоговые веса формируются в каждом случае в соответствии с местными особенностями, окончательное решение по которым остается за структурами, принимающими решения.

Одним из популярных методов согласования мнений экспертов является метод анализа иерархий (Analytic Hierarchy Process, АНП) Т. Саати (Saati, 1990; 2001; 2008; Саати, 1993), который уже более 30 лет широко применяется в самых различных областях, хорошо зарекомендовал себя во многих странах мира, доказав высокую эффективность в нахождении разумного решения. Для оценки факторов при-

меняется метод балльных оценок, которые назначаются по некоторой математической процедуре согласования мнений нескольких экспертов. АНР делит проблему принятия решения на понятные части, каждая из которых анализируется отдельно и логически интегрируется в общую схему. Веса критериев (подкритериев) определяются с помощью

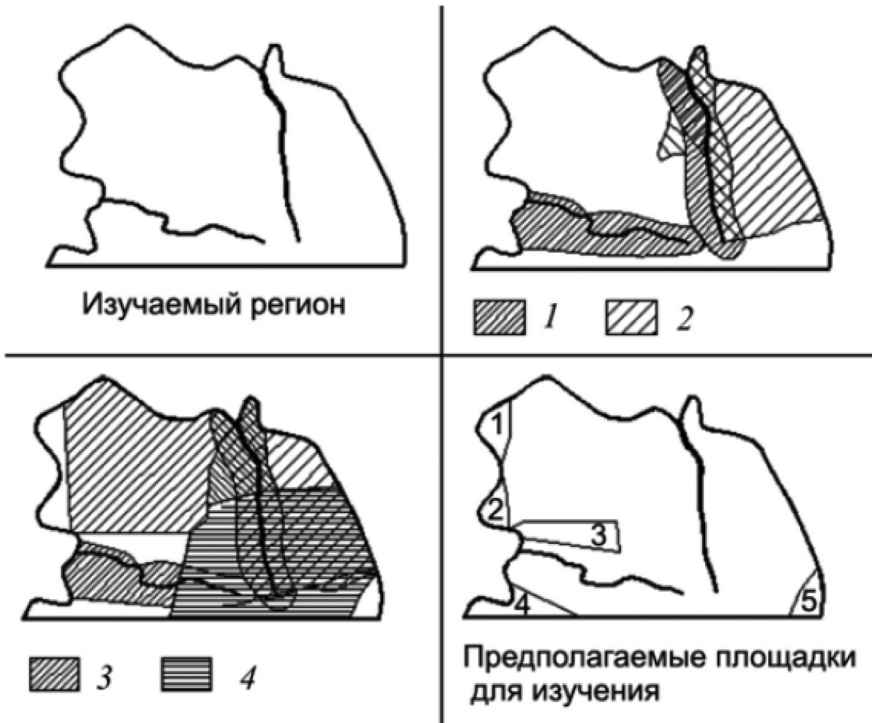


Рис. 3.1.1. Процесс последовательного исключения рассматриваемых участков с помощью наложения информационных слоев карты: 1 — исключение затопляемых районов; 2 — исключение уникальной среды обитания; 3 — исключение лесов; 4 — исключение парков (Вайсман и др., 2012)

матриц попарных сравнений. В такой матрице каждому критерию по сравнению с другим присваивается число, которое представляет собой условную оценку его относительной важности (предпочтительности), или «во сколько раз» этот элемент является более важным, чем другой. По построенной таким образом матрице попарных сравнений вычисляется ее главный собственный вектор, который представляет собой вектор приоритетов (весов) критериев, обобщающий выполненные попарные сравнения². Таким образом, многокритериальный метод анализа иерархий (АНР) разлагает сложную задачу на более простые, сводит комплексную многофакторную проблему к последовательности парных сравнений, которые выявляют вклад разных факторов и их веса, а затем синтезируются в матрицу взаимодействия.

Подробный обзор математических методов, применяемых для выбора мест оптимального размещения объектов ТКО сделан Т.Ю. Югановой (Юганова, 2019). Она отмечает, что наряду с методом анализа иерархий Т. Саати применяется также более сложный анализ сетей (Analytic Network Process, ANP), включающих взаимодействия элементов разных уровней структуры. Другие многокритериальные методы проще в применении и могут использоваться совместно с технологиями Т. Саати, дополняя их (Юганова, 2019).

² При заполнении матрицы используются интуитивные суждения ЛПР, поэтому вполне возможна ситуация, когда i предпочтительнее j в m раз, j лучше k в n раз, но i лучше k не в mn раз, тем более что предпочтительность ограничена числом 9. Поэтому вместе с собственным вектором рассчитывается так называемое отношение согласованности (CR), которое не должно превышать 0.1. В противном случае матрица считается несогласованной и должна быть пересмотрена. Например, следует устранить прямые противоречия, когда в указанной выше ситуации i не лучше k .

В литературе упоминаются более сложные модификации методов АНР и ANP. Так, нечеткий АНР {fuzzy АНР} позволяет лучше представить плохо определенную и содержащую помехи зашумленную информацию, размытые границы (Saaty, Tran, 2010). Такие примеры задач выбора участка для свалки представлены в (Fazlollahtabar et al., 2010; Kaoutar and Lahcen 2012; Russo and Camanho, 2015). Наряду и совместно с АНР применяется также метод TOPSIS, упорядочивающий альтернативы на основе «близости» к идеальному и «удаленности» от наихудшего решения (Hwang and Yoon, 1981; Tzeng and Huang, 2011). Он обычно применяется для ранжирования вариантов, предварительно отобранных с помощью АНР (Kharatetal, 2016). Похожий метод VIKOR (Tzeng and Huang, 2011) использует другую метрику близости. Метод ELECTRE (Tzeng and Huang, 2011) не оценивает альтернативы количественно, а только упорядочивает их, но он проще для лиц, принимающих решения, и хорошо подходит для группового принятия решений (Norese, 2006). Подход PROMETHEE (Tzeng and Huang, 2011) может дополнить АНР и ELECTRE, обеспечивая визуализацию многокритериальной задачи и выявление схожих по своей эффективности альтернатив. Методика достаточно проста в использовании и требует минимального набора дополнительных знаний для оценки альтернатив. PROMETHEE позволяет получить более устойчивые решения по сравнению с ELECTRE. Особо стоит отметить подход DEMATEL (Falatoonitoosi et al., 2013), посредством которого можно выявлять, сопоставлять и наглядно изображать причинно-следственные связи между элементами сети, например, между опасными природными процессами (Кулыгин, 2017). Тем не менее фундамен-

ные методы АНР и АНР остаются наиболее тонким и универсальным инструментом МСА для сложных задач (Юганова, 2019).

Таким образом, несмотря на то, что ни один метод не даст универсального решения поставленной задачи, и окончательный выбор остается за структурами, принимающими решение, современные ГИС-технологии обеспечивают поддержку расчетов и оценок разных вариантов выбора площадки, значительно сокращают время работ, обеспечивают базу цифровых данных для долгосрочного мониторинга площадки.

Необходимо отметить, что многокритериальные методы выбора оптимального расположения полигонов ТКО с использованием ГИС уже активно применяются за рубежом, в том числе в развивающихся странах Азиатско-Тихоокеанского региона в последнее десятилетие (Ghobadi et al., 2017; Khan, Samadder, 2014; Kharat et al., 2016; Kontos et al., 2005; Maguiri Abdelhakim, 2016; Mondelli et al., 2007).

3.1.4. Учет инженерно-геологических условий в электронной модели территориальной схемы обращения с ТКО

В России геологические и геоэкологические исследования для целей обращения с ТКО на региональном уровне, т.е. для отдельных субъектов Российской Федерации (РФ), в основном имеют своей целью совершенствование *территориальных схем обращения с отходами*. В состав территориальных схем большинства областей РФ входит электронная модель, под которой понимается «*информационная система, включающая в себя базы данных, программное и техническое*

обеспечение, предназначенные для ввода, хранения, актуализации, обработки, анализа, представления, визуализации данных о системе организации и осуществления на территории субъекта РФ деятельности по накоплению (в том числе раздельному накоплению), сбору, транспортированию, обработке, утилизации, обезвреживанию, размещению отходов, образующихся на территории субъекта РФ, и (или) отходов, поступающих из других субъектов РФ» (Постановление Правительства РФ от 22 сентября 2018 г. № 1130..., 2018).

Электронная модель территориальной схемы включает, как правило, пространственную информацию о расположении источников отходов; местах сбора и накопления отходов; количестве образующихся отходов; целевых показателях по утилизации; схемах потоков отходов и прочее. Вся информация представлена в виде пространственно привязанных точечных данных или различного рода карт-схем. Каких-либо характеристик природных условий территории области электронная модель не содержит (Территориальная схема обращения с отходами МО, 2018). Тем более она не содержит никаких карт и карт-схем геологического содержания. По всей видимости, это обусловлено сложностью формализации геологической информации и представления ее для понимания неспециалистами.

Таким образом, в территориальных схемах обращения с ТКО субъектов РФ геологическая среда практически никак не охарактеризована, и органы, принимающие решения по оценке экологической ситуации в регионе, лишены возможности получить представление о том, насколько велико негативное влияние существующих объектов ТКО на геологическую среду.

Размещение новых полигонов захоронения отходов тоже происходит без учета особенностей геологической среды. Фактически сведения об инженерно-геологической обстановке на участке предполагаемого полигона могут быть получены только на стадии изысканий, когда место размещения полигона уже выбрано. Конечно, существуют геологические и инженерно-геологические карты территорий субъектов РФ, и они, безусловно, так или иначе анализируются при обращении с ТКО, но воздействие отходов на геологическую среду имеет специфические особенности и для его учета требуется проведение специального инженерно-геологического районирования территорий в разных масштабах для разных уровней исследования (Осипов, Галицкая, Заиканов, 2022). К сожалению, инженерно-геологические условия — один из критериев, который на практике учитывается в самую последнюю очередь. В приоритете стоит удаленность от населенных пунктов, поверхностных водоемов, особо охраняемых природных территорий. Деградация геологической среды, безусловно, происходит значительно медленнее, чем изменения поверхностных объектов. В то же время геологическая среда (горные породы и подземные воды) способна накапливать вредные компоненты в течение длительного времени, создавая тем самым предпосылки экологической катастрофы для будущих поколений. Недооценивая сейчас опасность изменения геологической среды при размещении отходов, мы создаем угрозу экологической безопасности будущего.

Оценка природной защищенности (барьерных свойств) геологической среды должна стать неотъемлемой частью территориальных схем обращения с отходами субъектов Российской Федерации. Она должна создаваться по много-

критериальному принципу на базе специальной геоинформационной системы, включающей всестороннюю характеристику природных условий территории и технологию их анализа для целей обращения с ТКО (рис. 3.1.2).

Общая структура ГИС «Отходы»
Информация – карты, точечные данные
Технология работы с информацией
Программные средства
Методология анализа и оценки информации по многокритериальному принципу
Методология прогнозирования рисков

Рис. 3.1.2. Структура геоинформационной системы в территориальной схеме обращения с ТКО

ГИС «Отходы» позволяет с помощью специально разработанной технологии и программных средств переходить от фактической информации к научно обоснованному принятию оптимальных управленческих решений. Оценка защищенности геологической среды (ее барьерных свойств) непременно должна входить в состав этой ГИС в виде специального информационного блока (рис. 3.1.3), содержащего характеристики природной среды территории, их оценку применительно к проблеме обращения с ТКО, анализ

взаимодействия объектов ТКО с компонентами природной среды и прочее.

Такая геоинформационная система позволит оценить геоэкологические условия существующих объектов ТКО с учетом геохимических процессов в свалочных телах и изолирующих свойств пород, подстилающих эти тела, а значит, покажет уровень геоэкологической безопасности на территории области. Органы областного управления получают возможность контролировать ситуацию с отходами, оперативно реагировать на негативные проявления природных и природно-техногенных процессов, выбирать и своевременно

**Природная защищенность геологической среды:
создание цифровой информационной платформы для обеспечения
безопасного размещения, эксплуатации и консервации объектов ТКО**

1. Сбор и анализ исходных данных, в том числе фондовых материалов скважин, карт средних и крупных масштабов, натурных наблюдений и др.
2. Типизация ландшафтно-геоморфологических и геолого-гидрогеологических условий территории с позиции оптимального размещения отходов.
3. Разработка параметров и критериев изолирующих свойств пород.
4. Характеристика геохимических процессов в свалочных телах, образующегося фильтрата и его воздействия на геологическую среду.
5. Оценка степени защищенности геологической среды.
6. Разработка структуры цифровой информационной платформы и наполнение её базовыми информационными разнородными данными для формирования комплекта оригинальных тематических информационных слоев (карт).
7. Разработка алгоритма формирования интегрального оценочного слоя (карты) районирования территории по степени защищенности геологической среды.
8. Интегральный геоинформационный анализ существующих полигонов ТКО и карты районирования территории по степени защищенности геологической среды.
9. Рекомендации для принятия управленческих решений с целью минимизации геологического риска.

Рис. 3.1.3. Информационный блок в ГИС «Отходы», характеризующий природную защищенность геологической среды

использовать мероприятия для минимизации риска загрязнения геологической среды на объектах ТКО.

Такой подход к разработке территориальных схем позволит проводить выбор мест размещения отходов и оценку уже существующих объектов ТКО с позиций геоэкологической безопасности. Он существенно облегчит принятие управленческих решений, сделает доступной информацию о состоянии природной среды территории, а значит снизит социальную напряженность и обеспечит оптимальное решение проблемы обращения с отходами на территории субъектов РФ.

Одним из важнейших этапов создания электронной модели территориальной схемы размещения отходов является инженерно-геологическая типизация геологических условий и районирование территории, выполненные на основе принципов оценки естественной защищенности геологической среды от загрязнения. Такие карты, включенные в электронную модель, должны быть понятны как представителям органов, принимающих решения, так и населению. Только в этом случае можно добиться того, чтобы геологические условия учитывались при оценке ситуации на участках уже существующих объектов ТКО и планировании размещения новых.

В последующих главах рассмотрим принципы и методологические основы типизации и районирования природных условий территорий для размещения объектов ТКО применительно к различным уровням исследования — от предварительной оценки на федеральном уровне до сравнительной характеристики перспективных инженерно-геологических массивов на локальном уровне исследований.

Глава 3.2. Методологические основы оценки геоэкологических и социально-экономических условий размещения полигонов для субъектов РФ на федеральном уровне

(В.Г. Заиканов, Т.Б. Минакова, Е.В. Булдакова)

Согласно национальным приоритетам развития государства, к 2030 г. в стране планируется обеспечить сортировку 100% отходов и снизить объем их захоронения в 2 раза, увеличив при этом на 50% долю утилизируемых отходов. Кроме того, ожидается, что захоронению подлежат отходы, прошедшие предварительную сортировку. Несмотря на реализацию федеральных проектов «Комплексная система обращения с твердыми коммунальными отходами»³ в рамках Государственной программы «Охрана окружающей среды»⁴ и Национального проекта «Экология»⁵, обойтись без захоронения отходов пока не удастся. В настоящее время в России до 94% отходов подвергается захоронению именно на полигонах.

Под захоронением отходов понимается изоляция отходов, не подлежащих дальнейшей утилизации, в специаль-

³ Комплексная система обращения с твердыми коммунальными отходами. https://www.mnr.gov.ru/activity/np_ecology/federalnyy-proekt-kompleksnaya-sistema-obrashcheniya-s-tyverdyimi-kommunalnymi-otkhodami

⁴ Государственная программа Российской Федерации «Охрана окружающей среды» (утв. Постановлением Правительства РФ от 15.04.2014 №326). <https://base.garant.ru/70643488/>

⁵ Национальный проект «Экология» [Электронный ресурс] // Национальные проекты России. URL: <https://национальныепроекты.рф/projects/ekologiya> (дата обращения: 12.11.2023).

ных хранилищах⁶. Полигон твердых коммунальных отходов (ТКО) рассматривается нами как комплекс тщательно спроектированных природоохранных сооружений, предназначенных для централизованного размещения отходов, предварительно прошедших сортировку, предотвращающих попадание вредных веществ в окружающую среду. Выбор территории для оптимального размещения полигонов ТКО зависит от объемов и состава самих отходов, определяемых численностью городского населения, соответствием природных условий нормативным требованиям, соблюдением природоохранных технологий при строительстве и эксплуатации полигонов. Кроме того, согласно требованиям СП 320.1325800.2017 «Полигоны для твёрдых коммунальных отходов — проектирование, эксплуатация и рекультивация», полигон ТКО должен располагаться на площадке, основанием которой являются глины или тяжелые суглинки, либо проектом предусмотрено водонепроницаемое основание (СП 320.1325800.2017, 2022).

Разработка методического подхода к оценке территории субъектов РФ для научно обоснованного размещения полигонов ТКО с учетом природных и социально-экономических условий регионов является первоочередной задачей. Для этого необходимо на первом этапе провести интегральную оценку территории субъектов РФ для оптимального размещения полигонов ТКО. В этих целях предлагается

⁶ Федеральный закон от 24.06.1998 г. № 89-ФЗ (ред. от 04.08.2023) Об отходах производства и потребления (с изм. и доп. вступ. в силу с 01.10.2023) «Об отходах производства и потребления» [Электронный ресурс] // URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_19109/ (дата обращения: 14.11.2023).

использовать *Индекс благоприятности размещения полигонов ТКО*, выраженный в баллах, который по единой методике рассчитывается индивидуально для каждого субъекта РФ.

3.2.1. Проблемы размещения полигонов ТКО

Оценка регионов РФ по геоэкологической благоприятности размещения полигонов ТКО является многоступенчатым процессом и определяется не только природными факторами, но и социально-экономическими условиями.

Выбор конкретного участка строительства объектов размещения отходов должен в первую очередь осуществляться на основе специальных (геологических, гидрологических и иных) исследований (в ред. Федерального закона от 30.12.2008 № 309-ФЗ), нацеленных на выявление и оценку геоэкологических (природных) ограничений для размещения полигонов ТКО (Федеральный закон № 309 от 30.12.2008). В то же время Единые требования к объектам обработки, утилизации, обезвреживания, размещения твердых коммунальных отходов⁷, действующие с 1.01.2021 г. и до 1.01.2027 г., указывают на необходимость при выборе места расположения таких объектов опираться на схемы потоков ТКО в соответствии с территориальной схемой обращения с отходами в целях обеспечения максимальной экономической эффективности их функционирования. Кроме того, размещение объектов переработки и захоронения ТКО в це-

⁷ Постановление Правительства РФ от 12.10.2020 № 1657 «Единые требования к объектам обработки, утилизации, обезвреживания, размещения твердых коммунальных отходов» [Электронный ресурс] // URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_365180/ (дата обращения: 12.11.2023).

лях обеспечения эффективности транспортировки мусора должно осуществляться недалеко от источника их возникновения — населенных пунктов, и при условии обязательного проведения в полном объеме мероприятий по охране окружающей среды.

Законодательно запрещается захоронение отходов в границах населенных пунктов, лесопарковых, курортных, лечебно-оздоровительных, рекреационных зон, а также водохранных зон, на водосборных площадях подземных водных объектов, которые используются в целях питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения. Кроме того, запрет распространяется на участки залегания полезных ископаемых и ведения горных работ в случаях, если возникает угроза загрязнения территории и безопасности ведения горных работ (в ред. Федерального закона от 08.11.2008 № 196-ФЗ).

Проектирование любого полигона отходов должно начинаться с выбора места под его размещение. Как правило, перед началом проектных работ заказчик уже самостоятельно выбирает место для размещения полигона, однако совсем не факт, что оно соответствует требованиям законодательства и требованиям геоэкологической безопасности территории. Если пропустить этот момент до начала проектирования, то есть вероятность, что проект будет привязан к месту, где создание полигона ТКО не допускается. Исправить это на поздних стадиях проектирования уже невозможно, потребуются повторные инженерные изыскания, запрос предварительных материалов, оценка воздействия на окружающую среду. Из практики проектирования ни один полигон не размещался там, где это предполагалось территориальными схемами обращения с ТКО. Это риск, заложенный в проект

изначально. Менять схему территориального планирования для небольшого полигона никто не будет, так что это требование остаётся «миной», подложенной почти под любой проект полигона с государственным или муниципальным финансированием изначально. Кроме того, в схемах недостаточно учитываются социально-психологические факторы размещения подобных неприятных для населения объектов. Выбор места размещения полигона является ключевым моментом при разработке схемы обращения с отходами, и поэтому необходимо научно-практическое комплексное его обоснование.

Таким образом, в настоящее время в нормативно-законодательной базе существует достаточно много как природных, так и социально-экономических ограничений для размещения полигонов ТКО. Для планирования размещения подобных объектов в масштабах страны, в частности, с целью регулирования инвестиционных потоков, возникает еще дополнительная проблема — совмещение оценок геоэкологических ограничений с социально-экономическими в силу несовпадения границ природной пространственной дифференциации территории РФ с политико-административным делением, в соответствии с которым выделяются зоны деятельности региональных операторов в области обращения с ТКО и в соответствии с которым собирается и накапливается вся социально-экономическая информация о регионах, в том числе и об объемах и составе ТКО. Поэтому задача интегральной оценки территории для размещения полигонов ТКО на уровне субъектов РФ — многоступенчатая, и решается она в несколько этапов.

3.2.2. Методика оценки благоприятности территорий субъектов РФ для размещения полигонов ТКО

На первом этапе исследования выявлялись природные особенности территории России. В качестве базового источника информации о природной дифференциации территории РФ было выбрана Карта физико-географического районирования России масштаб 1:15 000 000 (2004 г.). Учитывались ее комплексность, детальность и обоснованность выделенных территориальных единиц. Оцениваемой единицей районирования принята территория ранга физико-географическая область. Согласно районированию, в пределах территории России насчитывается 71 физико-географическая область. Природная неоднородность в значительной степени определяет и неоднородность геоэкологических условий, развитие экзогенных и эндогенных процессов в пределах физико-географических областей. В качестве критерия выбора вида геоэкологического процесса и условий принимается максимальная площадь их распространения в пределах конкретной физико-географической области.

Исключение составляет сейсмическая опасность. При интенсивности сейсмических воздействий (фоновой сейсмичности) более 6 баллов считалось, что воздействие в зависимости от силы землетрясения и местоположения его эпицентра распространяется на площадь региона.

Оценка рельефа каждой физико-географической области проводилась по двум типам: горному и равнинному, причем в расчетах учитывался преобладающий по площади тип. В нескольких областях процентное соотношение горного и равнинного типов рельефа оказывалось примерно равным. В этих случаях учитывались оба типа рельефа. Критерий оценки горного рельефа — средняя крутизна поверхности

рельефа, а равнинного — густота расчленения территории эрозионной сетью.

К экзогенным геологическим процессам (ЭГП), оказывающим негативное влияние на участок размещения полигона отходов, были отнесены: суффозионно-карстовые, заболачивание и затопление (сезонное и периодическое). Также учитывались территории, имеющие в геологическом разрезе близкое залегание к поверхности регионального водоупора, сложенного глинистыми и суглинистыми отложениями. В качестве примеров можно привести региональный водоупор юрских глин для лесной зоны Европейской части России или сплошное распространение многолетнемерзлых пород, являющихся тоже мощным водоупором. Следует отметить также появившийся и активно развивающийся процесс опустынивания и сопутствующий ему процесс засоления почв. Однако последний имеет широкое распространение только в отдельных регионах.

Объекты размещения ТКО, расположенные на территориях с высоким уровнем подземных вод, должны быть спроектированы и сооружены таким образом, чтобы расстояние от нижнего уровня размещаемых отходов до уровня вод составляло не менее 2 м (п. 25 Постановления Правительства РФ).

В зависимости от сочетания характерных для каждой физико-географической области геоэкологических условий и процессов проводилась балльная оценка их благоприятности для размещения полигонов ТКО (чем ниже оценка геоэкологических ограничений, тем условия более благоприятны). Её основой стали нормативные документы (см. сноски 4, 5) с соответствующими требованиями к объектам ТКО, экспертная оценка приоритетности геоэкологических факторов применительно к каждой территории, а также на-

копленный практический опыт, полученный при изучении модельных объектов полигонов ТКО. Баллы приоритетности корректировались экономическими показателями, например, удорожание строительства полигона при наличии ограничивающего фактора, природных условий в районе строительства и др.

В итоге взвешенные баллы с учетом площади распространения геоэкологических ограничений в пределах физико-географических областей отражают оценку их природной благоприятности для размещения полигонов ТКО. Такой подход обеспечил большую дифференциацию оценочного показателя (O_j) физико-географических областей, определяемого по выражению:

$$O_j = \sum_{i=1}^n V_{ij} S_{ij}, \quad (1)$$

где j – физико-географическая область; i – вид геоэкологических условий и процессов; V_{ij} – балл оценки i вида геоэкологических условий и процессов в j -той физико-географической области S_{ij} ; S_{ij} – доля площади распространения i -го вида геоэкологических условий и процессов от площади j -й физико-географической области.

Поскольку отдельные участки территории субъектов могут оказаться в разных физико-географических областях, следует рассматривать их отдельно как в отношении учета природной благоприятности, так и социально-экономических условий. Последние связаны с ожидаемыми годовыми объемами отходов, определяемыми по нормативам⁸, чис-

⁸ СП 502.1325800.2021. Инженерно-экологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ. <https://minstroyrf.gov.ru/upload/iblock/448/SP-502.pdf>.

ленностью городского населения, количеством городов, их размещением относительно друг друга и границ физико-географических областей и с другими особенностями таких территорий.

Перенос результатов средневзвешенной балльной оценки природной благоприятности соответствующей физико-географической области на территорию субъекта осуществляется традиционным способом с учетом доли ее площади в общей площади субъекта. В итоге *Индекс геоэкологической благоприятности* размещения полигонов ТКО на территории субъекта (O_m) определяется по выражению:

$$O_m = \sum_{i=1}^n O_j S_{jm} kl_{jm}, \quad (2)$$

где m — территория субъекта; S_{jm} — доля площади m -го субъекта в j -й физико-географической области; kl_{jm} — корректирующий коэффициент нормативных объемов отходов, определяемый в зависимости от распределения населения в пределах участка субъекта в j -й физико-географической области и расчетных площадей для их размещения.

Таким образом, в предлагаемом подходе учитываются не только структура площадей с различными значениями оценки геоэкологических ограничений, но и размещение, и характеристики городов и других населенных пунктов каждого субъекта — основных источников накопления ТКО. При этом наименьшее значение индекса соответствует большей благоприятности территории.

Поэтапный подход к оценке благоприятности территории субъектов для размещения полигонов ТКО представлен

на примере Республики Башкортостан и Иркутской области, существенно различающихся, как по природным, так и по социально-экономическим условиям, учитываемым при обосновании размещения полигонов ТКО.

3.2.3. Оценка благоприятности территории модельных регионов для размещения полигонов ТКО

Республика Башкортостан относится к Приволжскому федеральному округу. По площади регион занимает 27-е место в России. Территория республики достаточно освоена в хозяйственном отношении, плотность населения составляет 28,4 чел./км² при средней по России 8,3 чел./км². В городах проживает 49,4% населения республики; наиболее крупные из 21 города – Уфа, Стерлитамак, Салават, Нефтекамск, Октябрьский.

Развитие отраслей промышленности, таких как горнодобывающая, нефтедобывающая, нефтеперерабатывающая, нефтехимическая, химическая и электроэнергетическая, сказывается на постоянном изменении состояния природных компонентов, включая и геологическую среду.

Выбор данной модельной территории определяется ее расположением в центральной части РФ, разнообразием природных условий и интенсивным развитием экономики. Кроме того, Башкортостан является одним из лидеров в плане обращения с ТКО. Здесь с 2010 г. ведется кадастр отходов производства и потребления, а в 2021 г. на территории республики внедрена автоматизированная система мониторинга вывоза ТКО «ТКО-Башкортостан», позволяющая в режиме реального времени отслеживать качество и своевременность оказываемой региональными операторами услуги.

Местоположение республики на стыке Европы и Азии в переходной полосе от Восточно-Европейской равнины к Уральским горам и далее на восток к Западно-Сибирской равнине определяет многообразие природных условий и ресурсов. Территория охватывает несколько существенно различающихся по геологическому строению зон, каждой из которых соответствует свой набор полезных ископаемых (Пучков, 2010). На территории Республики Башкортостан известно более 3 тыс. месторождений шестидесяти видов минерального сырья. Более 40% площади республики занимают леса.

В настоящее время на территории Республики Башкортостан функционирует 229 особо охраняемых природных территорий (ООПТ), одна из которых является участником пилотного проекта⁹ Минприроды России по раздельному сбору отходов на территории ООПТ. Проект призван помочь ООПТ внедрить современные и экологичные системы обращения с твердыми коммунальными отходами.

К основным геоэкологическим ограничениям размещения полигонов ТКО в отдельных районах степной зоны относится отсутствие водоупорных пород, а в горной части республики есть опасность в сейсмическом плане, а также возможно проявление карстовых процессов. Кроме того, на территории республики распространены экзогенные геологические процессы (ЭГП), характерные как для равнинных, так и для горных областей, что обусловлено своеобразным ее расположением, территориально охватывающим равнинное и возвышенное Предуралье, горную часть Южного Урала и

⁹ Руководство по обращению с отходами ООПТ. URL: <https://asi.ru/library/ecotourism/117740/>

равнинное Зауралье. Наиболее распространенными и опасными ЭГП в отношении воздействия на хозяйственные объекты и населенные пункты являются: эрозионные, карстовые и карстово-суффозионные и оползневые процессы.

Речная (площадная и боковая) и овражная эрозии воздействуют на всей территории, но наиболее развиты в западной части республики. Основное негативное воздействие в результате активности овражной эрозии — вывод сельскохозяйственных земель различного назначения из использования и сокращение полезных площадей территории поселений. Карстовый и карстово-суффозионный процессы имеют большое распространение: около 50% ее территории, почти 30% площади поражено поверхностными карстопроявлениями. Наибольшая интенсивность развития этих процессов отмечается в восточной части Предуралья. Ежегодно на территории республики фиксируется образование новых провалов. В настоящее время более активное проявление карстовых процессов отмечено в центральных районах республики.

Естественный оползневой процесс в пределах Башкирии получил наибольшее развитие в Предуралье, но он более активен на объектах строительства, возводимых в местах искусственной подрезки склонов, на участках, не оборудованных водоотводными канавами.

За активностью опасных процессов ведутся регулярные наблюдения отделением мониторинга по Республике Башкортостан филиала ПРЦГМСН ФГБУ «Гидроспецгеология».

Города и другие населенные пункты — основной источник образования ТКО, поэтому выбор варианта размещения полигонов ТКО зависит не только от геоэкологических ограничений, но и от условий расселения. Распространение

городских поселений по территории республики неравномерно, большая часть их сосредоточена в центральной, равнинной части.

Именно эти две группы факторов — геоэкологические ограничения и характер расселения населения служили основой для оценки благоприятности территории субъекта для размещения полигонов ТКО. Разнообразие геологических условий и характер распространения ЭГП наряду с социально-экономическими ограничениями обусловили существенные различия в геоэкологических оценках, изменяющихся от 3,5 до 9,5 баллов.

Иркутская область находится в юго-восточной части Сибирского федерального округа и по площади занимает шестое место в России. Основная часть территории области имеет плоскогорный рельеф с незначительным уклоном к северу и северо-западу. Территория области охватывает юг Среднесибирского плоскогорья и бассейны верхних течений рек Ангары, Лены и Нижней Тунгуски. На юго-западе в ее пределы вклиниваются горные массивы Восточного Саяна, на востоке — Приморский и Байкальский хребты, Становое и Патомское нагорья. Последнее представляет собой древнюю возвышенность, покрытую тайгой и заболоченными речными долинами. Особенностью территории является высокая сейсмичность, которая должна учитываться при возведении промышленных и гражданских сооружений, что ведет к удорожанию строительно-монтажных работ. Северная и северо-восточная части территории характеризуются повсеместным распространением многолетнемерзлых пород, отдельные участки которых встречаются и в южных районах области. Таким образом, для данной территории

приоритетными геоэкологическими ограничениями являются по площади — горный рельеф, а по опасности — проявление сейсмической опасности и наличие мерзлых толщ горных пород.

Для Иркутской области характерно неравномерное размещение населения. Территория богата минеральными ресурсами. Разрабатываются три месторождения угля, известны три золотопромышленных района. Область обладает значительными запасами редких металлов: ниобия (65% общероссийских запасов), тантала (45%), лития (50%), рубидия, цезия, бериллия и др.

Исторически плотное заселение долины р.Ангара было связано с добычей и обработкой полезных ископаемых. Заселение Патомского нагорья связано с многочисленными месторождениями россыпного и рудного золота, а Лено-Ангарского плато в центральной части области — со строительством БАМа (Бояркин, Бояркин, 2011).

Для сравнения природных и социально-экономических особенностей рассматриваемых субъектов основные их характеристики приведены в табл. 3.2.1.

Таблица 3.2.1

Основные показатели природных и социально-экономических особенностей Республики Башкортостан и Иркутской области

Показатели	Республика Башкортостан	Иркутская область
1	2	3
Общая площадь, км ²	143 600	774 846
Физико-географические области в пределах субъектов РФ (номера см. на рис. 3.2.1; 3.2.2)	8 — лесная 9 — лесостепная 10 — степная 17 — южно-уральская	31 — таежная 33 — островная лесостепь 36 — саянская 38 — байкальская 40 — северо-байкальская

Продолжение табл. 3.2.1

1	2	3
Основные геоэкологические ограничения	6 видов; из них приоритетные: сложный рельеф и отсутствие водоупора	5 видов; из них приоритетные: сложный рельеф и сейсмическая опасность
Численность всего населения субъекта, тыс. чел.	4077.6	2344.0
Количество ГО, городов и поселков городского типа (пгт)	9 ГО, 12 городов, 2 пгт	10 ГО, 12 городов, 44 пгт и рабочих поселков
Численность городского населения, тыс. чел.	2542.4	1817.2
Доля городского населения, учтенного в расчетах, %	99.8	98.8
Доля городского населения от общего населения субъекта, %	62.4	77.5
Доля городских земель от площади субъекта, %	1.8	0.3
Средняя плотность городского населения в субъекте/городах, чел./км ²	17.8/892.8	2.3/726.6
Плотность автомобильных дорог с твердым покрытием общего пользования на 1000 км ²	323	33

Окончание табл. 3.2.1

1	2	3
Нормативный годовой объем образованного ТКО, тыс. т	497.3	394.0
Количество суще- ствующих мусорных полигонов/из них полигонов ТКО	33/19	25/22
Нормативная потребность в площадах для полигонов ТКО, га	337.0	401.5
Основные виды экономической деятельности, структура внутренне- го регионального продукта (ВРП)	Промышленный сектор, сфера торгов- ли, строительство и сельское хозяйство (по объему валовой продукции сельского хозяйства занимает 7-е место в РФ)	Добыча полезных ископае- мых (31%), обрабаты- вающие производства (11%), транспортировка и хране- ние (8%)
Доля ВРП субъекта от совокупного объема ВРП всех субъектов России	>1,7% (2021 г.)	1,6% (2021 г.)
Индекс социального благополучия*	2.99	2.91

*Индекс социального благополучия (I квартал 2022 г.). ТОП-35.
URL: <http://civilfund.ru/mat/143> (дата обращения: 21.11.2023).

При превышении площади Иркутской области над Баш-
кортостаном в 5 раз городское население здесь меньше в
1,4 раза. В этих субъектах преобладает городское население.
В Башкирии находится 4 города с населением, превышаю-
щих 100 тыс. человек, в Иркутской области – 3. Плотность

городского населения в Иркутской области почти в 8 раз ниже, чем в Башкортостане, что объясняется разницей в площадях субъектов и преобладанием малоплощадных поселков (средняя площадь городов и поселков 36,8 км²) при средней площади города в республике 106 км². Значения показателя плотности населения на городских землях по субъектам близки.

В соответствии с расселением городского населения распределяются нормативные годовые объемы отходов. По данным субъектам эти цифры соответствуют проценту городского населения в каждой физико-географической области. Так, в Башкортостане максимальный объем отходов образуется в пределах лесостепной области, а в Иркутской — в долине р. Ангары, где сосредоточено более 60% городского населения, и этот объем, как и число городских жителей, в 10 раз больше, чем на побережье оз. Байкал. Однако в летний сезон эта величина будет здесь больше за счет высокой рекреационной нагрузки.

Интересно отметить, что соотношение величин нормативных площадей полигонов (Сборник удельных показателей..., 1999) различается по этим двум районам только в 3 раза. Это подтверждается и расчетами в целом по субъектам, где соотношение величин потребности в площадях для полигонов отходов, рассчитанное по нормативам, обратное относительно общей численности населения в субъектах, что объясняется преобладанием более крупных по населению городов в Башкортостане и рассредоточением населения в малочисленных поселках Иркутской области.

Территория Башкортостана находится в пределах лесной, лесостепной, степной и горной южно-уральской физико-географических областей (рис. 3.2.1). Территория Иркутской

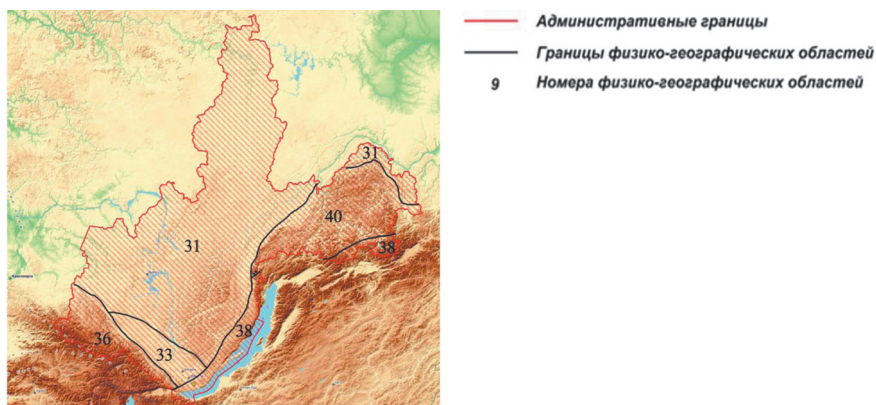


Рис. 3.2.2. Схема границ физико-географических областей Иркутской области (см. табл. 3.2.1)

Общая оценка благоприятности территории субъектов для размещения полигонов ТКО устанавливается с помощью коэффициента kl , отражающего социально-экономические особенности территории (см. формулу 2).

В итоге наилучшие условия оказались для городов лесной и степной областей Башкортостана с относительно низкой долей городского населения, хотя значения оценки геоэкологических ограничений в лесостепной области более чем в 2 раза ниже, чем в степной из-за отсутствия водоупора в последней. В Иркутской области более благоприятная ситуация характерна для поселков, расположенных в саянской и северо-Байкальской физико-географических областях.

Индекс благоприятности территории субъектов для размещения полигонов ТКО оценивается в баллах с учетом социально-экономических условий и изменяется от максимального значения к минимальному в Башкортостане в ~15 раз, в Иркутской области — в ~20 раз (см. табл. 3.2.2).

С учетом размещения населения, нормативными объемами отходов и площадями их размещения Индекс по субъектам существенно изменился, особенно в Иркутской области.

Таблица 3.2.2

**Примеры оценки благоприятности территорий субъектов
для размещения полигонов ТКО**

Физико- географическая область	Оценка геоэкологических ограничений в физико- географических областях, O_p, балл	Доля площади субъекта в j-физико-географической области, %	Плотность городского населения, чел./км²	Значения kl	Индивидуальная оценка геоэкологической и социально-экономической благоприятности размещения полигонов ТКО по физико-географическим областям в субъектах, O_m, балл
1	2	3	4	5	6
Республика Башкортостан					
8 – лесная	5.0	5	24.1	1.32	0.33
9 – лесостепная	3.5	40	31.3	1.56	2.19
10 – степная	9.5	5	16.0	1.10	0.53
17 – южно-уральская	8.5	50	1.9	1.19	5.06
Суммарные/ Средневзвешенные оценки	-/6.60	100/-	-/17.8		-/8.11
Иркутская область					
31 – таежная	13.5	60	1.1	1.03	8.38

Окончание табл. 3.2.2

1	2	3	4	5	6
33 — островная лесостепь	5.7	10	14.9	2.07	1.24
36 — саянская	6.5	8	0.01	1.00	0.50
38 — байкальская	5.0	7	2.1	1.20	0.42
40 — северо-байкальская	14.5	15	0.2	1.00	2.21
Суммарные/Средневзвешенные оценки	-/9.00	100/-	-/2.3		-/12.75

Анализ результатов показал, что зависимость между оценками благоприятности размещения ТКО с некоторыми показателями не выявлена. Так, значения плотности населения в рассматриваемых примерах существенно различаются даже при близких значениях долей городского населения и площадей. Не отмечается прямая зависимость Индекса благоприятности территорий для размещения полигонов ТКО с экспертной балльной оценкой геоэкологических ограничений в физико-географических областях. С одной стороны, это связано с высокой генерализацией учитываемых ограничений и большой дифференциацией распределения площадей субъекта в физико-географических областях, с другой — подчеркивает важность учета социально-экономических условий при выборе мест размещения полигонов ТКО.

Высокая корреляция отмечена между нормативными объемами ТКО в физико-географических областях и kl ($r = 0,81$), а также с показателями площадей, нормативно необходимых для размещения ТКО в физико-географических областях ($r = 0.95$).

В целом по Республике Башкортостан значения средневзвешенных оценок благоприятности размещения полигонов ниже полученных на первом этапе для физико-геогра-

фических областей. Несовпадение административных границ, по которым выделены зоны деятельности региональных операторов в области обращения с ТКО, с природными особенностями территории и неравномерностью распределения населения явились причинами получения одинаковых значений оценок для трех зон.

На основании более детального исследования проблемы ТКО на территории Республики Башкортостана можно сделать следующие выводы, характерные для многих субъектов.

Максимальные значения оценок характерны для 3-й зоны на юге, занимающей $\frac{1}{2}$ территории республики, на которой проживет 30% населения и находится наибольшее количество полигонов. Казалось, что здесь должен образовываться и максимальный нормативный годовой объем отходов, однако самой большой годовой объем ТКО от населения характерен для 1-й зоны в основном за счет г. Уфы. Если нормативный объем отходов напрямую зависит от численности населения, то это соотношение нарушается относительно планируемых объемов, например, последние практически равны для 1-й и 2-й (с 4 городами) зон. При относительно близкой численности населения 2-й и 4-й зон планируемые объемы различаются в них более чем в 2 раза. Таким образом, прямой связи между численностью населения и вместимостью полигонов не отмечается. Возможно, это связано со стратегией развития комплексных полигонов совместного складирования промышленных и коммунальных отходов и тенденции расширения существующих объектов.

Следует заметить, что доля расчетного объема ТКО населения составляет около 50% от планируемого их общего объема в Республике Башкортостан (Приказ от 11 мая 2021 года № 349п О внесении изменений в Приказ Минэкологии

РБ от 30.12.2019 № 1198п «Об утверждении территориальной схемы обращения с отходами, в том числе с твердыми коммунальными отходами, Республики Башкортостан»).

Планируемые к строительству объекты, как правило, комплексные: полигон твердых коммунальных и промышленных отходов с компостированием органических отходов (на территории Баймакского, Туймазинского и Белебеевского районов) или цеха по компостированию органических отходов и участия производства RDF-топлива и флексы (г. Ишимбай и в Благовещенском районе). Мусоросортировочный комплекс (МСК) в Октябрьском районе на 80 тыс. т отходов включает объекты компостирования ТКО, производства альтернативного топлива и захоронения «хвостов» ТКО, непригодных для дальнейшей утилизации. Комплекс будет принимать потоки ТКО от четырех муниципалитетов.

Отмечается тенденция к размещению новых объектов ТКО вблизи существующих, даже в городах. Так, планируется строительство полигонов для сортировки и захоронения мусора четвертого и пятого класса опасности в г. Стерлитамаке недалеко от старой городской свалки и на окраине г. Ишимбая, каждый мощностью 80 тыс. т отходов в год. Во взаимодействии с ППК «Российский экологический оператор» в 2023 г. планируется заключить соглашения в отношении создания и эксплуатации объектов обработки и размещения (захоронения) твердых коммунальных отходов на территории вблизи города Уфы, а также на территории Краснокамского и Дюртюлинского районов.

Следовательно, при обосновании схемы размещения полигонов захоронения отходов необходимо исходить из ожидаемого общего объема, конечно, с учетом его предвари-

тельной обработки (сортировки) и утилизации, а не только отходов городского населения.

Таким образом, выявлен недоучет геоэкологических особенностей территории как при разработке схемы обращения с ТКО, так и в практической деятельности обращения с отходами в Башкортостане.

Было установлено отсутствие зависимости численности населения и вместимости полигонов.

Определена необходимость при обосновании размещения полигонов ТКО учитывать общий объем отходов, а не только отходы населения. Вызывает сомнение целесообразность расширения площадей под захоронение отходов в городах и эффективность совместного захоронения промышленных и коммунальных отходов при условии компостирования органических отходов.

3.2.4. Анализ социально-экономических условий регионов РФ для оптимального размещения полигонов ТКО

Оценка текущего состояния социально-экономических условий различных регионов РФ проводилась с позиции перспективы реализации национальных программ и стратегий в области управления ТКО. Исследование осуществлялось на основе статистических данных Росприроднадзора по форме 2-ТП (отходы) о массе образованных ТКО, ежегодных данных отчётов Росстат по населению РФ. Среди значимых параметров оценки социально-экономических условий оптимального размещения полигонов ТКО сопоставлялись показатели: общая масса ТКО, планируемый годовой объем ТКО со среднегодовой численностью постоянного населения регионов, с плотностью населения и долей

городского населения на региональном уровне согласно данным Росстата.

Максимальная масса отходов в 2022 г., по оценкам экспертов, около одной пятой всех ТКО страны была образована в Московском регионе (19,9%). Далее идут Краснодарский край (4,1% от общей массы), Санкт-Петербург (3,4%), Свердловская и Ростовская области (по 3,2%), Татарстан (2,8%), Самарская область и Башкирия (по 2,5%), замыкают десятку Воронежская и Нижегородская области (по 2,1%). Наименьший удельный вес – менее 1 % в общероссийской массе отходов отмечается для Ненецкого – 0,03%, Чукотского – 0,06% автономных округов и Еврейской автономной области – 0,09%, а также Республик: Алтай и Тыва – по 0,12%, Ингушетия (0,14%), Калмыкия и Хакасия (0,19%), Бурятия (0,25%) и Магаданской области (0,16%).

Учитывая, что объем производимых ТКО пропорционален количеству населения, проживающего в регионах, были проанализированы данные о населении: плотность населения и доля городского населения (рис. 3.2.3; 3.2.4).

На рис.3.2.6 наиболее густонаселенные регионы преимущественно расположены в Центральном, Приволжском, Южном, Северо-Кавказском и отчасти Уральском федеральных округах, являющихся потенциальными поставщиками больших объемов бытового мусора. Известно, что больше всего бытового мусора в абсолютном выражении производят самые густонаселенные регионы. Однако темпы роста образования бытовых отходов во многом зависят от уровня и структуры потребления, наличия необходимой инфраструктуры, а также степени экологической ответственности потребителей и могут отличаться в несколько раз в разных регионах.



Рис.3.2.3. Плотность населения по регионам РФ, чел./км²
(составлено Буддаковой Е.В., Заикановым В.Г.
по данным Росстат <https://rosstat.gov.ru/>
дата обращения: 23.11.2023)

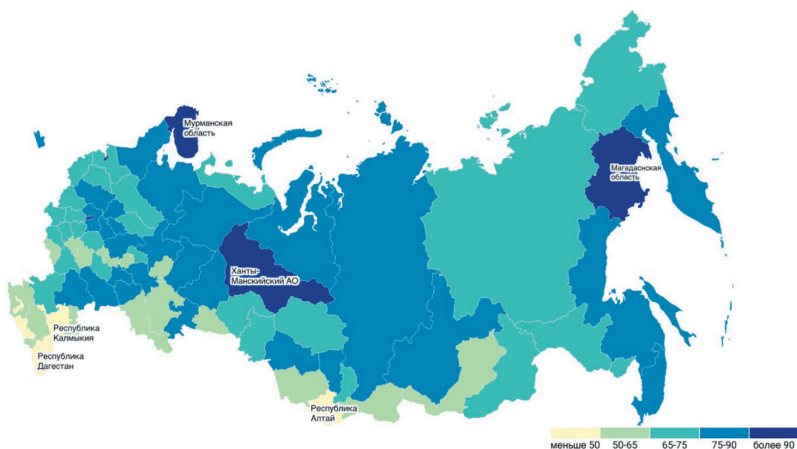
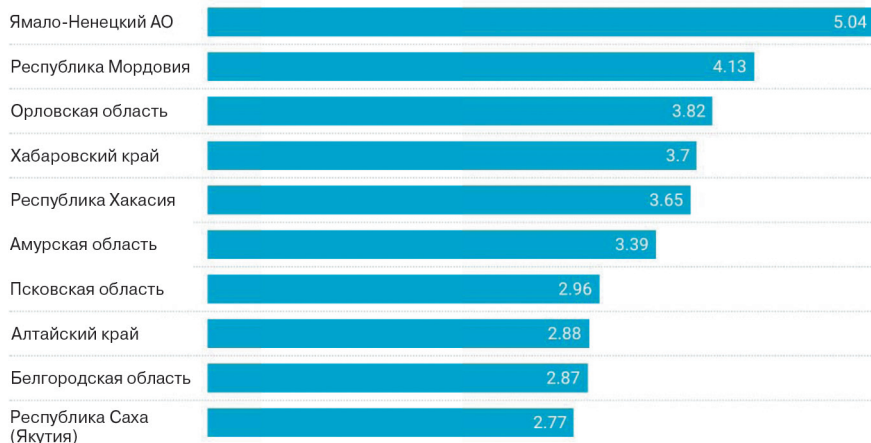


Рис. 3.2.4. Доля городского населения от общей численности населения, %
(составлено Буддаковой Е.В., Заикановым В.Г.
по данным Росстат <https://rosstat.gov.ru/>
дата обращения: 23.11.2023)

Топ-10 регионов по индексу социального благополучия

на 1 квартал 2022 год



Источник: <http://civilfund.ru/mat/view/143>

Рис. 3.2.5. Рейтинг регионов РФ по индексу социального благополучия
(составлено авторами по данным <http://civilfund.ru/mat/143/>
дата обращения: 21.11.2023)

Объем производимых ТКО

рассчитано в %

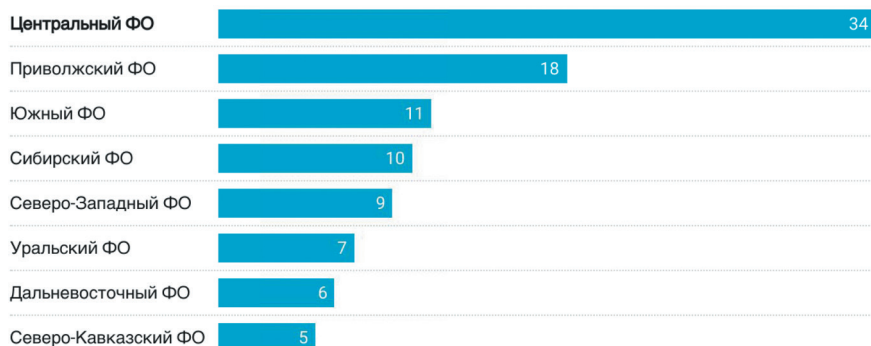


Рис. 3.2.6. Рейтинг федеральных округов по объему производимых ТКО

При сравнении рис. 3.2.3 и 3.2.4 можно заметить, что выделяются регионы, обладающие незначительной плотностью, но с большой долей городского населения, к ним относятся: Магаданская область, Ханты-Мансийский автономный округ и Мурманская область, в которых также можно ожидать увеличение объемов бытового мусора. В то же время Республики Дагестан и Калмыкия, относящиеся к густонаселенным регионам, обладают сравнительно низкой долей городского населения — 45% и 47% соответственно. Для урбанизированных районов характерно дальнейшее повышение темпов рециркуляции и снижение темпов захоронения отходов, в аграрных регионах таких тенденций пока не отмечается.

По данным аналитических отчетов экспертов (Третьякова, Шимановский, 2020), наблюдается прямая зависимость между количеством сгенерированных ТКО и уровнем жизни в регионах, поэтому были проанализированы значения показателя индекса социального благополучия (рис. 3.2.5), который рассчитывается как отношение среднемесячной заработной платы к стоимости потребительской корзины (минимальной стоимости жизни). По этому показателю среди лидеров регионов можно отметить: Ямало-Ненецкий АО, Республику Мордовию, Орловскую область и Хабаровский край, все они распределены по различным федеральным округам и плохо коррелируют с другими показателями, используемыми в комплексной оценке регионов по условиям оптимального размещения полигонов ТКО.

Сопоставление данных рейтинга с опубликованными данными по лидерам среди регионов по производству ТКО на душу населения позволяет отметить, что для Амурской области и Ямало-Ненецкого АО прослеживается четкая за-

висимость между этими показателями. В 2022 г. Амурская область стала лидером по генерации бытового мусора со средним показателем 652,4 кг на человека¹⁰.

Были проанализированы данные по общему объему ТКО по федеральным округам (рис.3.2.6).

Видно, что лидером является Центральный ФО, который наиболее густонаселен.

Транспортная доступность полигонов ТКО является важным критерием при разработке территориальных схем обращения с отходами. С этой целью была проанализирована информация о плотности дорог общего пользования по субъектам РФ, представленная на рис. 3.2.7.



Рис. 3.2.7. Плотность автомобильных дорог с твердым покрытием общего пользования на 1000 км²

(составлено Булдаковой Е.В., Заикановым В.Г.
по данным Росстат <https://rosstat.gov.ru/>
дата обращения: 23.11.2023)

¹⁰ [<https://tass.ru/ekonomika/18518801>].

На рисунке четко виден тренд к уменьшению плотности автомобильных дорог в северо-восточном направлении, также отмечаются субъекты, имеющие плотность дорог выше средней по региону, к таким относятся Приморский край и Еврейская автономная область на Дальнем Востоке и Республика Калмыкия, имеющая плотность дорог ниже средней по региону.

Все проанализированные социально-экономические параметры на региональном уровне дают информационную основу для комплексного анализа и оценки регионов с позиции благоприятности для размещения полигонов ТКО, а полученная информация может быть использована при принятии эффективных решений в области управления отходами.

3.2.5. Оценка благоприятности территорий субъектов России для размещения полигонов ТКО

Территориальная дифференциация результатов оценки представлена на рис. 3.2.8. Значения рассчитанного индекса изменяются в диапазоне от 2.7 до 14.9 баллов при среднем значении 6.8 балла. ***Наименьшие значения индекса соответствуют наибольшей благоприятности условий для размещения полигонов ТКО в регионе***, т.е. дополнительных затрат для их строительства и эксплуатации не потребуется.

В итоге половина субъектов характеризуется относительно благоприятными геоэкологическими условиями для размещения полигонов ТКО. В основном это субъекты ЦФО, СЗФО (кроме северных), ПФО и ДВФО. Лучшими показателями отличаются области, находящиеся на границе лесной и лесостепной зон (рис. 3.2.9). Высокие показатели, от-

ражающие максимальную неблагоприятность, получены для регионов Сибирского ФО и Дальнего Востока, для которых характерны такие геоэкологические ограничения, как наличие толщ многолетнемерзлых пород, горный рельеф, заболачивание и сейсмичность (рис. 3.2.10). Для регионов Дальнего Востока характерно исключение из числа благоприятных площадей сезонного затопления.



Рис. 3.2.8. Индекс благоприятности размещения полигонов ТКО субъектов РФ

Учитывая численность городского населения, рассчитывался нормативный объем накапливаемых коммунальных отходов. Среди регионов максимальный фактический годовой объем ТКО (по данным официальной статистики – Росприроднадзор, 2021) получен для Московского региона, включающего Москву и Московскую область, на втором ме-

сте — Свердловская область, замыкает рейтинг лидеров Красноярский край. Интересно, что при соотнесении этих значений с рассчитанным Индексом благоприятности размещения полигонов ТКО выделяются Свердловская область, Краснодарский край и Ростовская область. Для этих регионов характерны существенные ограничения для размещения полигонов ТКО (рис. 3.2.11).

Для большинства регионов РФ пресущее превышение фактического годового объема ТКО (2021 г.) над нормативным более чем в 2 раза, что помимо негативных экологических последствий приведет к значительным финансовым издержкам за сверхлимитное размещение отходов¹¹. В то же время региональные нормативы вводятся из расчета реализации проекта «Комплексного обращения...». Благодаря системным мерам государственной поддержки в стране появляется все больше новых мощностей по обработке и утилизации ТКО.

Учитывая, что объем производимых ТКО пропорционален количеству населения (в основном городского) в субъектах, были проанализированы данные о плотности населения и доле городского населения. Сопоставление этих показателей с ожидаемыми объемами ТКО показало отсут-



Рис. 3.2.9. Топ-10 регионов РФ с минимальными значениями Индекса благоприятности условий для размещения полигонов ТКО

¹¹ Постановление Правительства РФ № 758 от 29.06.2018 г.

ствие прямой связи между ними, так как плотность населения связана не только с численностью населения, но и с площадью территории их проживания.



Рис. 3.2.10. Топ-10 регионов РФ с максимальными значениями Индекса благоприятности условий для размещения полигонов ТКО



Рис.3.2.11. Топ-10 регионов по распределению нормируемого годового объема ТКО и показатель Индекса благоприятности размещения полигонов ТКО

По данным аналитических отчетов экспертов (Третьякова, Шимановский, 2020), наблюдается прямая зависимость между количеством сгенерированных ТКО и уровнем жизни в регионах, рассчитываемого как отношение среднемесячной зарплаты к стоимости потребительской корзины (минимальной стоимости жизни). Сопоставление данных рейтинга субъектов РФ по Индексу социального благополучия с опубликованными данными по производству ТКО на душу населения позволяет отметить, что для Амурской области и Ямало-Ненецкого АО прослеживается четкая связь между этими показателями. Так, Амурская область в 2022 г. стала лидером по генерации бытового мусора со средним показателем 652,4 кг на чел.¹², т.е. чем выше индекс социального благополучия, тем больше потенциальный объем коммунальных отходов.

Темпы роста образования бытовых отходов во многом зависят от уровня и структуры потребления, наличия необходимой инфраструктуры, а также степени экологической ответственности потребителей и могут отличаться в несколько раз в регионах.

Известно, что не все ТКО попадают на полигоны, часть из них подвергается вторичной переработке. Поэтому сам рост генерации бытовых отходов необязательно сопряжен с увеличением экологического ущерба и дополнительной нагрузкой на регионы. При интеграции подходов экономики замкнутого цикла в российскую практику обращения с отходами следует ожидать, что большая часть отходов будет перерабатываться и вовлекаться в повторный оборот. Однако

¹² [<https://tass.ru/ekonomika/18518801>]

в 2022 г. из 45,9 млн т произведенных ТКО на утилизацию было отправлено всего 6,6%. Причем сжигание мусора теперь также приравнивается к утилизации. Несмотря на то что большинство ТКО относятся к наименее опасным IV и V классам, огромные объемы такого разнородного по составу мусора при неправильном размещении и отсутствии утилизации наносят огромный ущерб окружающей среде и человеку, поэтому разработка методов и подходов к размещению полигонов ТКО для сортированных отходов является актуальной и первоочередной задачей на пути сохранения окружающей природной среды и устойчивого развития экономики и общества. Для урбанизированных районов планируется дальнейшее повышение темпов рециркуляции и снижение объемов захоронения отходов.

Результаты выполненной оценки позволяют судить о благоприятности условий регионов для размещения на их территории полигонов ТКО, представить различия в сложности их строительства из-за наличия негативных геоэкологических факторов и социально-экономических условий субъектов. Учет в комплексной оценке таких показателей, как количество городов и численность городского населения, региональные нормы сбора ТКО, удорожание строительства полигона при наличии различных геоэкологических ограничений, ценность занимаемых полигоном земель и др., обеспечивает интегральную оценку существующих региональных различий, которые необходимо учитывать при планировании размещения полигонов ТКО, что позволит прогнозировать объем выделения средств на реализацию Федерального проекта «Комплексная система обращения с твердыми коммунальными отходами».

Предложенный многоступенчатый подход к оценке благоприятности размещения полигонов ТКО позволяет комплексно оценить основные ограничения, как природные, так и социально-экономические на единой методической основе на федеральном уровне. Полученные количественные оценки территории субъектов, выраженные Индексом благоприятности размещения полигонов ТКО, рассчитанным в баллах, могут быть использованы при принятии эффективных решений в области управления отходами.

Глава 3.3. Принципы районирования платформенных территорий по степени естественной защищенности геологической среды на примере ЦФО РФ

*(И.В. Козлякова, О.Н. Еремина, Н.Г. Анисимова,
И.А. Кожевникова)*

3.3.1. Проблемы захоронения ТКО на территории Центральной России и особенности ее геологического строения

Проблема обращения с отходами стоит наиболее остро в Центральном федеральном округе Российской Федерации (ЦФО), который занимает площадь более 650 тыс. кв. км и включает 17 областей. Это одна из наиболее густонаселенных и индустриально развитых частей России. Самый распространенный способ обращения с твердыми коммунальными отходами в субъектах ЦФО — захоронение на полигонах (Территориальная схема..., 2018). При этом действующая система обращения с отходами не справляется здесь с объемами их производства. В настоящее время на территории округа скопилось свыше 90 млрд т отходов. Здесь насчитывается более 1000 объектов размещения отходов — полигонов и свалок, причем основная их часть не включена в государственный реестр (Постановление Правительства РФ, 2018). Большинство полигонов существуют более 50 лет, и практически исчерпали свой ресурс. Как правило, они образовывались стихийно в старых карьерах и потом модернизировались, насколько это было возможно. Основные проблемы обращения с ТКО — это рекультивация ста-

рых полигонов, оценка возможности их расширения и дальнейшего использования, выбор мест для размещения новых полигонов.

Один из путей решения проблемы отходов в Центральной России — создание ограниченного числа крупных производственных комбинатов, включающих мусоросжигательный завод, предприятие по переработке отходов и полигон для захоронения. Такие комплексы существуют сейчас во многих развитых странах мира. Выбор участков для их размещения должен осуществляться на основании существующих санитарных правил, которые устанавливают ограничения и запреты на территории размещения полигонов в зависимости от удаленности от населенных пунктов и водных объектов, особенностей рельефа и геолого-гидрогеологических условий (Deswal, Laura, 2018; Djokanović, Abolmasov, Jevremović, 2016; СанПиН 2.1.7.1038-01, 2001; Zelenović Vasiljević, 2012).

Как было показано в предыдущих главах, электронная модель, разрабатываемая для включения в территориальную схему обращения с отходами на базе специальной геоинформационной системы, должна быть в обязательном порядке дополнена комплексным учетом природных условий территорий. Благоприятные природные условия повышают защищенность геологической среды, а существование в геологическом разрезе природных барьеров, препятствующих поступлению загрязнения с поверхности в грунтовые толщи и подземные воды, в дополнение к искусственным барьерам, значительно упрощает задачу сохранения благоприятной экологической обстановки в районах полигонов и предприятий утилизации ТКО.

В результате многолетних исследований авторами разработана методология оценки благоприятности территории для размещения предприятий утилизации и полигонов захоронения ТКО. Основные позиции методологии сводятся к следующему:

- оценка благоприятности территории при выборе мест для размещения предприятий утилизации и полигонов захоронения ТКО должна обязательно учитывать **степень естественной защищенности геологической среды** от загрязнения;
- степень естественной защищенности геологической среды оценивается на основании наличия в геологическом разрезе **одного или нескольких слабопроницаемых комплексов пород**, препятствующих поступлению в подземные водонесные горизонты загрязнения с поверхности;
- универсальным методом оценки естественной защищенности геологической среды больших по площади территорий служит инженерно-геологическое районирование, которое включает типизацию территорий по особенностям геолого-гидрогеологического строения, оценку благоприятности каждого выделенного типа и зонирование территории по степени благоприятности по геологическим критериям для размещения предприятий и полигонов утилизации ТКО.

Основная задача инженерно-геологического районирования — подразделение геологических толщ по степени пригодности для размещения отходов. Районирование территорий по пригодности геологических условий для размещения ТКО дает научно обоснованное представление о возможности безопасного использования территории. Для этого необходим поиск участков земной коры, которые могли бы быть

вместилищем отходов и изолировали их от биосферы на многие десятки лет, пока не завершится процесс полного разложения. Основные требования, предъявляемые к массивам пород, слагающих такие участки, сводятся к следующему: малая проницаемость; однородная, массивная, нетрещиноватая структура; высокая сорбционная ёмкость; пластичность. Исходя из этих требований в наибольшей степени им отвечают толщи глинистых и галоидных пород. Однако, учитывая, что площадки для ТКО устраиваются в основном в верхней части земной коры на глубинах, как правило, не превышающих 20–30 м, где галоидные толщи малоустойчивы, преимущественной геологической средой для размещения площадок ТКО являются глинистые породы. Глинистые толщи представляют собой надежные природные барьеры. Таким образом, при инженерно-геологических исследованиях наличие мощных, выдержанных по простиранию глинистых толщ в верхней части разреза — это основное условие оценки благоприятности территории для целей размещения отходов (Гольдберг, 1987). Районирование по этому признаку должно опираться на знание основных закономерностей геологического строения территории (Kozliakova et al., 2020).

В геолого-структурном отношении территория ЦФО расположена в пределах древней Восточно-Европейской платформы, где на докембрийском метаморфическом фундаменте залегает мощный палеозойско-кайнозойский осадочный чехол. Отложения осадочного чехла формировались преимущественно в морских условиях и представляют собой терригенные, карбонатные и сульфатные породы, залегающие с небольшими уклонами. Основные структуры осадочного чехла — это антеклизы и синеклизы (Геология СССР,

т. 4, 1971). Поверхность платформы испытывала поднятия и опускания, а морские условия периодически сменялись континентальными, когда на поверхности формировались древние речные долины. Наиболее длительный континентальный перерыв характерен для триасового и пермского периодов. Известна разветвленная сеть речных долин этого времени на поверхности отложений каменноугольной системы, заполненная аллювием юрского возраста. На рубеже мелового и палеогенового периодов море отступило с поверхности платформы и начался континентальный перерыв, который мы можем наблюдать и в настоящее время. Для этого перерыва характерны две основные особенности — развитие нескольких стадий материкового оледенения и формирование речных долин в доледниковое время. Современная поверхность платформы расчленена относительно слабо. С поверхности здесь залегают континентальные отложения четвертичного времени, представленные различными генетическими типами. Наибольшим распространением пользуются ледниковые и аллювиальные песчаные, глинистые и песчано-глинистые отложения. Их мощность и условия залегания определяются особенностями доледникового и современного эрозионного рельефа.

Можно утверждать, что инженерно-геологические условия Центральной России характеризуются всеми классическими признаками, характерными для древних платформ. Это слабо расчлененный рельеф, субгоризонтальное или слабонаклонное залегание отложений платформенного чехла, существенно различные условия формирования дочетвертичных и четвертичных отложений, наличие подземных вод преимущественно пластового типа, развитие совре-

менных экзогенных геологических процессов, таких как эрозия, оползни, карст, заболачивание и подтопление.

Такие относительно простые геолого-структурные условия древних платформ делают их привлекательными для разработки комплексной методики оценки геологической среды по степени пригодности для размещения предприятий по складированию, захоронению и переработке ТКО на этих территориях. Для территории Центрального федерального округа Российской Федерации был выполнен анализ условий естественной защищенности геологической среды от загрязнения, определены основные типы геолого-гидро-геологического строения и предложены критерии оценки степени благоприятности территорий для реализации комплексных проектов в сфере обращения с отходами.

3.3.2. Концептуальная модель оценки территории Центральной России для размещения полигонов и предприятий утилизации ТКО

Основные методологические этапы оценки территории Центральной России приведены на рис. 3.3.1. Все многообразие разновозрастных стратиграфо-литологических комплексов осадочных пород (Геология СССР, т. 4, 1971; Инженерная геология СССР, т.1, 1978; Природные опасности России, 2002) на глубину порядка 50–60 м было разделено на несколько типов в зависимости от литологии, возраста и степени обводненности дочетвертичных и четвертичных пород.

В формате MapInfo были созданы два вспомогательных информационных слоя, на одном из которых показаны комплексы дочетвертичных пород различной проницаемости и обводненности, на другом — комплексы четвертичных по-

род. Формальное наложение этих слоев позволило выделить различные сочетания, для каждого из которых был составлен типовой геологический разрез, где выделены слои различного возраста, литологического состава и проницаемости. Материалом для составления информационных слоев и разрезов послужили мелкомасштабные архивные геологические карты Центральной России и литературные источники. В этих работах использованы карты ГИС-Атласа «Недра России» составленного ВСЕГЕИ, и Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1 000 000 (Государственная геологическая карта РФ, 1999; Пакет оперативной геологической информации, 2018).

Каждый тип геологического строения (типовой геологический разрез) был отнесен к определенной категории благоприятности территории (таксону) в зависимости от наличия слабопроницаемых слоев четвертичного и дочетвертичного возраста и глубины их залегания. Выделено 5 таксонов, охарактеризованные как: благоприятные, условно благоприятные, условно неблагоприятные, неблагоприятные и весьма неблагоприятные с позиций реализации проектов, связанных с утилизацией ТКО. Оценка проводилась на основании изучения геологического строения и в зависимости от условий залегания слабопроницаемых отложений в верхней части разреза.

На итоговой карте районирования показаны контуры и индексы всех типов геологического строения, а цветом (по принципу светофора) выделены районы различных категорий благоприятности. Карта — достаточно информативный документ, позволяющий увидеть не только оценочные категории, но и обобщенную геологическую характеристику каждого таксона.



Рис. 3.3.1. Концептуальная модель инженерно-геологической оценки территории Центральной России для размещения полигонов и предприятий утилизации ТКО

3.3.3. Оценка естественной защищенности геологической среды

Оценка естественной защищенности геологической среды от загрязнения, поступающего с поверхности, проводилась в зависимости от наличия в разрезе дочетвертичных и четвертичных отложений комплексов пород пониженной проницаемости, способных защитить геологическую среду от загрязнения, поступающего с поверхности.

Среди дочетвертичных отложений выделены:

- слабопроницаемые глинистые толщи юрского возраста;
- неравномерно проницаемые мел и мергели мелового возраста, алевролиты-аргиллитовые загипсованные породы и гипсы пермского и триасового возраста;
- хорошо проницаемые пески и песчаники неогенового, палеогенового и мелового возраста и терригенно-карбонатные породы девона и карбона.

Пространственное расположение этих комплексов отражено на первом вспомогательном информационном слое, созданном в формате MapInfo.

При анализе четвертичных толщ учитывалось наличие и положение в разрезе слабопроницаемых суглинков различных генетических типов (Кашперук и др., 2018; Козлякова и др., 2018; Экзарьян, 2009). Основной слабопроницаемый комплекс пород среди четвертичных отложений – моренные суглинки. На втором вспомогательном информационном слое выделены территории, где эти суглинки залегают с поверхности, под аллювиальными и водно-ледниковыми песками или отсутствуют в геологическом разрезе. Выделены также территории, где слабопроницаемые покровные суг-

линки и супеси имеют значительное распространение и мощность.

В результате наложения двух вспомогательных информационных слоев выявлено 18 типов грунтовых толщ в зависимости от стратиграфо-литологических особенностей и обводненности комплексов дочетвертичных и четвертичных отложений, которые стали основой для результирующего оценочного районирования территории по степени благоприятности для размещения предприятий и полигонов утилизации ТКО (табл. 3.3.1).

Таблица 3.3.1

Типы грунтовых толщ на карте инженерно-геологического районирования ЦФО

Четвертичные отложения Дочет- вертичные отложения	Пески, моренные суглинки, переслаивание песков и суглинков	Пески	Моренные суглинки, переслаивание песков и суглинков	Плессовид- ные суглинки и супеси
1	2	3	4	5
Преимущественно пески и песчаники (К, Pg, N) водоносные I	I–1	I–2	I–3	I–4
Мергели, мел (К) слабОВОД- носные и неравномерно обводненные II	II–1	II–2	II–3	II–4

Окончание табл. 3.3.1

1	2	3	4	5
Преимущественно глины (J) водоупорные III	III–1	III–2	III–3	—
Аргиллиты, алевролиты, песчаники местами загипсованные, гипс (P-T) слабоводоносные и неравномерно обводненные IV	IV–1	IV–2	IV–3	—
Известняки, доломиты с прослоями глин (D-C) водоносные V	V–1	V–2	V–3	V–4

Для каждого из этих типов составлен обобщенный (типовой) геологический разрез (рис. 3.3.2), который иллюстрирует, как залегают породы выделенных комплексов, различающиеся по своей проницаемости. Выделяются водоносные и хорошо проницаемые породы, слабоводоносные и неравномерно обводненные породы, водоупорные или слабопроницаемые породы. На разрезах обводненность и проницаемость показаны цветом, стратиграфо-литологическая характеристика — крапом и штриховкой.

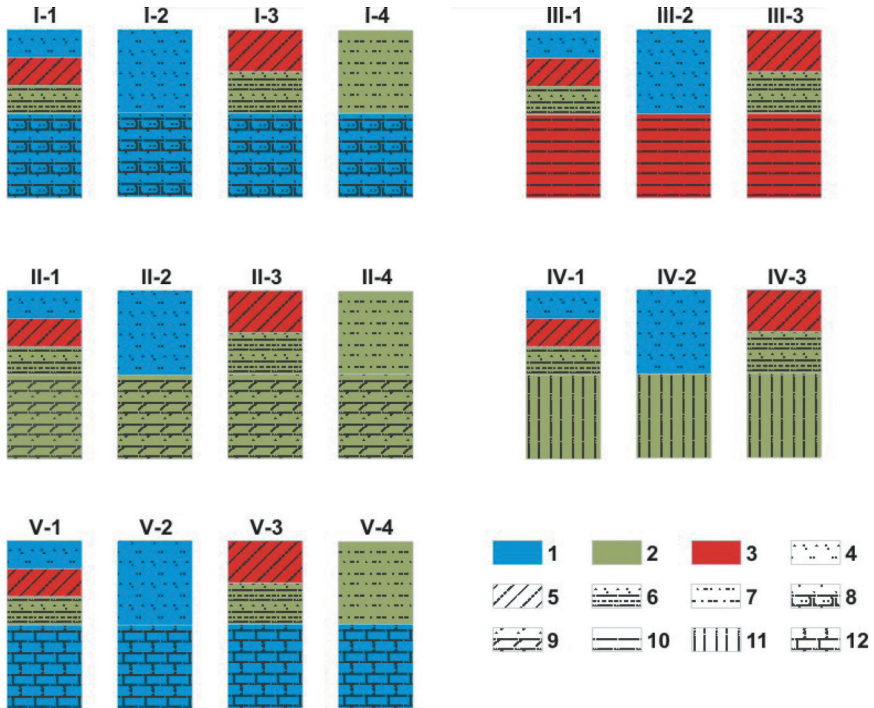


Рис. 3.3.2. Типовые геологические разрезы к карте инженерно-геологического районирования:

1 – водоносные и хорошо проницаемые породы; 2 – слабоводоносные и неравномерно обводненные породы; 3 – водоупорные породы.

Четвертичные отложения: 4 – пески; 5 – моренные суглинки;

6 – переслаивание песков и суглинков; 7 – лёссовидные суглинки и супеси.

Дочетвертичные отложения: 8 – преимущественно пески и песчаники (К, Pg, N); 9 – мергели, мел (К); 10 – преимущественно глины (J); 11 – аргиллиты, алевролиты, песчаники, местами загипсованные, гипс (P-T); 12 – известняки, доломиты с прослоями глин (D-C)

Итогом проведенных исследований стала типизация территории Центральной России по благоприятности для размещения объектов утилизации ТКО (табл. 3.3.2). На её основе составлена в масштабе 1: 2500 000 *обзорная карта инженерно-геологического районирования* (рис. 3.3.3).

Таблица 3.3.2

Типизация территории ЦФО по степени благоприятности для размещения полигонов и предприятий утилизации твердых коммунальных отходов в зависимости от инженерно-геологических условий

Степень благоприятности инженерно-геологических условий. Тип геологического строения	Особенности инженерно-геологических условий
1	2
Благоприятные III-3	В разрезе выделяются две водоупорные толщи пород: четвертичные моренные суглинки, залегающие с поверхности, и юрские глины, разделяющие четвертичный и мезозойский водоносные комплексы. Геологическая среда защищена от загрязнения, поступающего с поверхности
Условно благоприятные I-3, II-3, IV-3, V-3	С поверхности залегают водоупорные четвертичные моренные суглинки, которые подстилаются хорошо проницаемыми и водоносными или слабоводоносными и неравномерно обводненными четвертичными и дочетвертичными отложениями. Защищенность геологической среды от загрязнения определяется мощностью слоя морены
Условно неблагоприятные III-1, III-2	Четвертичные отложения представлены песчано-глинистыми водоносными и слабоводоносными неравномерно обводненными породами

Окончание табл. 3.3.2

1	2
	<p>Грунтовый водоносный горизонт не защищен от загрязнения.</p> <p>Четвертичная толща подстилается юрскими водоупорными глинами. Мезозойский водоносный комплекс защищен от загрязнения.</p> <p>Защищенность геологической среды определяется глубиной залегания и мощностью слоя юрских глин</p>
Неблагоприятные I-1, I-4, II-1, II-2, II-4, IV-1, IV-2, V-1, V-4	<p>В разрезе выделяются хорошо проницаемые, водоносные, слабоводоносные и неравномерно обводненные комплексы четвертичных и дочетвертичных пород.</p> <p>Можно выделить локальные участки распространения слабопроницаемых пород, не выдержанных по мощности и глубине залегания.</p> <p>Геологическая среда практически не защищена или слабо защищена от загрязнения</p>
Весьма неблагоприятные I-2, V-2	<p>Четвертичные и подстилающие их дочетвертичные отложения представлены хорошо проницаемыми и водоносными комплексами пород.</p> <p>Геологическая среда незащищена от загрязнения, поступающего с поверхности</p>

Благоприятными признаны массивы грунтов, в которых выделяются две водоупорные толщи — четвертичные моренные суглинки, залегающие у поверхности, и юрские глины. Таким образом, четвертичный и мезозойский водоносные комплексы оказываются изолированными друг от друга, а геологическая среда защищена от загрязнений, поступающих с поверхности. Эти районы выделены локально, преимущественно в северной части территории.

Условно благоприятными признаны территории, где с поверхности залегают моренные четвертичные суглинки, под-

стилаемые хорошо проницаемыми отложениями. На этих участках степень защищенности геологической среды от поверхностных загрязнений определяется мощностью моренных грунтов. Такие территории выделены на северо-западе территории и на водораздельных поверхностях в ее центре.

Условно неблагоприятными являются территории, где грунтовые толщи сложены песчано-глинистыми четвертичными отложениями без регионально выдержанных слабопроницаемых прослоев, подстилаемыми юрскими глинами. Здесь грунтовый водоносный горизонт подвержен загрязнению, а степень защищенности глубоких горизонтов определяется мощностью и глубиной залегания юрских глин. Такие районы отмечены в северной и восточной частях ЦФО.

Неблагоприятными признаны участки, где массив сложен хорошо проницаемыми четвертичными и дочетвертичными породами с локальным распространением слабопроницаемых слоев. Геологическая среда практически не защищена от загрязнений. К таким участкам относится большая часть территории на юго-западе и востоке ЦФО, с отдельными участками на севере.

Весьма неблагоприятными являются территории, где в геологическом строении отмечаются только хорошо проницаемые и водоносные отложения. Геологическая среда здесь не защищена от поступающих с поверхности загрязнений. Такие участки, как правило, приурочены к современным долинам рек, где аллювиальные отложения залегают непосредственно на карбонатных породах каменноугольной и девонской систем, и районам развития палеоген-неогеновых песков и песчаников.

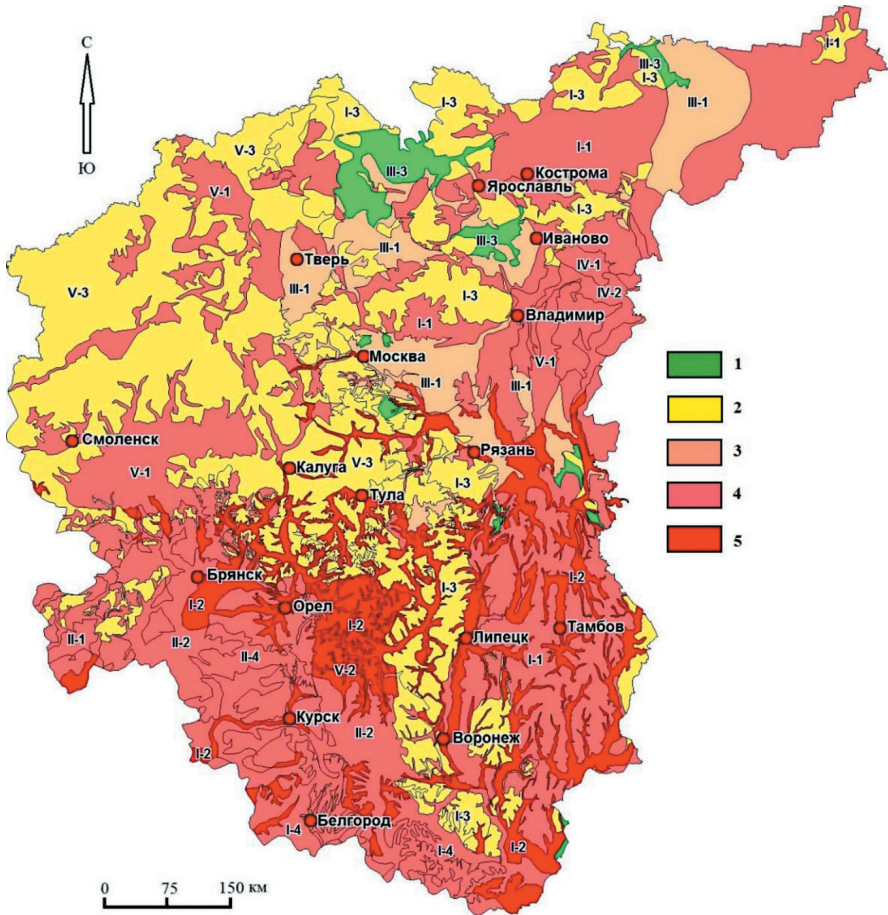


Рис. 3.3.3. Карта инженерно-геологического районирования ЦФО по условиям размещения предприятий и полигонов ТКО. Масштаб 1:2500 000. Районы с различной степенью благоприятности инженерно-геологических условий:

- 1 – благоприятные; 2 – условно благоприятные;
- 3 – условно неблагоприятные; 4 – неблагоприятные; 5 – весьма неблагоприятные. Подробная характеристика районов в табл. 3.3.2

3.3.4. Применение обзорной карты оценочного инженерно-геологического районирования

В данном исследовании на примере Центральной России авторы попытались показать, что геологические условия, как один из критериев при выборе участков для размещения ТКО, требуют отдельного специального анализа, так как обладают высокой пространственной изменчивостью. При их характеристике недостаточно просто отметить, какие грунты залегают с поверхности в той или иной части территории и на какой глубине находятся грунтовые воды, как это делается обычно при проведении районирования для выбора мест размещения отходов (Инструкция по проектированию..., 1996; СанПИН. Гигиенические..., 2001).

Оценочная типизация территории в зависимости от наличия в разрезе одного или нескольких слабопроницаемых слоев, залегающих относительно близко к поверхности, и выделение таксонов по степени защищенности геологической среды или, другими словами, по благоприятности для размещения ТКО, позволяют учесть степень опасности загрязнения массива грунтов и подземных вод в общей оценке территории.

Из анализа карт следует, что большая часть территории ЦФО по геологическим критериям непригодна для безопасного размещения ТКО без специальных защитных мероприятий. Например, на территории Курской, Орловской, Тамбовской и Белгородской областей практически невозможно выделить крупные участки, где грунтовые толщи характеризуются природными защитными свойствами, препятствующими поступлению загрязнения с поверхности. Для Брянской, Калужской, Московской, Липецкой, Иванов-

ской, Воронежской, Рязанской, Владимирской и Костромской областей природными защитными свойствами обладают районы, площадь которых составляет менее половины от площади областей. Таким образом, в подавляющей части территории округа сооружение объектов обращения с отходами требует проведения дополнительных мероприятий по защите геологической среды от загрязнения. В настоящее же время многие полигоны и свалки на территории ЦФО размещены без какого-либо учета геологических условий, и существует высокий риск загрязнения геологической среды.

Необходимо отметить, что карта оценочного инженерно-геологического районирования, составленная на основе разработанной типизации территории в масштабе 1:2500 000, дает общее представление о благоприятности планируемых мест размещения предприятий утилизации отходов на территории округа. Она построена в цифровом формате и должна рассматриваться как самостоятельный информационный слой, который может быть интегрирован в общую ГИС, создаваемую по многокритериальному принципу с целью принятия решений по выбору мест размещения отходов. Таксонам типизации по степени благоприятности несложно дать балльную оценку, если требуется перейти к количественным методам многокритериального анализа. Кроме того, карта районирования имеет значение и как самостоятельный документ, позволяющий оценить современное состояние проблемы обращения с отходами на территории Центральной России.

В заключение отметим, что мелкомасштабные карты или схемы оценочного инженерно-геологического районирования способны показать общую картину благоприятности планируемых мест размещения комплексов обращения с от-

ходами. Они позволяют выделить возможные ключевые участки для дальнейших изысканий и дать общее представление об объемах необходимых дополнительных мероприятий по защите геологической среды от загрязнений при строительстве и эксплуатации таких технических систем. Они должны использоваться на начальных этапах проектирования комплексов, связанных с утилизацией и складированием ТКО.

Глава 3.4. Оценка благоприятности геологической среды для территориальной схемы обращения с ТКО на региональном уровне (на примере Московской области)

*(И.В.Козлякова, О.Н. Еремина, Е.Р. Романова,
А.Г. Хайрединова, Е.С. Чуткерашвили)*

На основе разработанной методики оценки благоприятности геологической среды Центральной России в целом можно оценить инженерно-геологические условия размещения ТКО в более крупном масштабе, для отдельных субъектов ЦФО. Рассмотрим такую региональную картографическую оценку, выполненную в масштабе 1:200 000 для крупнейшей территориальной единицы ЦФО – Московской области, для которой проблема размещения предприятий ТКО стоит весьма остро.

Площадь Московской области составляет всего 0, 27% от площади РФ, однако на нее приходится до 20% всех образующихся в стране бытовых отходов (Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды РФ в 2018 году»). Проблемы Московской области в сфере обращения с отходами те же, что и везде в России. Здесь много старых полигонов, практически исчерпавших свой ресурс, крайне негативное отношение населения к любым объектам обращения с отходами: и к полигонам захоронения, и к мусоросжигательным заводам, какими бы современными они не были (Заиканов и др., 2018; Кашперюк, 2018). Согласно официальным данным общая площадь земель в Московской области, занятых санкционированными и несанкционирован-

ными свалками, превышает 700 га, а загрязненных почв на порядок больше. Ежегодно объем твердых коммунальных отходов (ТКО) увеличивается в среднем на 200 млн. м³/год. Если полигоны, которые формировались более четверти века назад размещались почти без учета местных особенностей инженерно-геологических условий и проектирования средозащитных мероприятий, то при создании стихийных, несанкционированных свалок вопрос о них вообще не ставился. К таким объектам можно отнести и территории, на которых размещены промышленные отходы, старые полигоны, участки с размещением иловых осадков сточных вод и др. Эти объекты вследствие их нерекультивированности являются источниками загрязнения, не обеспечивающими требований экологической и геоэкологической безопасности в одном из самых густонаселенных регионов Российской Федерации.

3.4.1. Геолого-геоморфологические условия Московской области

В геоморфологическом отношении на территории Московской области выделяются пять геоморфологических районов, рельеф и геологическое строение которых во многом определяют условия функционирования свалок ТКО (Рычагов, 2006; Мазурин и др., 2018). Это – Верхневолжская низменность, Смоленско-Московская возвышенность, Москворецко-Окская равнина, Мещерская низменность и Заокская возвышенная равнина (рис. 3.4.1).

Верхневолжская низменность занимает крайний север области, сильно заболочена, имеет небольшие абсолютные высоты –120–180 м. Сложена мощной толщей озерно-ал-

лювиальных и водно-ледниковых отложений. Для неё характерны многочисленные невысокие плосковершинные моренные холмы и гряды высотой 150–160 м.



Рис. 3.4.1. Геоморфологическое районирование Московской области (Рычагов, 2006): I – Верхневолжская низменность;
II – Смоленско-Московская возвышенность;
III – Москворецко-Окская равнина; IV – Мещерская низменность;
V – Заокская возвышенная равнина

Смоленско-Московская возвышенность, располагаясь южнее Верхневолжской низменности, простирается от юго-за-

падных границ области к северо-восточным, занимает значительную часть области. К ней приурочены наибольшие высоты Подмосковья. Здесь преобладает холмисто-моренный рельеф: холмы высотой до 300 м и заболоченные котловины между ними, многие из которых в настоящее время заняты озерами или искусственными водохранилищами (Можайское, Рузское, Истринское, Озернинское).

Клинско-Дмитровская моренно-эрозионная гряда — часть Смоленско-Московской возвышенности, длиной более 225 км и занимает ее северо-западный край. Гряда находится приблизительно в 50 км к северу от Москвы и протягивается в направлении Солнечногорск — Дмитров — Сергиев-Посад. Возвышенность является водоразделом рек бассейнов Волги и Оки (за исключением р. Яхромы). Центральная ее часть сужена до 25 км, отличается глубоким расчленением с амплитудами высот до 50–100 м. Клинско-Дмитровская гряда асимметрична. Слагающие ее холмы и гряды абсолютной высотой 280–300 м круто обрываются на север, к Верхневолжской низине, и полого снижаются на юг. На юге она переходит в полого-выпуклую Москворецко-Окскую равнину.

Москворецко-Окская равнина занимает южную часть области. Она отличается эрозионным рельефом с абсолютными высотами от 110 до 200 м. Мощность четвертичных отложений (морена, водно-ледниковые и речные отложения, покровные суглинки) в пределах Москворецко-Окской равнины невелика (10–30 м), и современный рельеф отражает в несколько сглаженном виде древнее эрозионное расчленение. Хорошо разработанные долины главных рек имеют две надпойменные террасы. Притоки рек Москвы, Оки, Протвы, Верхней Клязьмы и других наследуют неглубокие лож-

бины стока ледниковых вод, отличаются пологими склонами и широкими днищами.

Мещерская низменность расположена на востоке области. Она представляет собой треугольник между южным склоном Клинско-Дмитровской возвышенности и долиной реки Москвы. Низменность относится к числу доледниковых понижений рельефа. В основании ее залегают известняки карбона, выше — юрские и меловые отложения. Мещерская низменность прошла стадию приледникового водоема. Четвертичные отложения представлены не моренными или покровными суглинками, как на остальной территории Подмосковья, а песками, супесями и суглинками водно-ледникового происхождения. В западной части низменности возвышенные участки водоразделов и останцовые сложно расчлененные массивы с высотами не более 150 м, как правило, совпадающие по положению с повышениями юрско-мелового рельефа, сложены суглинистой мореной. Между ними располагаются обширные заболоченные низины с группами остаточных озер, слабо дренируемые реками. Реки врезаны неглубоко, течение их медленное, и они подвергаются интенсивному зарастанию. В целом для Мещеры характерно однообразие плоских и слабоволнистых песчаных низин, заболоченных или залесенных, с отдельными моренными останцами и песчаными холмами, высотой от 3—5 м, редко до 20 м.

Заокская возвышенная равнина занимает крайний юг области и относится к северо-восточному склону Среднерусской возвышенности. Рельеф местности представляет в основном пологоволнистую равнину, изрезанную овражно-балочной сетью. Высотные отметки водоразделов достигают 200 м и более, возвышаясь над днищами долин на 50 м.

В геологическом строении территории Московской области до глубины 50 м принимают участие породы четвертичной, меловой, юрской и каменноугольной систем. Четвертичные отложения залегают с поверхности повсеместно. Подстилающие их меловые и юрские породы сохранились от древнего размыва на водоразделах и склонах палеодолин (Геология СССР, 1971). Отложения каменноугольной системы распространены повсеместно и залегают под юрскими или, в местах древних размывов, под четвертичными отложениями (рис. 3.4.2).

Каменноугольная система. Породы каменноугольной системы распространены на территории области повсеместно. Они представлены известняками, мергелями и доломитами, реже глинами. На дочетвертичную поверхность эти породы выходят на северо-западе. На остальной территории области эти породы вскрыты доледниковыми долинами. В тальвегах и бортах этих долин они залегают под четвертичными отложениями. На большей части территории породы каменноугольной системы перекрыты отложениями юрского возраста.

Юрская система. Юрская толща представляет собой чередование песчаных и глинистых горизонтов. В её основании залегают преимущественно пески с прослоями глин и алевритов. Выше залегают глины достаточно большой мощности. Верх юрской системы представлены песками. Отложения юрской системы полностью сохранились от размыва только на севере области, где они перекрыты породами меловой системы. Кроме того, полный юрский разрез можно встретить на отдельных доледниковых водоразделах в центральной части и на юге области. Большой частью юрские породы частично размывы и слагают склоны доледниковых долин.

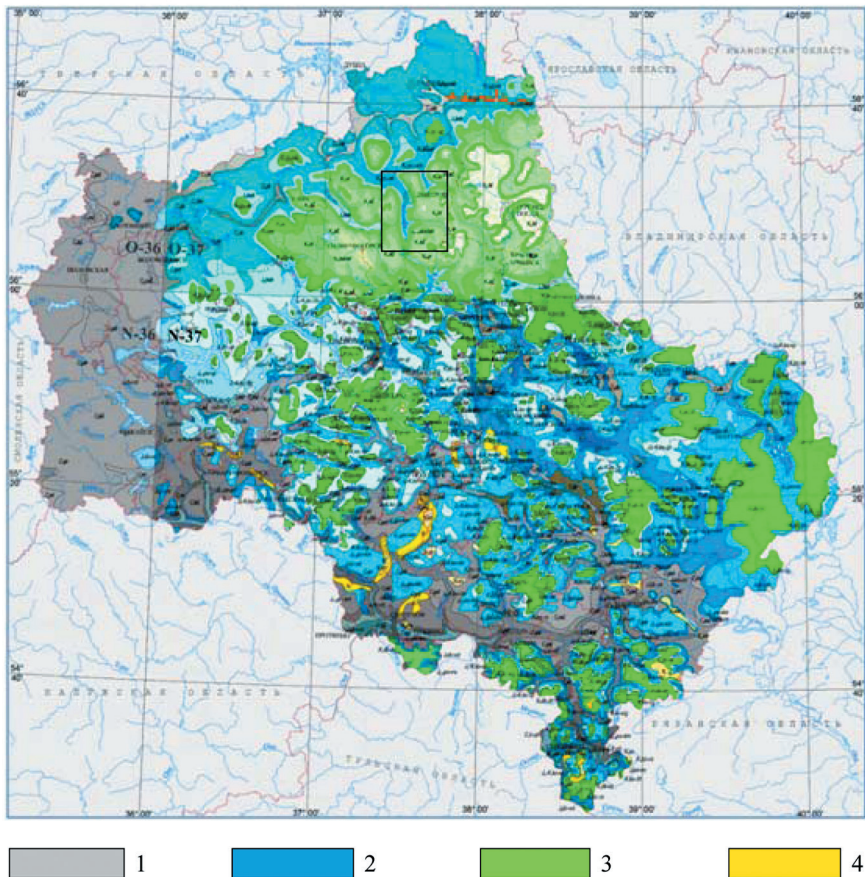


Рис. 3.4.2. Геологическая карта дочетвертичных отложений Московской области с выделенным ключевым участком исследований:
 1 — каменноугольная система; 2 — юрская система;
 3 — меловая система; 4 — неогеновая система

Меловая система. Породы мелового возраста — это преимущественно пески с редкими прослоями глин. Они составляют доледниковые водоразделы и верхние части склонов этих водоразделов. Площадное распространение меловые отложения имеют на севере и востоке области. Перекрыты они отложениями четвертичной системы.

Неогеновая система. Отложения неогеновой системы имеют незначительное распространение на юге Московской области, где они заполняют древние речные врезы. Представлены эти отложения песками и глинами с включениями гравия и гальки. Над ними залегают четвертичные отложения.

Четвертичная система. Песчано-глинистая толща четвертичных отложений представлена многообразием генетических типов. Выделяются аллювиальные, озерно-аллювиальные, озерные и водно-ледниковые пески с прослоями супесей и суглинков. В разрезе четвертичных отложений встречены четыре морены — сетунская, донская, окская и московская. Широко распространены только две морены — донская и московская. Они представлены суглинками с включением валунов и щебня. Мощность моренных суглинков может превышать 40 м. Они залегают на водоразделах или заполняют доледниковые речные врезы.

Таким образом, в геологическом строении территории Московской области четко обособляются два стратиграфических комплекса — дочетвертичный и четвертичный. Они отличаются по составу и строению слагающих пород, условиям залегания и обводненности. Эти отличия — результат разных условий образования данных комплексов в составе осадочного чехла древней платформы. Дочетвертичные отложения образовались преимущественно в морских условиях.

По составу это терригенные и карбонатно-терригенные породы, сохраняющие последовательность напластования на достаточно большой площади, только на участках древних речных долин они могут быть частично или полностью размыты. Четвертичные отложения имеют континентальное происхождение. Они значительно более изменчивы по простиранию и мощности. Это в основном нелитифицированные или слаболитифицированные породы, представленные песками, супесями и суглинками. Водоносные комплексы в четвертичных отложениях характеризуются наличием прямой взаимосвязи между входящими в их состав не выдержанными по простиранию водоносными горизонтами.

При геологическом картографировании платформенных территорий четвертичные и дочетвертичные отложения показывают на отдельных картах, что дает возможность получить более детальную характеристику геологического строения территории. Анализ этих карт с учетом известных закономерностей геологических напластований позволил провести типизацию геологических условий территории.

3.4.2. Типизация грунтовых толщ Московской области

Согласно разработанной методике, для оценки благоприятности размещения объектов ТКО необходимо оценить естественную защищенность геологической среды от загрязнения, поступающего с поверхности, на основе типизации грунтовых толщ для размещения объектов ТКО. Типизация грунтовых толщ территории Московской области приведена в табл. 3.4.1. Как показано выше, принимается, что естественная защищенность геологической среды зависит от наличия в геологическом разрезе слабопроницаемых

(водоупорных) слоев, их количества и мощности (Козлякова и др. 2021; Козлякова, Еремина, 2022; Козлякова, Еремина и др., 2023; Козлякова, Еремина и др., 2024). Дочетвертичные и четвертичные толщи в такой типизации рассматриваются отдельно.

Среди дочетвертичных отложений присутствует один мощный и выдержанный по простиранию водоупорный слой глин юрского возраста. В зависимости от наличия или отсутствия этих глин выделяются два типа грунтовых толщ дочетвертичного возраста:

I — каменноугольные известняки, иногда перекрытые юрскими песками (как правило, водоносные);

II — каменноугольные известняки, перекрытые юрскими песками и глинами, над которыми местами залегают пески мелового возраста (юрские глины разделяют каменноугольный водоносный горизонт и водоносный горизонт в юрских и меловых песках).

В толще четвертичных отложений слабопроницаемые слои — это моренные суглинки. В зависимости от их залегания в разрезе выделяются грунтовые толщи:

1 — московская и донская морены (или одна из них), залегают с поверхности или перекрыты маломощными песками (менее 10 м);

2 — аллювиальные, озерные и водно-ледниковые пески мощностью более 10 м подстилаются моренными суглинками;

3 — аллювиальные, озерные и водно-ледниковые пески слагают всю четвертичную толщу, выдержанные по простиранию и мощности моренные суглинки в разрезе отсутствуют.

В зависимости от взаимного наложения четвертичных и дочетвертичных толщ можно выделить шесть типов геологического строения (табл. 3.4.1).

Таблица 3.4.1

**Основные типы геологического строения на территории
Московской области (Козлякова, Еремина и др., 2023)**

<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Четвертичные отложения</div> <div style="text-align: center;"> Дочетвертичные отложения </div> </div>		Каменноугольные терригенно-карбонатные породы, иногда перекрытые юрскими песками (как правило водоносные)	Каменноугольные терригенно-карбонатные породы, перекрытые юрскими песками и глинами, над которыми местами залегают пески мелового возраста. Юрские глины разделяют каменноугольный водоносный горизонт и водоносный горизонт в юрских и меловых песках
		I	II
1	Отложения московской и донской морены (или одной из них), залегают с поверхности или перекрыты маломощными песками (менее 10 м)	I-1	II-1
2	Аллювиальные, озерные и водно-ледниковые пески и песчано-глинистые отложения мощностью более 10 м подстилаются моренными суглинками	I-2	II-2
3	Аллювиальные, озерные и водно-ледниковые пески и песчано-глинистые отложения составляют всю четвертичную толщу, выдержанные по простиранию и мощности моренные суглинки в разрезе отсутствуют	I-3	II-3
	Четвертичные отложения отсутствуют или имеют мощность менее 1 м	I-I	II-II

Тун I-1, в пределах которого мощная морена залегает на терригенно-карбонатных отложениях каменноугольного возраста занимает значительные площади на западе Смоленско-Московской возвышенности и Верхневолжской

низменности. Фрагментарно он встречается в центральных частях доледниковых долин, преимущественно в северной половине области.

Tun I-2, в пределах которого каменноугольные терригенно-карбонатные породы перекрыты мореной и мощной толщей четвертичных песков, распространён фрагментарно в пределах речных долин преимущественно на территории Москворецко-Окской и Заокской равнин.

Tun I-3, в пределах которого каменноугольные терригенно-карбонатные породы перекрыты мощной толщей четвертичных песков, встречается в центральных частях доледниковых долин рек Оки и Москвы и их крупных притоков на территории Москворецко-Окской и Заокской равнин.

Tun II-1. Каменноугольные известняки, перекрыты юрскими песками и глинами, а на отдельных площадях — юрскими песками и глинами, и песками мелового возраста. Четвертичная толща в пределах этого типа представлена мощной мореной. Этот тип строения имеет площадное распространение на северо-востоке области в пределах Смоленско-Московской возвышенности.

Tun II-2. Каменноугольные известняки, перекрыты юрскими песками и глинами, а на отдельных площадях — юрскими песками и глинами, и песками мелового возраста. Четвертичная толща представлена мореной и мощной толщей четвертичных песков, залегающих с поверхности. Тип II-2 преимущественно распространён на юго-западе области в пределах Мещерской низменности.

Tun II-3. Каменноугольные известняки, перекрыты юрскими песками и глинами, а на отдельных площадях — юрскими песками и глинами, и песками мелового возраста. Четвертичная толща имеет преимущественно песчаный со-

став. Тип II-3 встречается в пределах речных долин преимущественно в южной половине области.

Типизация грунтовых толщ Московской области — это только первый этап оценки степени пригодности территории для реализации проектов обращения с ТКО. Следующий этап — создание двух информационных картографических слоев: пространственное расположение типов дочетвертичных отложений и пространственное расположение типов четвертичных отложений. Взаимное наложение этих слоев позволит дать площадную оценку естественной защищенности геологической среды от загрязнения с поверхности на карте специального инженерно-геологического районирования.

При работе над картой стояло два основных вопроса. Первый — как сделать её достаточно простой и понятной неспециалисту, сохранив необходимую информативность? Второй — где взять информацию?

Ответом на первый вопрос стала разработанная типизация грунтовых толщ, которая позволяет выделять районы по степени защищенности геологической среды, учитывая количество слабопроницаемых толщ в геологическом разрезе. Что касается получения доступной информации о геологическом строении территории, то наиболее оптимальным, видимо, является использование листов Государственной геологической карты СССР масштаба 1:200 000. Ее детальность, с определенными допущениями, можно считать соответствующей региональному уровню исследований.

Была осуществлена пространственная привязка листов карты дочетвертичных отложений и карты четвертичных отложений в программе QGIS для всей территории Москов-

ской области, т.е. была создана основа для составления цифровой карты инженерно-геологического районирования области в соответствии с разработанной типизацией. Проведено апробирование предложенного подхода и составлен рабочий вариант карты районирования для ключевого участка в Дмитровском городском округе и его окрестностях.

Выделение типов четвертичных отложений и их площадного распространения проводилось в соответствии с типизацией (см. табл. 3.4.1) и на основании анализа карты четвертичных отложений, геологических разрезов, схем соотношения четвертичных отложений. В результате был создан в цифровом виде вспомогательный слой – распространение типов четвертичных отложений. Аналогичным образом на основе геологической карты дочетвертичных отложений создан второй вспомогательный слой – распространение типов дочетвертичных отложений (рис. 3.4.3, а, б). Результатом взаимного наложения двух вспомогательных слоев стала карта инженерно-геологического (типологического) районирования, которая дает представление о распространении различных типов грунтовых толщ на исследуемой территории и позволяет судить об изменении защищенности геологической среды по площади (рис. 3.4.3, в).

3.4.3. Оценочное инженерно-геологическое районирование территории Московской области

В территориальную схему обращения с отходами субъектов РФ целесообразно включать окончательную формализованную оценку геологических условий по принципу «пригодные – непригодные» или менее категорично: «благоприятные – неблагоприятные».

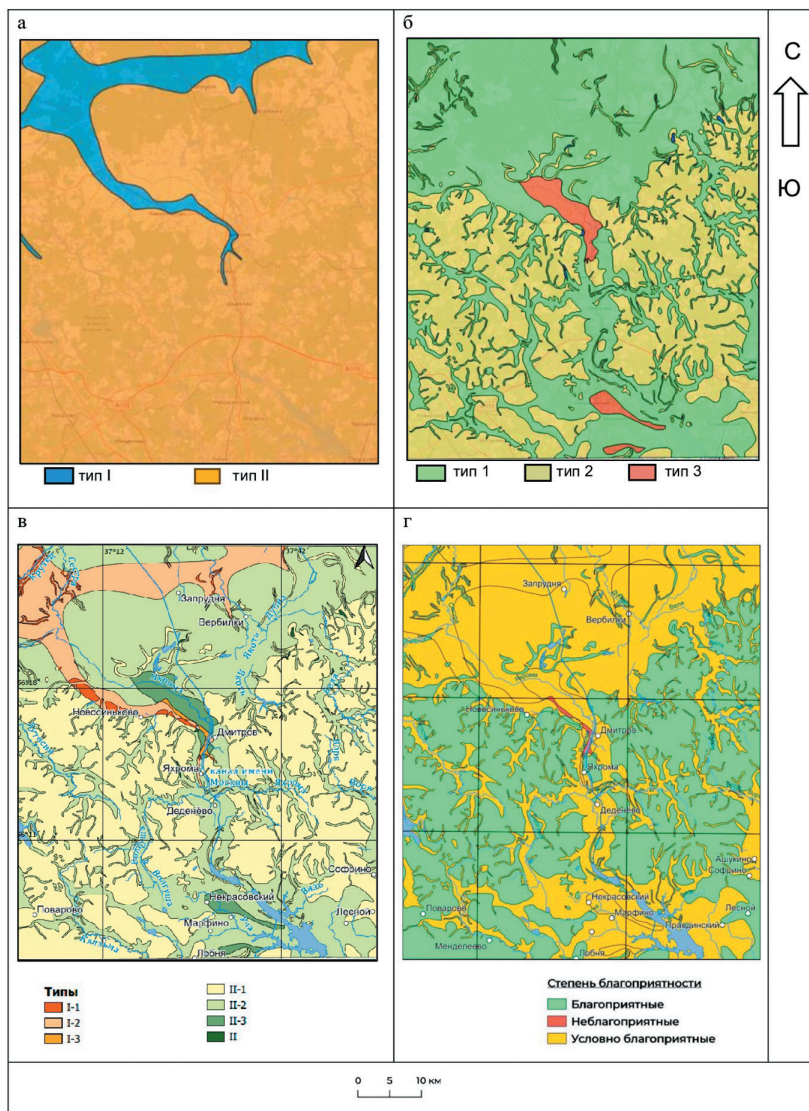


Рис. 3.4.3. Инженерно-геологическое районирование Московской области для размещения полигонов ТКО (репрезентативный участок – Дмитровский городской округ и окрестности):

а – вспомогательный информационный слой «типы дочетвертичных отложений»; б – вспомогательный информационный слой «типы четвертичных отложений»; в – карта типологического районирования; г – карта оценочного районирования.

Условные обозначения см. табл. 3.4.1 и 3.4.2

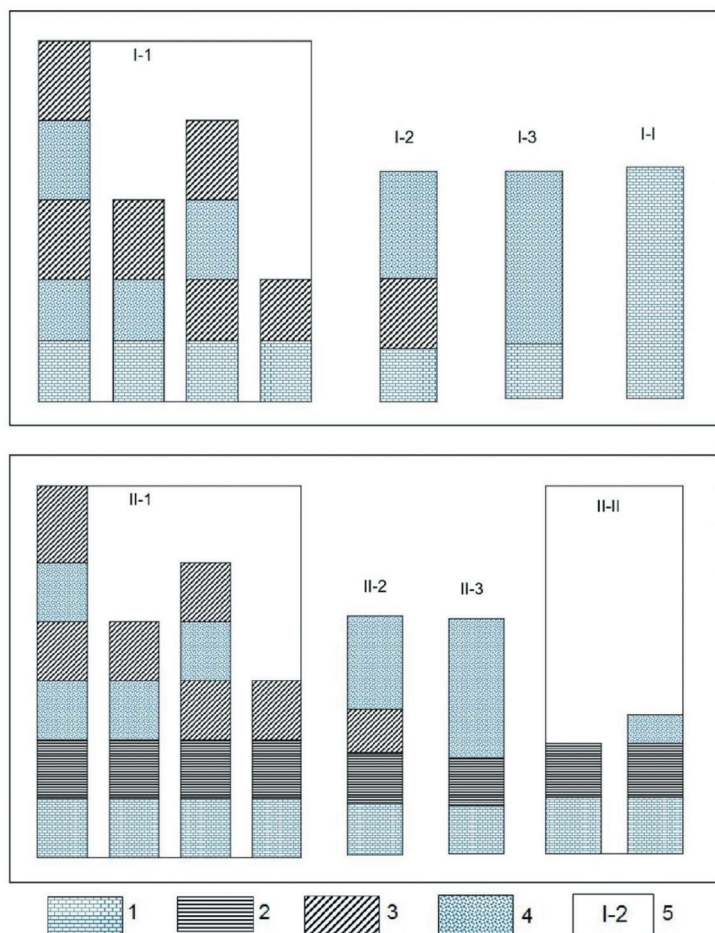


Рис. 3.4.4. Типовые разрезы грунтовых толщ Московской области (Козлякова, Еремина, 2022);

1 — известняки с прослоями глин, доломитов и мергелей, хорошо проницаемые, водоносные и частично обводненные; 2 — глины, слабопроницаемые; 3 — моренные суглинки, слабопроницаемые; 4 — пески, хорошо проницаемые и обводненные; 5 — индекс типа грунтовых толщ

Представление о природной геолого-гидрогеологической обстановке территории могут дать типовые геологические разрезы. Обобщенные литологические колонки для всех типов грунтовых толщ, выделенных при проведении типизации геологической среды, приведены на рис. 3.4.4.

В колонках схематизирован геологический разрез каждого таксона типизации, и до глубины около 50 м показаны разные по водопроницаемости слои. Четвертичные и мезозойские пески представляют собой хорошо проницаемые породы, часто водонасыщенные. Карбонатно-терригенные породы каменноугольного возраста, преимущественно водоносные или хорошо проницаемые. На участках распространения терригенных прослоев такие грунтовые толщи можно характеризовать как неравномерно проницаемые или частично обводненные. К слабопроницаемым породам относят юрские глины и четвертичные моренные суглинки. Юрские глины разделяют четвертичный водоносный горизонт в песках и каменноугольный преимущественно напорный водоносный комплекс в карбонатно-терригенных породах. Моренные суглинки не выдержаны по простиранию и разделяют водоносные горизонты в четвертичных песках различных геолого-генетических комплексов.

Цель оценочного районирования области для размещения ТКО – ранжировать территорию по сложности проведения мероприятий в сфере обращения с отходами. В основу районирования целесообразно заложить не запреты, а *предупреждения для соответствующих органов и компаний о масштабах проблем, с которыми они могут столкнуться, размещая полигоны на том или ином участке*. Выделенные при типизации грунтовые толщи были отнесены к благоприятной, условно благоприятной или неблагоприятной

категориям с позиций оценки условий размещения ТКО (табл. 3.4.2).

Благоприятная категория характерна для участков, где слабопроницаемые толщи залегают с поверхности, что препятствует поступлению загрязнения в четвертичный и каменноугольный водоносный горизонт. То есть можно считать, что здесь геологическая среда в естественных условиях защищена от загрязнения.

Условно благоприятная категория — это участки, где с поверхности залегает мощная хорошо проницаемая песчаная толща. В разрезе присутствует слабопроницаемый слой, но он залегает на достаточно большой глубине и защищает от загрязнения только водоносный горизонт в каменноугольных терригенно-карбонатных породах.

Неблагоприятная категория — участки, в пределах которых отсутствуют выдержанные по простиранию слабопроницаемые толщи моренных суглинков и юрских глин; разрез до глубины 50 м представлен четвертичными песками и карбонатно-терригенными породами каменноугольного возраста.

Площадное расположение территорий различной категории благоприятности для репрезентативного участка показано на карте оценочного инженерно-геологического районирования для размещения полигонов ТКО (рис. 3.4.3, *г*), которая дает представление о возможных сложностях при размещении отходов в том или ином районе, причем не только на участке расположения полигона, но и в его окрестностях. Карта составлена на основе карты типологического инженерно-геологического районирования (рис. 3.4.3, *в*) и оценки степени благоприятности каждого выделенного типа с позиций обращения с ТКО (табл. 3.4.2).

Таблица 3.4.2

Ранжирование территории Московской области по степени благоприятности инженерно-геологических условий для размещения отходов (Козлякова и др., 2024)

Степень благоприятности инженерно-геологических условий (типы грунтовых толщ)	Особенности инженерно-геологических условий
<p>Благоприятные (I-1, II-1, II-II)</p>	<p>В разрезе выделяются одна или две слабопроницаемые толщи пород, залегающие практически с поверхности. Геологическая среда защищена от загрязнения, поступающего с поверхности</p>
<p>Условно благоприятные (I-2, II-2, II-3)</p>	<p>С поверхности залегают четвертичные пески большой мощности, хорошо проницаемые и часто водоносные. Каменноугольный водоносный комплекс отделен от четвертичного водоносного горизонта слабопроницаемым слоем юрских глин и/или четвертичной мореной. Четвертичный водоносный горизонт не защищен от загрязнения с поверхности. В таких условиях сооружение полигона захоронения ТКО требует специальных конструктивных решений</p>
<p>Неблагоприятные (I-3, I-I)</p>	<p>В разрезе выделяются только хорошо проницаемые и водоносные четвертичные пески и/или каменноугольные терригенно-карбонатные породы. Геологическая среда практически не защищена от загрязнения на большей части территорий. При детальных исследованиях возможно выделение участков, где в каменноугольной толще встречаются слои глин достаточной мощности, что может служить обоснованием для перевода участка в более благоприятную категорию</p>

По описанной методике были составлены карты типологического и оценочного районирования для всей территории Московской области в масштабе 1:200 000, которые приведены на рис. 3.4.5—3.4.6. Необходимо отметить, что при типизации и районировании территории области учитывалась изменчивость геологического строения, соответствующая региональному уровню исследований. При выделении районов допускалась определенная генерализация — игнорирование малых выделов, спрямление границ районов. Основой для проведения этих работ стали геологические карты масштаба 1:200 000, которые, в свою очередь, также

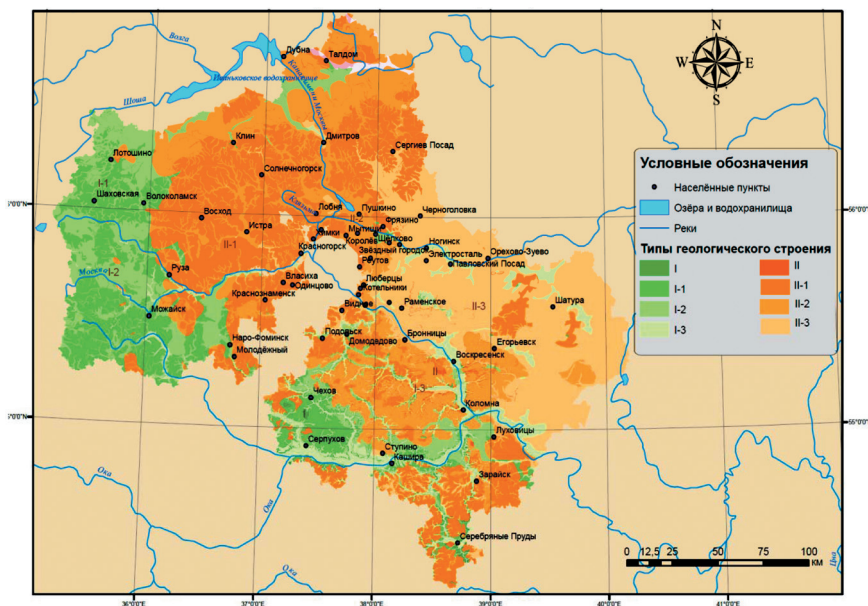


Рис. 3.4.5. Карта типологического инженерно-геологического районирования Московской области, масштаб 1 :200 000.

ИГЭ РАН, 2024

имеют ограниченную точность при проведении геологических границ. То есть при выполнении локальных исследований и уточнении геологического строения категория благоприятности может быть изменена.

Карта оценочного районирования Московской области по благоприятности для размещения объектов ТКО дает представление об особенностях геологической среды для целей обращения с ТКО и о возможности безопасной эксплуатации полигонов в различных районах области.

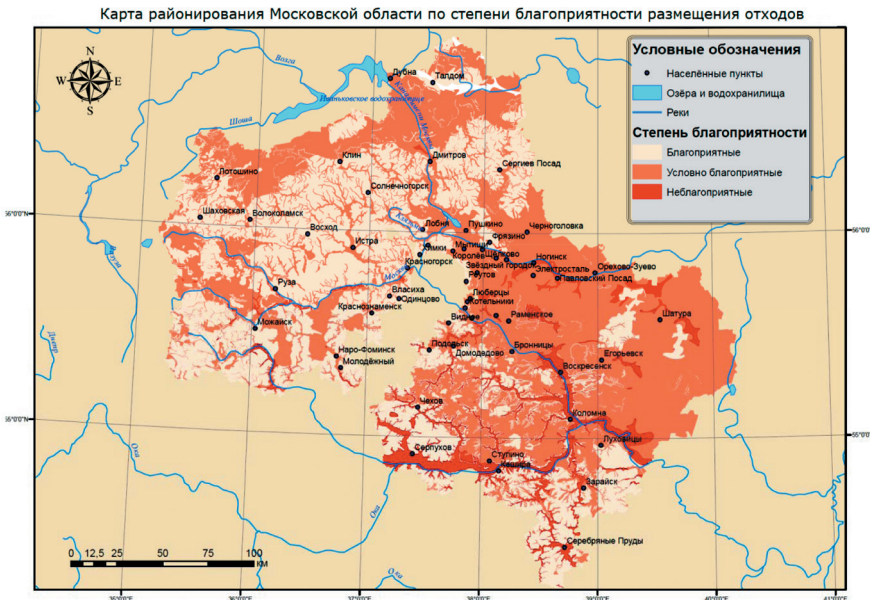


Рис.3.4.6. Карта оценочного инженерно-геологического районирования Московской области по благоприятности геологической среды для размещения объектов ТКО, масштаб 1:200 000. ИГЭ РАН, 2024

Благоприятные для размещения отходов районы находятся преимущественно в северо-западной части области. Это Сергеево-Посадский, Дмитровский, Солнечногорский, Истринский, Рузский, Волоколамский, Шаховской, Можаский районы. В них преобладают территории, благоприятные по геологическим условиям для размещения отходов. Это в основном места поверхностного залегания мощной четвертичной морены. *Условно благоприятные* территории преобладают на востоке и юго—востоке области, где на каменноугольных известняках залегают глины юрского возраста. Это — Шатурский, Егорьевский, Воскресенский, Раменский, Орехово-Зуевский, Ногинский районы. На севере и юге области благоприятные и условно благоприятные районы не выдержаны по площади. Это территории спорадического распространения морены, юрские глины в пределах которых, как правило, размыты. *Неблагоприятные* территории находятся в долинах рек. Это участки разновозрастных эрозионных размылов, где на известняках залегает мощная песчаная толща, как правило, водоносная. При размещении полигонов ТКО таких районов рекомендуется избегать. Это зоны повышенного риска загрязнения геологической среды. Обеспечение экологической безопасности на таких участках требует очень больших экономических затрат.

Таким образом, карта оценочного районирования оперирует категориями благоприятные — неблагоприятные условия и должна быть понятна неспециалисту. Включение такой карты в территориальную схему обращения с отходами позволит увидеть, какие действующие и рекультивируемые полигоны расположены в неблагоприятных условиях и требуют особого внимания для обеспечения геоэкологической безопасности на прилегающих территориях. С другой стороны, карта может использоваться для принятия решений на

региональном уровне по размещению новых полигонов ТКО. Типизация геологической среды Московской области представляет собой формализацию геологического строения. Она предназначена в первую очередь для использования в составе электронной модели (геоинформационной системы) обращения с отходами. Карта составлена в цифровом формате и может легко вписаться в суммарную многокритериальную оценку участка, используемую в электронной модели территориальной схемы обращения с отходами. Объединение в электронной модели информации о геологической среде региона с такими, например, данными, как расположение объектов ТКО, поставит обращение с отходами на территории области на более современный и безопасный уровень.

3.4.4. Применение карты районирования для анализа геологической обстановки в окрестностях полигона ТКО (на примере полигона Непейно)

Типизация территории по пригодности для размещения объектов ТКО представляет собой пространственную информацию о характеристиках геологической среды и должна использоваться на предпроектном этапе работ по размещению объектов обращения с отходами. Но даже если полигон расположен на достаточно благоприятном участке, геологическая среда которого характеризуется естественными защитными свойствами, нельзя полностью исключить риск ущерба от поступления загрязнения с поверхности в геологическую среду (горные породы и подземные воды).

Инженерные изыскания под строительства или рекультивацию полигонов ограничиваются, к сожалению, только участком размещения объекта и глубиной 20–30 м, хотя

изучение геолого-гидрогеологической обстановки на прилегающей территории имеет немаловажное значение. Рассмотрим это на примере полигона Непейно в Дмитровском районе Московской области (Козлякова и др., 2024). Этот полигон расположен в 1,3 км к северу от деревни Непейно, функционирует с 1975 г. и находится в отработанном песчаном карьере. В соответствии с картой оценочного районирования полигон расположен в пределах территории, отнесенной к условно благоприятной категории.

В основании свалочного тела под маломощными средне-четвертичными флювиогляциальными песками здесь залегают отложения московской морены. Они представлены супесями и суглинками с включением гравия и щебня, с линзами песка. Максимальная вскрытая мощность моренных отложений по данным инженерно-геологических изысканий составляет 22 м. Они представляют собой водоупорный слой и разделяют грунтовый безнапорный водоносный горизонт в вышележащих среднечетвертичных флювиогляциальных песках и техногенных грунтах свалочного тела и напорный водоносный горизонт в ниже-, среднечетвертичных озерных и флювиогляциальных песках. То есть, на первый взгляд, на участке полигона существует природный защитный барьер в виде суглинков московской морены, который препятствует поступлению компонентов свалочного фильтрата в глубокие горизонты подземных вод.

Изучение же геологического строения окрестностей полигона показывает следующее: отложения московской морены не имеют выдержанного распространения и выклиниваются менее чем в 1 км от полигона; в 4–5 км к юго-западу от полигона расположен крупный речной доледниковый размыв, вскрывший толщу известняков каменноугольного возраста (рис. 3.4.7).

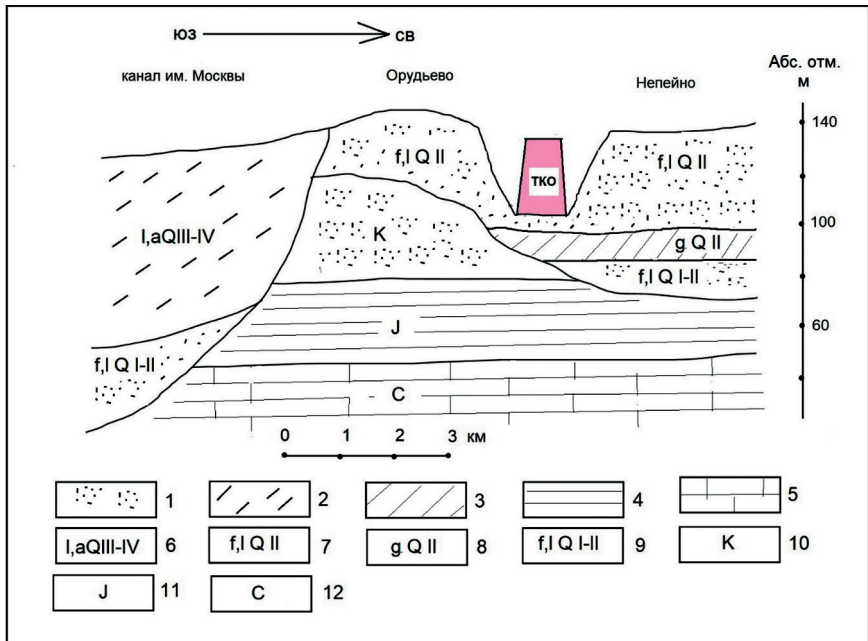


Рис. 3.4.7. Схема геологического строения в окрестностях полигона ТКО Непейно (Козлякова и др., 2024):

- 1 – пески; 2 – песчано-глинистые отложения; 3 – суглинки;
- 4 – глины; 5 – известняки; 6 – верхнечетвертичные, современные озёрно-аллювиальные отложения; 7 – среднечетвертичные флювиогляциальные и озерные отложения;
- 8 – среднечетвертичные ледниковые отложения (московская морена);
- 9 – ниже-, среднечетвертичные флювиогляциальные и озерные отложения; 10 – отложения меловой системы, 11 – отложения юрской системы; 12 – отложения каменноугольной системы

В окрестностях полигона отмечается практически прямая гидравлическая связь грунтового и каменноугольного водоносных горизонтов, т.е. существует достаточно высокий риск поступления компонентов свалочного фильтрата в ка-

менноугольный водоносный горизонт — основной источник питьевого водоснабжения. В таких условиях даже после предстоящего закрытия полигона и при проведении его рекультивации обязательным требованием должно быть осуществление мониторинга химического состава подземных вод не только грунтового, но и более глубоких водоносных горизонтов, вплоть до подземных вод каменноугольных известняков.

Таким образом, карта оценочного инженерно-геологического районирования дает общее представление об особенностях геологической среды для обращения с ТКО на территории субъекта РФ. Она оперирует категориями «благоприятные — неблагоприятные условия» и должна быть понятна неспециалисту. Карта позволяет проектировщикам оценить инженерно-геологические условия грунтового массива не только непосредственно в районе изысканий, но и в его окрестностях. Включение такой карты в территориальную схему обращения с отходами позволит увидеть, какие действующие и рекультивируемые полигоны расположены в неблагоприятных условиях и требуют особого внимания для обеспечения геоэкологической безопасности на прилегающих территориях. С другой стороны, карта может использоваться для принятия решений на региональном уровне по размещению новых полигонов ТКО.

Глава 3.5. Оценка геоэкологической опасности и риска при размещении ТКО на основе оценочного инженерно-геологического районирования для территории ЦФО

(В.Н. Бурова, И.В. Козлякова)

Разработанные принципы районирования платформенных территорий по степени естественной защищенности геологической среды и построенные на их основе карты оценочного районирования могут быть использованы для решения дальнейших задач в разных масштабах исследования — от регионального до локального уровня, связанных с выбором благоприятных мест размещения новых полигонов ТКО, а также для решения задач оценки геологической опасности и природного риска существующих полигонов ТКО и свалок. Ниже рассмотрены методические подходы к применению разработанных принципов районирования для решения таких задач.

Проблема обращения с твердыми коммунальными отходами (ТКО) в современной России включает, с одной стороны, экологически безопасное и экономически эффективное размещение новых предприятий и полигонов утилизации ТКО, с другой стороны, оценку уже существующих полигонов и свалок и возможность их дальнейшего использования или необходимость ликвидации и рекультивации территории.

Как было показано в главе 3.3, нами разработаны методологические принципы ранжирования территорий и проведена типизация административных областей Центрального

Федерального округа России (ЦФО) по степени благоприятности инженерно-геологических условий для размещения объектов обращения с твердыми коммунальными отходами (Козлякова и др., 2020; Козлякова и др., 2021; Осипов, Мамаев, Козлякова, 2020). Типизация выполнена на основании оценки защищенности геологической среды от поступающего с поверхности загрязнения, которая определяется наличием в геологическом разрезе слабопроницаемых толщ четвертичного и дочетвертичного возраста, глубиной их залегания, мощностью и выдержанностью по простиранию. Проведенная типизация является основой для актуального использования оцениваемой территории при размещении ТКО в будущем с минимальными потерями в различных средах: природной, социальной и экономической. При этом, как видно из анализа построенной карты оценочного инженерно-геологического районирования (см. рис.3.3.3), большая часть территории ЦФО по геологическим критериям непригодна для безопасного размещения ТКО без специальных защитных мероприятий.

Однако весьма важно иметь представление также и о том, какую опасность несет в себе современное состояние исследуемых территорий, на которых уже расположены объекты захоронения ТКО, несанкционированные свалки, замусоренные территории, выраженное в показателях риска, как наиболее понятного и специалистам и лицам, принимающим решения. Причем оценка существующих мест складирования отходов или уже законсервированных полигонов не менее важна для обеспечения геоэкологической безопасности, чем выбор мест для размещения новых объектов. Тем более, что старые полигоны и свалки часто формировались стихийно. Инженерно-геологические условия их размеще-

ния никак не учитывались и меры инженерной защиты геологической среды от загрязнения не применялись. Стихийно возникающие свалки и замусоренные территории, не отвечающие нормативным правилам организации и эксплуатации объектов ТКО, представляют собой серьезные источники опасности для окружающей природной среды и социума. По мнению исследователей, их следует расценивать как уже накопленный экологический ущерб (Малышевский, Хабиров, 2012). Но и оборудованные полигоны захоронения ТКО следует рассматривать как природно-технические системы, представляющие угрозу экологической и социальной безопасности и относящиеся к объектам повышенного риска.

Полигоны захоронения ТКО претерпевают значительные изменения за время их существования и развиваются по различным сценариям (Музалевский и др., 2019). Даже при условии прохождения этих сценариев в штатном режиме всегда генерируются многочисленные риски (Блинов, 2014; Мочалова и др., 2017). А.А.Музалевский отмечает, что наиболее опасными по уровню социальных и экологических последствий являются сценарии, связанные с фильтрацией содержимого полигонов в подземные и поверхностные воды, а также с загрязнением атмосферного воздуха. При этом, по мнению автора, опасность представляют как существующие, так и старые засыпанные полигоны (Музалевский и др., 2020).

На основании изложенных выше методологических принципов ранжирования территорий по степени благоприятности геологической среды для размещения полигонов ТКО нами разработана методика сравнительной оценки интегральной природно-техногенной опасности и природно-

техногенно-социального риска от существующих объектов размещения ТКО для условий Центрального федерального округа России (Бурова и др., 2022).

3.5.1. Принципы и подходы к оценке риска

Риск, в соответствии с общепринятым методологическим подходом, существует и оценивается при наличии источника опасности и объекта (реципиента), на который эта опасность воздействует (Осипов, Аникеев и др., 2020). Первоочередная задача сводится к определению источников и реципиентов опасности, а также алгоритма их взаимодействий, т.е. необходимо обозначить определенный уровень информационного описания территории, отвечающий поставленной цели и масштабу исследований.

В качестве конечного таксона оценки риска, связанного с существующими полигонами ТКО, а также санкционированными и несанкционированными свалками, в пределах ЦФО были использованы субъекты округа. В ЦФО входит 17 областей и город федерального значения (Москва). Оценка риска территорий была проведена для областей. На наш взгляд, Москва требует специальных подходов для оценок риска, так как резко отличается от других субъектов и по площади, и по количеству жителей, которые представляют параметры, обуславливающие формирование риска и его оценку.

Для данного исследования, направленного на оценку риска территорий субъектов в пределах ЦФО, информационный уровень (факторы, обуславливающие формирование риска) должны характеризовать как природную, так и техногенно-социальную составляющие исследуемой террито-

рии. Среди этих факторов наиболее значимыми в рамках масштаба исследований (1:2 500 000) представляются следующие:

1. Характеристика территории ЦФО по степени благоприятности инженерно-геологических условий для размещения объектов обращения с ТКО.

2. Данные о полигонах размещения ТКО, несанкционированных свалках, замусоренных территориях. Прежде всего, их количество и места расположения (территории с определенной степенью благоприятности).

3. Данные об опасных процессах, распространенных в пределах таксонов оценки риска, охарактеризованные через их количество и интенсивность проявления, способные приводить к нештатной ситуации в пределах расположения ТКО.

4. Характеристика таксонов оценки риска по плотности населения, как основного объекта, на который воздействует рассматриваемая опасность.

Факторы 1–3 характеризуют потенциальную интегральную природно-техногенную опасность территории, фактор 4 является реципиентом этой интегральной опасности. Исходя из перечисленных выше факторов формирования риска, его можно охарактеризовать, как природно-техногенно-социальный, который представлен в условных единицах (баллах) (Осипов, Аникеев и др., 2020).

Для оценки риска предложенные факторы его формирования необходимо ранжировать по степени значимости и оценить по балльной шкале. Так как у нас нет данных о закономерностях влияния того или иного предложенного фактора формирования риска на величину негативных последствий, предлагается каждому фактору присвоить баллы от 1

до 30 в зависимости от степени его влияния на величину риска, определяемой на основании экспертных предположений. Такой диапазон значений баллов обусловлен значительной разницей влияния факторов на формирование риска.

Анализ *благоприятности инженерно-геологических условий для размещения* полигонов захоронения ТКО, проведенный по разработанной ранее методике районирования территорий (Козлякова и др., 2020; Козлякова и др. 2021; Осипов, Мамаев, Козлякова, 2020), показал, что подавляющая часть территории ЦФО в различной степени неблагоприятна по инженерно-геологическим критериям для размещения ТКО, и поэтому при строительстве полигонов требуется проведение дополнительных мероприятий по защите геологической среды от загрязнения. В пределах многих областей практически нет участков, где грунтовые толщи обладают природными защитными свойствами, препятствующими поступлению загрязнения с поверхности, например, в четырех областях (Белгородская, Курская, Орловская и Тамбовская) более 90% территорий характеризуются отсутствием природных защитных свойств.

Исходя из распределения грунтовых толщ на территории ЦФО, целесообразно при оценках риска разделить территорию субъектов округа (S_0) на две части S_1 и S_2 , относящиеся к территориям с различной степенью благоприятности инженерно-геологических условий для размещения полигонов захоронения ТКО:

S_1 – территории весьма неблагоприятные, неблагоприятные и условно неблагоприятные, которым присвоено 30 баллов;

S_2 – условно благоприятные и благоприятные, им присвоено 10 баллов.

Для дальнейших расчетов были просчитаны площади, относящиеся к различной степени благоприятности в соответствии со схемой, разработанной ранее (табл. 3.5.1).

Таблица 3.5.1

Распределение районов с различной степенью благоприятности инженерно-геологических условий для ЦФО

№ п/п	Наименование субъекта	Площадь субъекта, S_0 , тыс. км ²	Площадь ВН, Н и УН* районов, S_1 , тыс. км ² /%	Площадь УБ, и Б* районов, S_2 , тыс. км ² /%	Суммарные баллы, B_o
1	Белгородская	27.27	26.38/97	0.89/3	29
2	Брянская	34.86	31.14/89	3.72/11	28
3	Владимирская	29.08	24.84/85	4.24/15	27
4	Воронежская	52.09	38.12/73	13.97/27	25
5	Ивановская	21.43	15.40/72	6.03/28	24
6	Калужская	29.70	23.29/78	6.41/22	26
7	Костромская	60.21	50.89/84	9.32/16	27
8	Курская	30.00	29.16/97	0.84/3	29
9	Липецкая	23.98	14.29/60	9.69/40	22
10	Московская	46.81	26.41/56	20.40/44	21
11	Орловская	24.65	22.78/95	1.87/5	28
12	Рязанская	39.61	30.37/77	9.24/23	25
13	Смоленская	49.22	21.30/43	27.92/57	18
14	Тамбовская	34.28	32.26/94	2.02/6	29
15	Тверская	84.00	27.71/33	56.29/67	17
16	Тульская	25.68	10.71/41	14.97/59	18
17	Ярославская	36.20	18.1/50	18.10/50	20

* ВН – весьма неблагоприятные, Н – неблагоприятные, УН – условно неблагоприятные, УБ – условно благоприятные, Б – благоприятные.

Итоговая оценка опасности (*по степени благоприятности*) отдельных административных субъектов ЦФО определяется по формуле:

$$B_0 = \frac{30S_1 + 10S_2}{S_0}.$$

Например, для Белгородской области 97% площади отнесены к весьма неблагоприятным, неблагоприятным и условно неблагоприятным и только 3% – к условно благоприятным: $30 \times 0,97 + 10 \times 0,03 = 29.4$.

На территории ЦФО расположено порядка 500 различных объектов загрязнения в виде полигонов захоронения, свалок и т.п. В настоящее время существует множество документов СанПиН, СНИП, ФЗ 89 и др., регламентирующих устройство и деятельность санкционированных свалок. Анализ объектов захоронения ТКО на территории ЦФО показал, что большинство из них не отвечают современным нормам организации и эксплуатации полигонов ТКО. Предыдущие исследования также подтверждают тот факт, что в России в подавляющем большинстве случаев такие объекты появлялись стихийно в отработанных карьерах, различных выемках, котлованах – без учета природоохранных требований, планировочных ограничений и технологических решений (Абросимов, 2014; Погорелов, Липилин, 2014; Тимофеева и др., 2012). В настоящее время многие полигоны не обеспечивают надлежащей изоляции отходов, и загрязняющие вещества продолжают негативно влиять на окружающую среду и социум (Титова, 2019).

Такое положение позволяет при оценках опасности и риска в масштабе 1:2 500 000 для ЦФО использовать общее количество полигонов, свалок и замусоренных территорий без

учета их соответствия санитарным нормам, фазы их существования и без специальных расчетов интенсивности влияния данных объектов на окружающую среду и социум.

Таким образом, существующие объекты опасности данного рода рассматриваются как источники, способные приводить к максимальным негативным последствиям при условии их размещения в пределах территорий с различной степенью благоприятности инженерно-геологических условий для размещения объектов обращения с ТКО. На основе формализации экспертных представлений о том, что наиболее опасными, т.е. приносящими наибольший вред окружающей среде и социуму представляются несанкционированные свалки, им присваивается в пределах территорий S_1 30 баллов, полигонам захоронения — 20 баллов и замусоренным территориям — 10 баллов. Для объектов загрязнения, расположенных в пределах территорий S_2 , несанкционированным свалкам присваивается 3 балла, полигонам захоронения — 2 балла, и замусоренным территориям — 1 балл (табл. 3.5.2).

Таблица 3.5.2

Распределение различных объектов загрязнения в пределах субъектов ЦФО

№ п/п	Наименование субъекта	Количество существующих объектов размещения ТКО в пределах субъекта, ед./%						Сум- марные баллы, С _о
		S ₁ (баллы)			S ₂ (баллы)			
		НС* (30)	ПТКО (20)	ЗТ (10)	НС (3)	ПТКО (2)	ЗТ (1)	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Белгородская	1/2	18/12	4/3	0	0	0	3.3
2	Брянская	6/12	17/11	5/4	1/4	0	0	6.3
3	Владимирская	2/4	8/5	5/4	0	2/4	0	2.7
4	Воронежская	2/4	15/10	10/8	0	0	0	4.0
5	Ивановская	12/24	11/7	0	11/41	3/5	0	10.0

Окончание табл. 3.5.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
6	Калужская	0	6/4	3/2	3/11	7/12	3/6	1.6
7	Костромская	1/2	6/4	0	0	2/4	0	1.5
8	Курская	1/2	6/4	14/11	0	0	0	2.5
9	Липецкая	1/2	9/6	1/1	1/4	4/8	2/4	2.2
10	Московская	12/24	25/16	56/43	5/18	15/26	32/60	21.8
11	Орловская	0	2/1	0	0	0	0	0.2
12	Рязанская	10/20	12/8	3/2	2/7	3/5	2/4	8.2
13	Смоленская	0	5/3	0	0	10/17	0	0.9
14	Тамбовская	2/4	1/0	2/2	0	0	0	1.4
15	Тверская	0	2/1	15/12	0	2/4	1/2	1.5
16	Тульская	0	2/1	4/3	1/4	2/4	7/13	0.8
17	Ярославская	0	11/7	7/5	3/11	6/11	8/15	2.6

*НС – несанкционированные свалки, ПТКО – полигоны захоронения ТКО, ЗТ – замусоренные территории.

Итоговая балльная оценка опасности *от воздействия объектов загрязнения* рассчитывается по формуле:

$$C_o = 30 \frac{N_{\text{НС}}}{N_1} + 20 \frac{N_{\text{ПТКО}}}{N_2} + 10 \frac{N_{\text{ЗТ}}}{N_3} + 3 \frac{N_{\text{НС}}}{N_4} + 2 \frac{N_{\text{ПТКО}}}{N_5} + 1 \frac{N_{\text{ЗТ}}}{N_6},$$

где $N_{\text{НС}}$, $N_{\text{ПТКО}}$, $N_{\text{ЗТ}}$ – число объектов загрязнения соответствующей категории; $(N_1 - N_3)$ и $(N_4 - N_6)$ – число всех объектов загрязнения соответствующей категории на территориях S_1 и S_2 в пределах ЦФО (см. табл. 3.5.2).

Для примера также рассмотрим Белгородскую область. На ее территории в пределах районов S_1 расположена 1 несанкционированная свалка (2%), 18 (12%) полигонов захоронения отходов и 4 (3%) участка замусоренной территории. Источники опасности в пределах территории S_2 отсутствуют: $30 \times 0,02 + 20 \times 0,12 + 10 \times 0,03 = 3,3$.

Территория ЦФО подвержена воздействию опасных природных процессов, в основном гидрометеорологического генезиса, приводящих к значительным негативным последствиям, связанным с затоплением и подтоплением территорий, разрушением ветхих сооружений и т.п., с соответствующими экономическими потерями. Прежде всего, это сильные ветры, скорость которых достигает 25–30 м/с, сопровождаемые сильными ливневыми дождями, метели и снегопады, а также паводковые явления. В период 1991–2020 гг., согласно разрабатываемой в ИГЭ РАН базе данных о последствиях проявления опасных природных процессов на территории России, количество проявлений перечисленных процессов составило 389 со следующим процентным соотношением: ураганы и ливни – 72%, метели и снегопады – 17%, 8% – паводковые явления (табл. 3.5.3). Эти процессы также могут приводить к нештатной ситуации на полигонах захоронения ТКО в результате увеличения вероятности попадания загрязнений в окружающую среду с вытекающими отсюда негативными последствиями. Последствия от гидрометеорологических процессов отнесены к различным категориям по экономическим и социальным потерям. Умеренная (1) и опасная (2) категории последствий не характеризуются значительными экономическими потерями, но способствуют увеличению поступления загрязняющих веществ с объектов захоронения ТКО в окружающую среду в результате их затопления, подтопления, переувлажнения и т.п.

Следовательно, для оценок опасности территории предлагается рассматривать общее количество проявлений опасных процессов, способных привести к нештатной ситуации на объектах захоронения ТКО. Исходя из частоты проявления процессов разного генезиса им были присвоены соот-

ветствующие баллы: ураганы, ливни — 30, метели, снегопады — 20 и паводки — 10.

Оценка потенциальной опасности по проявлениям опасных процессов (гидрометеорологических) субъекта ЦФО вычисляется по следующей формуле:

$$P_o = 30 \frac{N_{ул}}{N_1} + 20 \frac{N_{МС}}{N_2} + 10 \frac{N_{П}}{N_3},$$

где $N_{ул}$, $N_{МС}$, $N_{П}$ — число проявлений процессов, отвечающих определенному генезу, и N_1, N_2, N_3 — соответственно их общее количество в пределах ЦФО (см. табл. 3.5.3).

Для Белгородской области итоговая оценка выглядит следующим образом: $30 \times 0,04 = 1,2$.

Таблица 3.5.3

Распределение последствий от проявления опасных гидрометеорологических процессов по субъектам ЦФО

№ п/п	Наименование субъекта	Опасные процессы, ед./% (баллы)			Суммарные баллы, P_o
		ураганы, ливни (30)	метели, снегопады (20)	паводки (10)	
1	2	3	4	5	6
1	Белгородская	9/4	0	0	1.2
2	Брянская	13/5	4/6	6/17	4.4
3	Владимирская	16/6	18/28	3/8	8.2
4	Воронежская	23/9	2/3	5/15	4.8
5	Ивановская	12/5	1/2	1/3	2.2
6	Калужская	11/4	6/10	2/5	3.7
7	Костромская	16/6	3/5	4/12	3.1
8	Курская	10/4	1/2	1/3	1.7
9	Липецкая	16/6	2/3	1/3	2.7
10	Московская	29/11	5/7	1/3	14.73

Окончание табл. 3.5.3

1	2	3	4	5	6
11	Орловская	13/5	1/2	3/7	2.6
12	Рязанская	15/6	9/14	1/3	4.9
13	Смоленская	22/9	2/3	1/3	3.6
14	Тамбовская	5/2	1/2	3/8	1.8
15	Тверская	17/7	5/7	2/5	4.0
16	Тульская	14/5	2/3	2/5	2.6
17	Ярославская	12/5	0	0	1.5

3.5.2. Оценка природно-техногенно-социального риска ЦФО России

Интегральная оценка опасности характеризует потенциальную возможность негативных последствий от объектов захоронения ТКО в различных их проявлениях на исследуемой территории (табл. 3.5.4). Для получения балльной оценки интегральной опасности ($O_{\text{инт}}$) были просуммированы балльные значения B_o , C_o , P_o , полученные для каждого субъекта ЦФО (табл. 3.5.1–3.5.3).

Интегральная опасность исследуемой территории изменяется от 21,4 (Тульская область) до 57,5 баллов (Московская область). Данный разброс значений было предложено разделить на 5 интервалов, соответствующих различным категориям опасности: 1 – небольшая (< 25 баллов), 2 – средняя (25–35), 3 – значительная (35–45), 4 – большая (45–55), 5 – огромная (> 55) (см. табл. 3.5.4, рис. 3.5.1).

Как видим, к территориям с категорией опасности «огромная» относится Московская область, территорий с категорией опасности «большая» в пределах ЦФО нет. Категория опасности «значительная» присуща Брянской, Владимирской, Ивановской, Рязанской и Тамбовской областям. Наиболее спокойны по степени опасности Белгородская,

Воронежская, Калужская, Костромская, Курская, Липецкая и Орловская области (2 «средняя» категория). Смоленская, Тверская, Тульская и Ярославская области являются наиболее благоприятными и соответствуют 1 категории «небольшой» опасности.

Таблица 3.5.4

Расчетные условные значения риска субъектов ЦФО

№ п/п	Наименование субъекта	Интегральная опасность, $O_{\text{инт}}$, баллы	Категория опасности	Плотность населения, чел./ км ²	Условная стоимость балла, r_i	Условное значение риска, R_i	Категория риска
1	Белгородская	33.5	2	57.00	3.4	113.9	3
2	Брянская	38.7	3	34.43	3.2	123.8	3
3	Владимирская	37.9	3	46.96	2.8	106.1	3
4	Воронежская	33.8	2	44.58	2.6	87.9	3
5	Ивановская	36.2	3	46.84	2.8	101.4	3
6	Калужская	31.3	2	33.90	2.0	62.6	2
7	Костромская	31.6	2	10.58	0.6	19.0	1
8	Курская	33.2	2	36.90	2.2	73.0	2
9	Липецкая	26.9	2	47.57	2.8	75.3	3
10	Московская	57.5	5	169.00	10	575	5
11	Орловская	30.8	2	30.00	1.8	55.4	2
12	Рязанская	38.1	3	28.13	1.7	64.8	2
13	Смоленская	22.5	1	18.93	1.1	24.7	1
14	Тамбовская	32.2	3	29.48	1.7	54.7	2
15	Тверская	22.5	1	15.08	0.9	20.3	1
16	Тульская	21.4	1	57.59	3.4	72.8	2
17	Ярославская	24.1	1	34.82	2.1	50.6	2

Формирование и оценка природно-техногенно-социального риска исследуемой территории обусловлены взаимосвязями источника опасности и реципиента. В данном случае источник опасности — это совокупность первых трех факторов информационного уровня формирования риска, представленных выше, и выраженная через сумму баллов ($O_{\text{инт}}$), присвоенных каждому фактору (природно-техногенная составляющая), а реципиент — население (социальная составляющая).

Если исходить из общих методологических подходов к оценке риска, основанной на стоимостной оценке балла, рассчитываемой из среднесноголетних потерь от опасностей определенного генезиса на определенной площади, то *условная стоимость балла может быть принята для каждого административного района с учетом плотности населения*. Плотность населения рассматриваем как основной индикатор, характеризующий освоенность, а соответственно и техногенную нагруженность территории, т.е. как основной реципиент, обобщающий в косвенном виде возможные негативные последствия от интегральной опасности территории. Совершенно очевидно, что чем больше плотность населения, тем больше вероятность негативных последствий от источников загрязнения на окружающую среду и социум при прочих равных условиях. Такой подход к оценке риска территорий от различных источников загрязнения ТКО осуществляется впервые.

Если принять условную стоимость 1 балла в пределах территорий с максимальной плотностью населения (Московская область, 169 чел./км²) за некоторое количество условных единиц (r), то стоимость 1 балла в пределах других районов (r_i) можно рассчитать по формуле:

$$r_i = r \frac{A_i}{A_m},$$

где A_i , A_m — плотность населения в каждом административном субъекте и максимальная плотность населения (Московская область) соответственно.

Принимая условие, что 1 балл опасности в пределах Московской области имеет условную стоимость в 10 единиц, то стоимость балла в остальных субъектах ЦФО соответственно имеет значения, указанные в табл. 3.5.4.

Соответственно оценку условного природно-техногенно-социального риска для каждой из областей получаем из выражения:

$$R_i = r_i \times O_{\text{инт.}}$$

Интервал полученных условных значений риска изменяется от 19 баллов (Костромская область) до 575, который правомерно разделить на 5 категорий риска аналогично выделенным категориям опасности территорий: 1 — небольшой (< 25); 2 — средний (25–75); 3 — значительный (75–150); 4 — большой (150–300); 5 — огромный (> 300).

Полученные расчетные данные природно-техногенно-социального риска субъектов ЦФО отражены на карте-схеме (рис. 3.5.2). Как видим, наибольший риск (огромный — 5 категория) как и интегральная опасность (5) характерны для Московской области. Категория большого риска (4) и большой опасности (4) на территории ЦФО отсутствует. Сохранилось соответствие значительной категории опасности и риска и для Брянской, Владимирской и Ивановской областей; средней категории опасности и риска (2) — для Калужской, Курской и Орловской областей; а небольшая категория опасности и риска (1) — для Смоленской и Тверской.

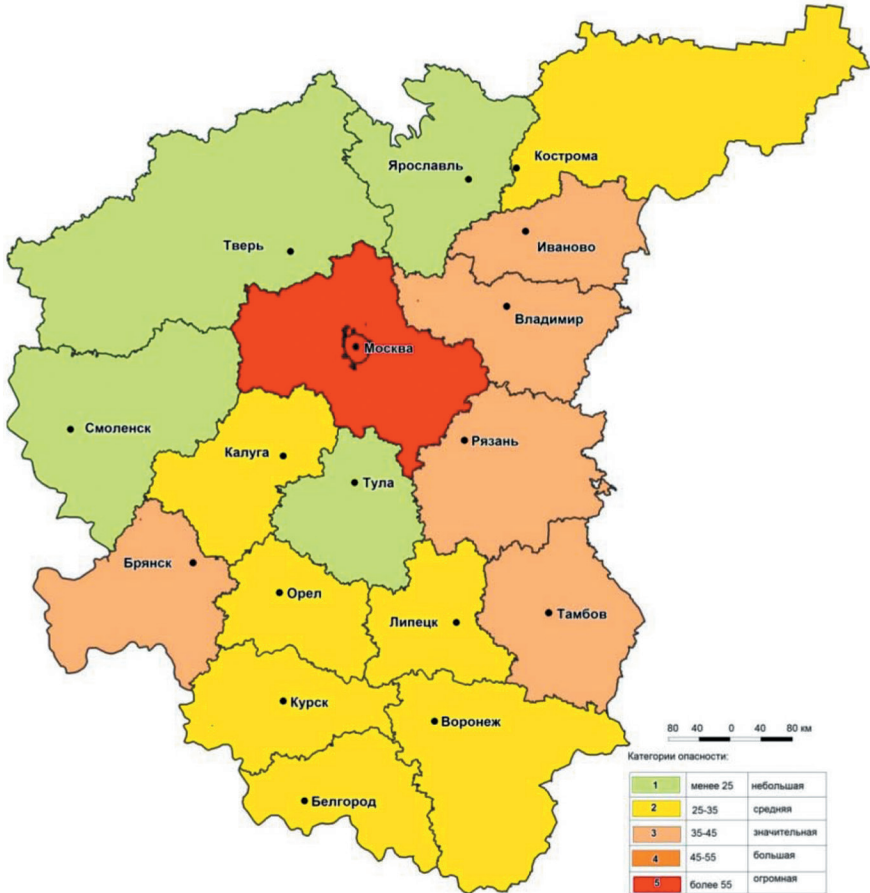


Рис. 3.5.1. Карта-схема природно-техногенной опасности ЦФО

В остальных областях картина выглядит иначе. В Белгородской, Воронежской и Липецкой областях категории риска выше, чем категории интегральной опасности – категория опасности соответствует средней (2), а категория риска – значительной (3). В Тульской и Ярославской областях категория опасности небольшая (1), категория риска – средняя (2).

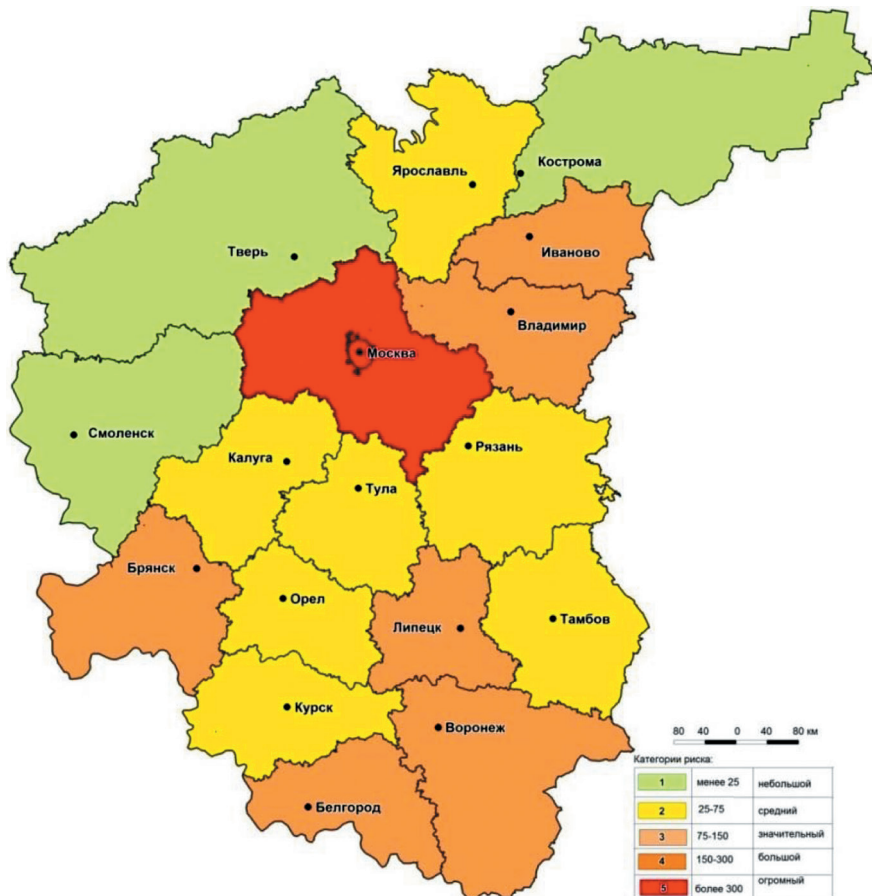


Рис. 3.5.2. Карта-схема природно-техногенно-социального риска ЦФО

В Рязанской и Тамбовской областях произошло уменьшение категории риска по отношению к категории опасности от значительной (3) до средней (2), а в Костромской области – от средней категории опасности (2) до небольшой категории риска (1).

Таким образом, выполненная **сравнительная качественная оценка геологического риска** как величины вероятного экономического и социального ущерба от негативного воздействия объектов ТКО на геологическую среду для каждой из 17 областей на основании таких критериев, как доля неблагоприятных районов от общей площади территории области; число объектов ТКО, расположенных в этих районах; плотность населения и инфраструктурная нагрузка, представляет несомненную ценность. Такая экологическая оценка носит обзорный характер и предназначена для органов федерального управления, планирующих инвестиции в решение проблемы утилизации и захоронения отходов в России. Она позволяет определить приоритетные направления финансовых вложений.

Возможно, какие-то полигоны могут быть реконструированы в соответствии с современными требованиями экологической безопасности. В то же время геологическая среда отдельных районов может быть настолько загрязнена в результате бесконтрольного использования под складирование ТКО, что потребуются специальные ограничения на использование территории даже после закрытия и рекультивации полигона или свалки. Необходимо установление ограничений на использование и расширение существующих объектов ТКО, расположенных в неблагоприятных по геологическим критериям районах. Требуется разработка технологии рекультивации полигонов и свалок, расположенных на неблагоприятных территориях.

При этом предложенный метод оценки интегральной опасности и риска дает не только представление о текущей ситуации на исследуемых территориях, но и позволяет опре-

делять последствия изменения некоторых факторов риска. А именно к каким последствиям может привести изменение таких составляющих, как тип, количество и расположение источников загрязнения, а также изменение количества жителей в регионе.

Предложенный подход может быть использован при оценках риска для более крупных масштабов исследования, но с соответствующим увеличением количества факторов и информационного пространства.

Глава 3.6. Комплексная поэтапная оценка инженерно-геологических условий платформенных территорий при исследованиях на региональном и локальном уровнях для размещения полигонов ТКО

(В.И. Осипов, О.Н.Еремина, И.В.Козлякова, Ю.А. Мамаев)

Помимо оценки опасности и риска территорий от существующих полигонов ТКО в мелком масштабе, разработанные принципы районирования платформенных территорий по степени естественной защищенности геологической среды и построенные на их основе карты оценочного районирования могут быть использованы для решения дальнейших задач, связанных с выбором благоприятных мест размещения полигонов ТКО в разных масштабах исследования. Такие задачи должны решаться на основе комплексной оценки инженерно-геологических условий территорий на региональном уровне, и далее, в более крупном масштабе, путем сравнительной оценки инженерно-геологических условий конкретных грунтовых массивов при исследованиях на локальном уровне. Мелкомасштабная карта оценки грунтовых условий ЦФО служит в этом случае основой для комплексной региональной оценки благоприятности инженерно-геологических условий платформенных территорий для размещения полигонов ТКО с учетом комплекса природных факторов.

В целом разработанная методика поэтапной картографической оценки геологической среды по ее пригодности для размещения объектов ТКО в наглядной форме может быть представлена в виде блок-схемы (рис. 3.6.1).

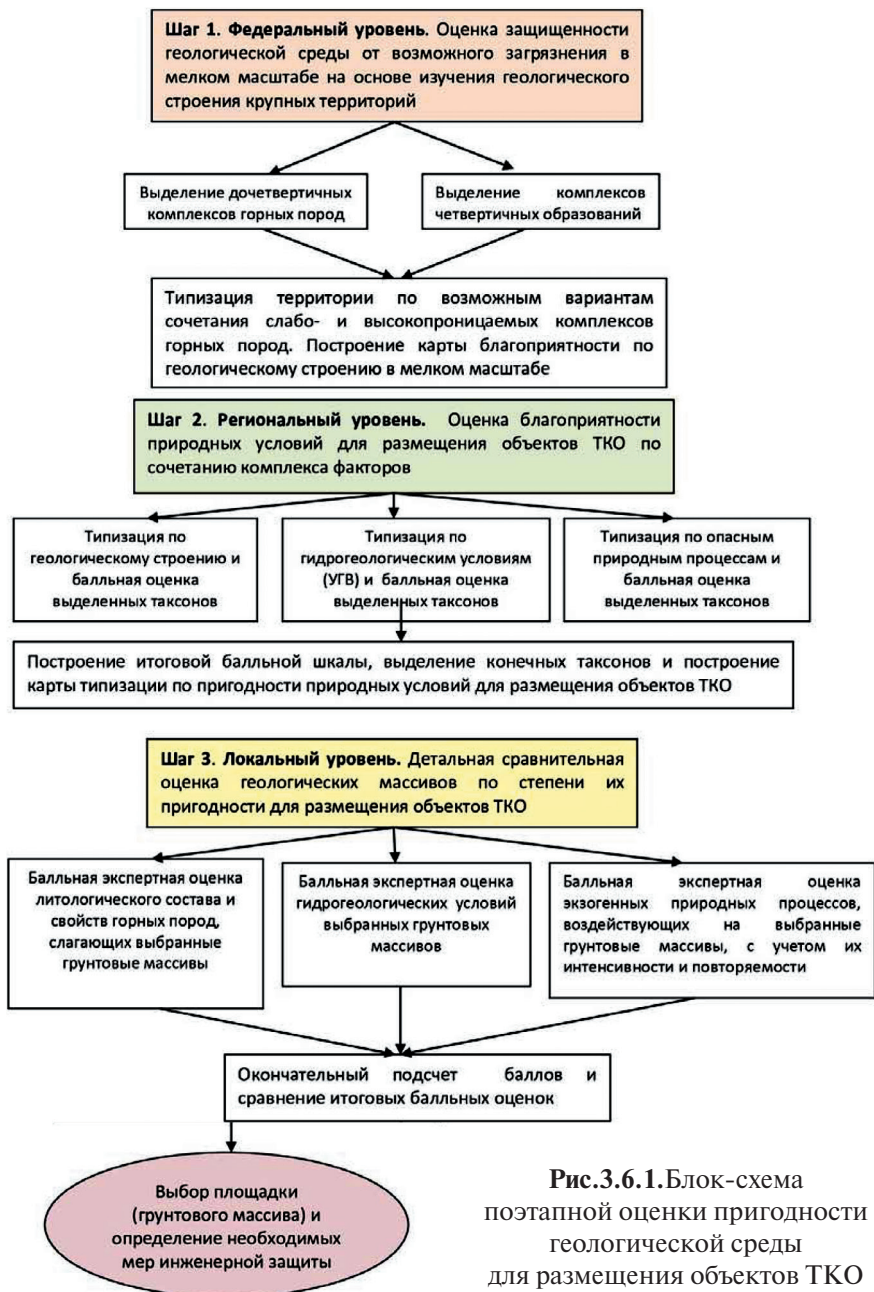


Рис.3.6.1. Блок-схема поэтапной оценки пригодности геологической среды для размещения объектов ТКО

3.6.1. Комплексная региональная оценка инженерно-геологических условий платформенных территорий для размещения полигонов ТКО на примере Владимирской области

Как указывалось выше, при захоронении ТКО природные геологические барьеры играют важную роль, так как они изолируют отходы от биосферы на многие десятки лет до полного их разложения. От эффективности работы геологических барьеров зависит необходимость и масштаб применения инженерных барьеров, что существенно влияет на стоимость сооружения безопасных полигонов ТКО. Эффективность геологических барьеров для изоляции ТКО зависит от всего комплекса инженерно-геологических условий территории, всесторонний адекватный учет которых требует разработки специальной методологической базы для поиска подходящих участков геологической среды.

На региональном этапе исследований по выбору перспективных участков для размещения полигонов ТКО проводятся типизация и последующее районирование выбранных территорий в более крупном масштабе с учетом всего комплекса инженерно-геологических условий: геологического строения, гидрогеологических условий и возможного развития опасных экзогенных процессов и явлений. Рассмотрим такую типизацию на примере одной административной части ЦФО — Владимирской области. Такой выбор обусловлен несколькими причинами. С геологической точки зрения территория этого региона, расположенная в пределах Восточно-Европейской платформы, характеризуется типичными для платформенных областей инженерно-геологическими условиями, здесь развит весь спектр природных процессов, свойственных равнинным территориям, что

важно для решения поставленных задач. С социально-экономической точки зрения Владимирская область — один из наиболее густонаселенных и экономически развитых регионов ЦФО РФ, расположенный на пересечении транспортных коридоров федерального значения, связывающих столичный регион с восточными частями страны, что обуславливает ее огромное транспортно-логистическое значение. Кроме того, здесь сосредоточено большое количество древних памятников истории, архитектуры и культуры, в том числе объектов культурного наследия ЮНЕСКО, а также особо охраняемых природных территорий и заказников. Эти обстоятельства предполагают особо тщательный подход к выбору мест расположения полигонов ТКО на основе комплексной оценки всего спектра условий.

С географической точки зрения территория Владимирской области находится в центре Восточно-Европейской равнины и занимает площадь 29,084 тыс. кв. км (Геология СССР, т. 4, 1971). Основная часть территории — слабо всхолмлённая равнина с общим понижением от Клинско-Дмитровской гряды (высоты до 271 м) на севере через Владимирское Ополье (высота до 236 м), далее на юг к Мещёрской низменности (преобладающая высота 120 м) и на восток через Окско-Цнинский вал (до 184 м) и Гороховецкий отрог (верхняя точка — 191 м) к Балахнинской низменности (около 90 м) и устью Клязьмы (67 м). Главные реки области — Клязьма и Ока. Кроме них по территории протекают сотни больших и малых рек, их количество вместе с ручьями доходит до 560. Реки имеют равнинный характер течения; широкие долины и меандрирующие русла. Насчитывается около 300 озёр, многие из которых имеют ледниковое, пойменное и старичное (в долинах Оки и Клязьмы) происхождение, на востоке встречаются карстовые озёра.

В геологическом отношении Владимирская область входит в пределы восточной части Московской синеклизы древней Восточно-Европейской платформы. В восточной части области субмеридионально протягивается Окско-Цнинский вал, проявленный в каменноугольных отложениях платформенного чехла, представленных преимущественно карбонатными породами. На территории Владимирской области повсеместно распространены четвертичные ледниковые, водно-ледниковые, эолово-делювиальные, озёрно-речные и болотные отложения, перекрывающие более древние каменноугольные, пермские, триасовые, юрские, меловые и палеоген-неогеновые отложения платформенного чехла.

Грунтовые воды на значительных участках Мещерской низменности, в поймах крупных рек залегают на глубинах < 2 м от поверхности. Обширные территории, особенно на юге и юго-востоке области являются подтопленными и заболоченными. Основные экзогенные геологические процессы, которые необходимо учитывать при выборе мест захоронения ТКО, включают: подтопление, заболачивание, затопление пойм рек в половодья, русловую и пойменную эрозию, оврагообразование, оползни на берегах рек, переработка берегов, сульфатный и карбонатный карст (Геология СССР, т. 4, 1971; Инженерная геология СССР, т. 1, 1978).

Оценка грунтовых условий Владимирской области в целях размещения объектов ТКО выполнена аналогично методике мелкомасштабного картирования на основе типизации грунтовых толщ в зависимости от наличия в разрезе до глубины 50 м дочетвертичных и четвертичных комплексов пород пониженной проницаемости, способных защитить геологическую среду от загрязнения, поступающего с поверхности. Типы грунтовых массивов для заданных целей районирования получены из сочетания выделенных комплексов дочетвертичных и четвертичных отложений (табл. 3.6.1).

Таблица 3.6.1

**Типизация грунтовых толщ, встречающихся на территории
Владимирской области, по благоприятности для размещения ТКО**

Четвертичные отложения Дочетвертичные отложения	Пески, переслаивание песков и моренных суглинков	Пески	Моренные суглинки, переслаивание песков и суглинков
	1	2	3
I Преимущественно пески и песчаники (К, Pg, N) водоносные	Неблагоприятные (I-1)	Неблагоприятные (I-2)	Условно благоприятные (I-3)
II Преимущественно глины (J) водоупорные	Благоприятные (II-1)	Не встречаются	Не встречаются
III Аргиллиты, алевролиты, песчаники, местами загипсованные, гипс (P-T) слабоводоносные и неравномерно обводненные	Благоприятные (III-1)	Условно благоприятные (III-2)	Не встречаются
IV Известняки, доломиты с прослоями глин (D-C) водоносные	Условно благоприятные (IV-1)	Неблагоприятные (IV-2)	Условно благоприятные (IV-3)

Среди дочетвертичных отложений выделены: слабопроницаемые глинистые толщи юрского возраста; алевролит-аргиллитовые загипсованные породы и гипсы пермского и триасового возраста; хорошо проницаемые пески и песчаники неогенового, палеогенового и мелового возраста, а также терригенно-карбонатные породы девона и карбона. При подразделении четвертичных толщ учитывались наличие и положение в разрезе слабопроницаемых суглинков различных генетических типов. Основной слабопроницаемый комплекс пород среди четвертичных образований представлен моренными суглинками. Выделены территории, где эти суглинки залегают с поверхности и под аллювиальными и водно-ледниковыми песками, а также территории, где покровные суглинки и супеси, местами слабоводоносные или неравномерно обводненные, имеют значительное распространение и мощность.

В соответствии с этой типизацией составлена карта-схема районирования области по благоприятности размещения полигонов ТКО (рис. 3.6.2). На схематической карте видно распределение благоприятных, условно благоприятных и неблагоприятных районов по геологическому строению на территории Владимирской области.

Благоприятные территории расположены в восточной половине области, где грунтовый массив преимущественно глинистый.

К условно благоприятным отнесены территории:

- в пределах которых достаточно мощные толщи слабопроницаемых пород встречаются только среди четвертичных или только среди дочетвертичных комплексов, представленных хорошо проницаемыми и водоносными песками и песчаниками мелового, палеогенового и неогенового возраста; они широко распространены на северо-западе области в пределах Владимирского Ополья;
- сложенные слабоводоносными и неравномерно обводненными алевролитами, аргиллитами и песчаниками пермского и триасового возраста, перекрытые четвертичными песками; этот тип геологического строения встречен в долине р. Оки и некоторых других рек.

Грунтовые условия, в пределах которых четвертичные суглинки и суглинки с прослоями песков залегают непосредственно на девонских и каменноугольных известняках, выделены в пределах Окско-Цнинского вала в центральной части области.

Неблагоприятные территории распространены у восточной границы и на юго — западе области, где весь грунтовый массив сложен хорошо проницаемыми песчаными толщами и трещиноватыми карбонатными породами.

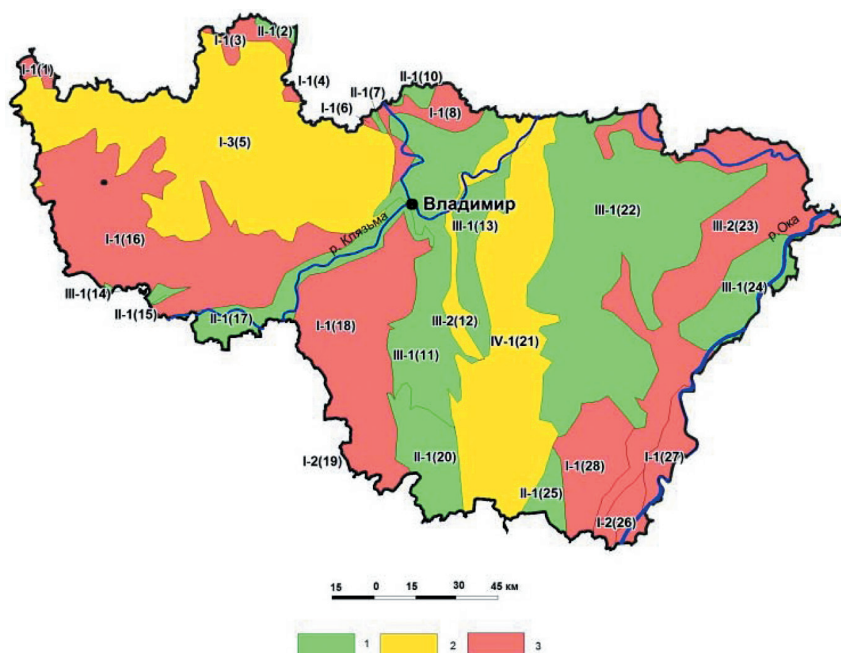


Рис. 3.6.2. Карта-схема благоприятности территории Владимирской области для размещения ТКО по грунтовым условиям. Условные обозначения см. табл. 3.6.1. Цифры в скобках — номера районов

Далее, в развитие изложенной выше методики оценки благоприятности территории по типам геологического строения, для более детального исследования природных условий на региональном уровне проводится укрупненный анализ территории области по основным геоморфологическим, гидрогеологическим и геодинамическим признакам. Выделено 28 районов, каждый из которых оценен по трем факторам: грунтовые условия, уровень залегания первого от поверхности горизонта подземных вод и опасные природные процессы.

Анализ первого фактора — геологического строения массива грунта — позволяет оценить изолирующие свойства пород и их способность играть роль природных геологических барьеров, препятствующих распространению загрязнений. На основе второго фактора (гидрогеологические условия) оценивается объективная возможность контакта предполагаемого проектируемого объекта ТКО с подземными водами. Третий фактор отражает вероятность нарушения экологической безопасности объектов ТКО в результате развития опасных природных процессов; в рассматриваемых платформенных условиях к ним относятся: затопление, подтопление, заболачивание, эрозия, оврагообразование, карсто-суффозионные процессы и оползни. Оценка вклада указанных факторов в итоговый показатель пригодности инженерно-геологических массивов для размещения объектов ТКО производится на балльной основе. Для каждого фактора составлена шкала баллов, позволяющая учитывать его значимость (вес) при расчете критерия оценки. Балльная шкала разработана на основе экспертных оценок составителей карты (табл. 3.6.2).

Строение грунтового массива представляет собой решающий фактор обеспечения безопасности объекта ТКО за счет формирования геологического барьера, препятствующего распространению загрязнения. Оценивая максимальную интегральную величину защитных свойств геологической среды в 100 баллов, примем условно, что вклад фактора геологического строения в эту величину может достигать 90 баллов (см. табл. 3.6.2).

Гидрогеологические условия, обуславливающие возможный контакт объекта ТКО с грунтовыми водами и распространение загрязняющих веществ в геологической среде,

для задач, решаемых в настоящем исследовании, были формализованы по глубине залегания грунтовых вод. В зависимости от наличия водоносного горизонта в среде, вмещающей объект ТКО, и расположения УПВ (выше или ниже главного геологического барьера — толщи глинистых пород, являющейся основанием полигона), выделены 3 категории, каждой из которой присвоены соответствующие понижающие или повышающие баллы по отношению к баллам, присвоенным данному участку по грунтовым условиям.

Таблица 3.6.2

Шкала баллов для оценки грунтовых и гидрогеологических условий, а также природных процессов на участках размещения объектов ТКО при региональном (среднемасштабном) районировании

Категория благоприятности грунтовых условий	Факторы районирования	Балл
	Благоприятные	90
	Условно благоприятные	60
	Неблагоприятные	20
Глубина залегания УПВ	Отсутствие подземных вод в зоне объекта ТКО (> 10 м)	+10
	УПВ в зоне объекта ТКО, но ниже основного геологического барьера (> 5 м)	0
	УПВ выше основного геологического барьера (< 5 м)	-10
Природный процесс	Затопление поймы паводковыми водами	30
	Подтопление, заболачивание	30
	Русловая и пойменная эрозия, оврагообразование	10
	Склоновые процессы	10
	Карст	5

Исходя из геоморфологического положения участков, оценивалась возможность проявления: заболачивания, подтопления, затопления поймы паводковыми водами, русловой и пойменной эрозии, овраго- и оползнеобразования. С учетом литологического состава пород и строения геологического разреза, а также имеющихся сведений о наличии карстово-суффозионных провалов оценивалась возможность развития сульфатного и карбонатного карста (Геология СССР, т. 4, 1971; Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаб 1:1000 000, 1999; Инженерная геология СССР. Т. 1, 1978). Все эти позиции также выражались в понижающих баллах, присваиваемых участку (см. табл. 3.6.2). Значения баллов присваивались на основании общих сведений о площади, подверженной развитию того или иного процесса, его интенсивности (разрушительной силы) и повторяемости. В случае развития на одном участке нескольких опасных процессов баллы либо суммировались, либо участку присваивался балл по наиболее опасному процессу исходя из общих экспертных оценок.

При расчете суммарного балла и назначении итоговой категории пригодности участка принималось во внимание, что такие процессы, как подтопление и заболачивание территории, также учтены при расчете гидрогеологического фактора (глубина залегания УПВ < 5 м), а области возможного развития карстово-суффозионных процессов приурочены к распространению карбонатных и сульфатных массивов, которые учтены при расчете фактора благоприятности по грунтовым условиям. Отрицательные значения интегрального балла, как не имеющие физического смысла, приравнивались к нулю. Приняты условные интервалы суммарных баллов, определяющие итоговую оценку пригодности

территории для размещения ТКО по комплексу природных условий (табл. 3.6.3).

Таблица 3.6.3

**Шкала суммарных баллов для оценки пригодности территорий
для размещения объектов ТКО при региональном
(среднемасштабном) районировании**

Категория природных условий	Интервал суммарных баллов
Пригодные (П)	80-100
Условно пригодные (УП)	50-80
Условно непригодные (УН)	20-50
Непригодные (Н)	<20

На основании разработанной методики произведена оценка пригодности природных условий Владимирской области (табл. 3.6.4). Выделенные районы нанесены на итоговую карту районирования (рис. 3.6.3).

Из анализа построенной схематической карты видно, что идеальные условия для размещения отходов (100 баллов) отсутствуют в изученном регионе. При этом почти половина территории области относится к категории непригодных и условно непригодных условий для размещения ТКО. Непригодные области в основном приурочены к заболоченным и подтопленным местам с высоким положением УПВ, пойменным частям долин Клязьмы, Оки и их притоков. Обращает внимание, что наличие в разрезе глинистых водоупоров хотя и делает участок благоприятным с точки зрения строения геологического разреза, однако при этом зачастую способствует развитию заболачивания и подтопления, что существенно понижает общую категорию пригодности территории. Субмеридиональная полоса Окско-Цнинского вала, к которой приурочено неглубокое залегание карстующихся карбонатных пород, также попадает в непригодную категорию для размещения объектов ТКО. Наиболее при-

годными по природным условиям представляются равнинные увалистые плато Владимирского Ополья на северо-востоке и в центральной части области, характеризующиеся присутствием моренных суглинков в литологическом разрезе, глубоким положением УПВ и незначительным развитием опасных природных процессов.

Таблица 3.6.4

Комплексная оценка пригодности территорий по природным условиям для размещения ТКО

№ района	Индекс по грунтовым условиям	Категория благоприятности по грунтовым условиям	Балл по грунтовым условиям	Глубина залегания УПВ, м	Балл по УПВ	Опасные процессы	Балл по процессам	Общий балл	Общая категория пригодности
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	I-1	Н	30	>10	+10	Нет	0	40	УН
2	III-1	Б	90	>5	0	Русловая и пойменная эрозия	-10	80	П
3	I-1	Н	30	>10	+10	Нет	0	40	УН
4	I-1	Н	30	>10	+10	Нет	0	40	УН
5	I-3	УБ	60	>10	+10	Русловая и пойменная эрозия, локально оврагообразование	-20	50	УП
6	I-1	Н	30	>10	+10	Нет	0	40	УН
7	III-1	Б	60	>5	0	Русловая и пойменная эрозия	-10	50	УП
8	I-1	Н	30	<5	-10	Русловая и пойменная эрозия	-10	10	Н
9	I-1	Н	30	<5	-10	Русловая и пойменная эрозия	-10	10	Н
10	III-1	Б	90	>5	0	Нет	0	90	П
11	IV-1	Б	90	>10	+10	Эрозия, локально оврагообразование	-20	80	П

Продолжение табл. 3.6.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
12	IV-2	УБ	60	<5	-10	Русловая и пойменная эрозия	-10	40	УН
13	IV-1	Б	90	<5	-10	Русловая и пойменная эрозия	-10	70	УП
14	III-1	Б	90	<5	-10	Затопление, заболачивание	-40	40	УН
15	III-1	Б	90	<5	-10	Затопление, заболачивание	-40	40	УН
16	I-1	Н	30	>5	0	Русловая и пойменная эрозия, возможно оврагообразование	-20	10	Н
17	III-1	Б	90	<5	-10	Русловая и пойменная эрозия, затопление, заболачивание	-70	10	Н
18	I-1	Н	30	<5	-10	Русловая и пойменная эрозия, местами заболачивание	-40	0	Н
19	I-2	Н	30	<5	-10	Затопление, заболачивание	-40	0	Н
20	III-1	Б	90	<5	-10	Затопление, заболачивание	-40	40	УН
21	V-1	УБ	60	<5	-10	Русловая и пойменная эрозия, местами заболачивание	-40	10	Н
22	IV-1	Б	90	>10	+10	Эрозия, локально оврагообразование	-20	80	П
23	IV-2	УБ	60	<5	-10	Затопление поймы, заболачивание, русловая и пойменная эрозия	-70	0	Н
24	IV-1	Б	90	<5	-10	Затопление поймы, заболачивание, русловая и пойменная эрозия	-70	20	Н
25	III-1	Б	90	>5	0	Русловая и пойменная эрозия, возможно оврагообразование	-20	70	УП

Окончание табл. 3.6.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
26	I-2	Н	30	<5	-10	Русловая и пойменная эрозия, местами заболачивание	-30	0	Н
27	I-1	Н	30	<5	-10	Русловая и пойменная эрозия	-10	10	Н
28	I-1	Н	30	<5	-10	Русловая и пойменная эрозия, местами заболачивание	-20	10	Н

Примечание. Индексы благоприятности территории по грунтовым условиям: Б – благоприятные; УБ – условно благоприятные; Н – неблагоприятные; комплексный индекс пригодности территории: П – пригодные; УП – условно пригодные; УН – условно непригодные; Н – непригодные.

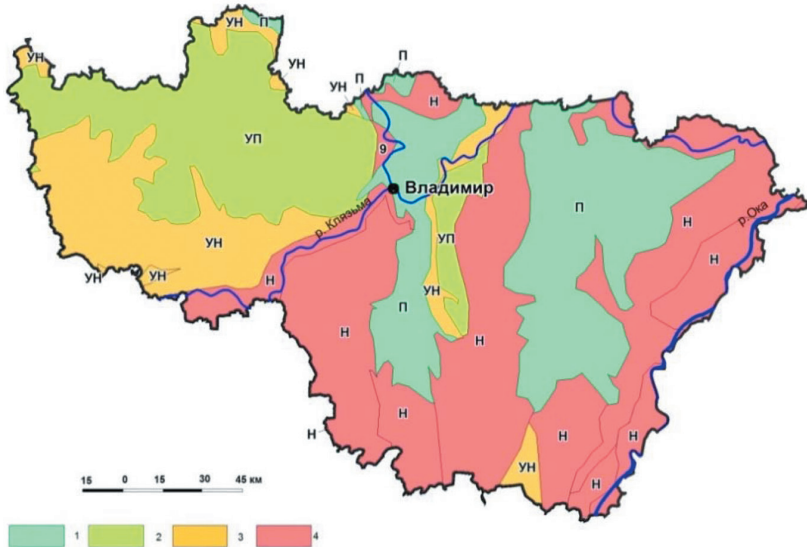


Рис. 3.6.3. Карта-схема пригодности природных условий Владимирской области для размещения объектов ТКО:
1 – пригодные; 2 – условно пригодные; 3 – условно непригодные; 4 – непригодные. Буквенные индексы на карте соответствуют обозначениям комплексного индекса пригодности территорий в табл. 3.6.4

3.6.2. Сравнительная оценка инженерно-геологических массивов по степени их пригодности для размещения объектов ТКО на локальном уровне исследований

На завершающем этапе картографических работ в границах пригодных по комплексу природных условий районов в более крупном масштабе (1:25 000 – 1:10 000) выделяются ключевые инженерно-геологические участки (массивы), и проводится их более детальное сравнение по вышеперечисленным трем основным факторам: литологическому составу пород и их свойствам, гидрогеологическим условиям и развитию опасных природных процессов. В отличие от предыдущего этапа, на этапе детальных исследований балльная оценка дается не только по наличию или отсутствию фактора, но и по атрибутивным характеристикам данного фактора. Так, должны быть изучены и оценены в баллах не только состав, но и свойства пород, слагающих вмещающий массив будущего полигона ТКО, не только глубина УПВ, но и химический состав подземных вод, а проявление опасных экзогенных процессов должно быть конкретизировано с учетом их интенсивности и повторяемости. Подробно методика балльной оценки инженерно-геологических массивов на этом этапе, разработанная В.И. Осиповым, И.В. Козляковой и Ю.А. Мамаевым, описана в статье (Осипов, Мамаев, Козлякова, 2020).

При балльной оценке изолирующих свойств пород на этом этапе предлагается учитывать такие характеристики, как коэффициент фильтрации (K_{ϕ} , м/сут.) и удерживающая (поглощающая) способность (мг/г), существенно варьирующие в зависимости от литологического состава пород (Осипов, Соколов, 2013).

Таблица 3.6.5

Шкала баллов по оценке изолирующих свойств различных литологических типов пород (Осипов, Мамаев, Козлякова, 2020)

Тип породы	Фильтрационная способность, K_f , м/сут.	Балл	Удерживающая способность, мг/кг	Балл
Глины и тяжелые суглинки	$<5 \cdot 10^{-5}$	50	>1000	20
Легкие и средние суглинки	$5 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-3}$	20	500-1000	10
Супеси	$5 \cdot 10^{-3} - 0.5$	10	100-500	2
Пески и гравий	>0.5	0	<100	0

Согласно предлагаемой методике, интегральная оценка изолирующей (фильтрационной и удерживающей) способности изучаемого массива осуществляется на основе сложения полученных баллов для каждого литологического типа пород, умноженных на его относительную мощность в разрезе (в долях единицы) (Осипов, Мамаев, Козлякова, 2020).

Гидрогеологические условия аналогично предыдущему этапу оцениваются, исходя из наличия водоносного горизонта в среде, вмещающей объект ТКО, и взаимодействия подземных вод с ним (табл. 3.6.3). При дальнейшем совершенствовании методики представляется целесообразным учитывать также химические параметры подземных вод, которые могут оказать влияние как на проявление ряда экзогенных процессов, так и на устойчивость инженерных конструкций (Гольдберг, 1987; Осипов, Галицкая, Заиканов, 2022; Осипов, Соколов, 2013).

На завершающем этапе крупномасштабной сравнительной оценки массивов выбранных площадок учет опасных природных процессов проводится более детально. Понижающие (отрицательные) баллы присваиваются каждому опасному экзогенному процессу в зависимости от его разрушительной способности. Принимая максимальную отрицательную величину неблагоприятного процесса, равной 100 баллов, на основании экспертных оценок имеем следующие значения: максимальная опасность создается при затоплении в результате наводнений (–100 баллов), далее идут подтопление (–20), эрозия временными и постоянными потоками (–10), склоновые процессы: оползни, осыпи, солифлюкция и др. (–10), карст (–5). Величина этого показателя зависит не только от разрушительной силы, но и от повторяемости опасного явления на данном участке за весь период существования объекта до полного разложения свалочного тела (100 лет), выраженной в долях единицы. Вклад каждого процесса находится как произведение его опасности (баллы) и повторяемости (дол. ед). В том случае, когда на площадке возможно развитие нескольких опасных процессов находится интегральная величина баллов от всех процессов, что дает возможность получить общую оценку величины рассматриваемого критерия (табл. 3.6.6) (Осипов, Мамаев, Козлякова, 2020).

В результате анализа всех факторов находится суммарная величина набранных баллов. Получаемый численный показатель является основным критерием подразделения массивов пород на оцениваемых площадках по условиям размещения объектов ТКО (табл. 3.6.7). Суммарная величина баллов берется за основу подразделения территории по условиям размещения отходов. Для этого все инженерно-

геологические массивы ранжируются по величине баллов на 4 типа, аналогично рассмотренным на предыдущих этапах: пригодные, условно пригодные, условно непригодные и непригодные. Для каждого типа массивов дается диапазон баллов, характеризующий степень его пригодности (см. табл. 3.6.7), и делается заключение о возможности сооружения объекта ТКО на данном участке, необходимости обустройства природно-техногенных барьеров с применением методов технической мелиорации по периметру сооружения и дополнительных защитных инженерных мер.

Таблица 3.6.6

**Шкала баллов для оценки опасных природных процессов на площадке
(Осипов, Мамаев, Козлякова, 2020)**

Наименование процесса	Балльная оценка	Повторяемость (за 100 лет)	Баллы
Затопление	100	0.10	10
Подтопление	20	0.20	4
Эрозия	10	0.10	1
Склоновые процессы	10	0.05	0.5
Карст	5	0.01	0.05

На основе данной типизации возможно построение крупномасштабной карты районирования по условиям пригодности территорий для размещения отходов. Такие карты имеют статус оценочных и предназначены для проектирования конкретных объектов в пределах относительно небольших по площади территорий (отдельных административных районов или муниципальных образований), составляются в масштабах 1:25 000–1:10 000.

Таблица 3.6.7

Типизация грунтовых массивов по степени пригодности для размещения объектов ТКО

Степень пригодности	Сумма баллов	Строение вмещающего грунтового массива	Гидрогеологические условия	Опасные процессы	Дополнительные инженерные мероприятия	Схема расположения объекта ТКО в грунтовом массиве
Пригодные	>80	Вмещающий массив сложен целиком (либо в основании и в кровле сооружения) слабопроницаемыми глинистыми грунтами, хорошими природными. Геологическая среда защищена от загрязнения, поступающего с поверхности	Нет контакта объекта ТКО с подземными водами	Исключено развитие опасных природных процессов	Возможно строительство объектов ТКО с минимальными финансовыми затратами, с соблюдением требований экологической безопасности и постоянного экологического мониторинга	
Условно пригодные	40—80	Вмещающий массив сложен полупроницаемыми и проницаемыми горными породами, но имеет в основании сооружения толщу глин или тяжелых суглинков, которая может служить надежным геологическим барьером	Подземные воды, залегающие в пределах зоны влияния объекта ТКО, находятся ниже его основания. Нельзя исключать контакта с подземными водами при подъеме их уровня	Развитие опасных экзогенных природных процессов не исключено; но их проявление отсутствует	Необходимо обустройство природно-технологического барьера с применением методов технической мелиорации по периметру сооружения	
Условно непригодные	10—40	Вмещающий массив сложен проницаемыми обводненными породами (супеси, песок); в основании залегают полупроницаемые толщи легких и средних суглинков	Сооружение находится в зоне контакта с подземными водами	Возможно развитие опасных экзотических природных процессов	Инженерная подготовка участка для создания полигонов ТКО требует значительных финансовых средств и может проводиться только в исключительных случаях	
Непригодные	<10	Вмещающий массив сложен толщей легкопроницаемых пород	Обводненные и затопляемые паводковыми водами территории	Интенсивное развитие карстовых, суффозионных, оползневых и других опасных процессов	Инженерная подготовка участков требует огромных финансовых затрат на создание искусственных и природно-технологических барьеров	

3.6.3. Характеристика участков, различающихся по условиям размещения отходов

Рассмотрим примеры возможных вариантов размещения полигонов отходов в различных геологических условиях и необходимых мероприятий инженерной защиты.

Участки, расположенные на *пригодных территориях*, характеризуются хорошими природными изолирующими свойствами: наличием в основании и кровле сооружения слабопроницаемых глинистых толщ, отсутствием контакта с подземными водами, а также геодинамических явлений и опасных природных процессов. На таких участках возможно строительство объектов ТКО с минимальными финансовыми затратами, с соблюдением требований экологической безопасности и социальных условий проживания людей.

Пример такого участка показан на рис. 3.6.4, а, б. Участок полностью сложен глинистой толщей, являющейся хорошим геологическим барьером, предотвращающим загрязнение атмосферы и подземных вод. Объемы работ по инженерной защите тела свалки минимальны и заключаются: а) в создании в теле свалки и ее основании дренажной системы для сбора биогаза и загрязненных вод; б) перекрытии свалки с поверхности (после ее накопления) непроницаемым (для воды и газов) экраном; в) создании системы мониторинга.

Дренажная система для сбора биогаза создается в теле свалки, по мере ее формирования засыпаемый мусор периодически разравнивается и перекрывается слоем крупнозернистого песка или гравия мощностью до 0,5 м. По мере накопления свалки или окончания ее формирования в теле плотины оборудуется сеть вертикальных дрен, пересекающих горизонтальные дренажные слои, через которые биогаз подается наверх и утилизируется.

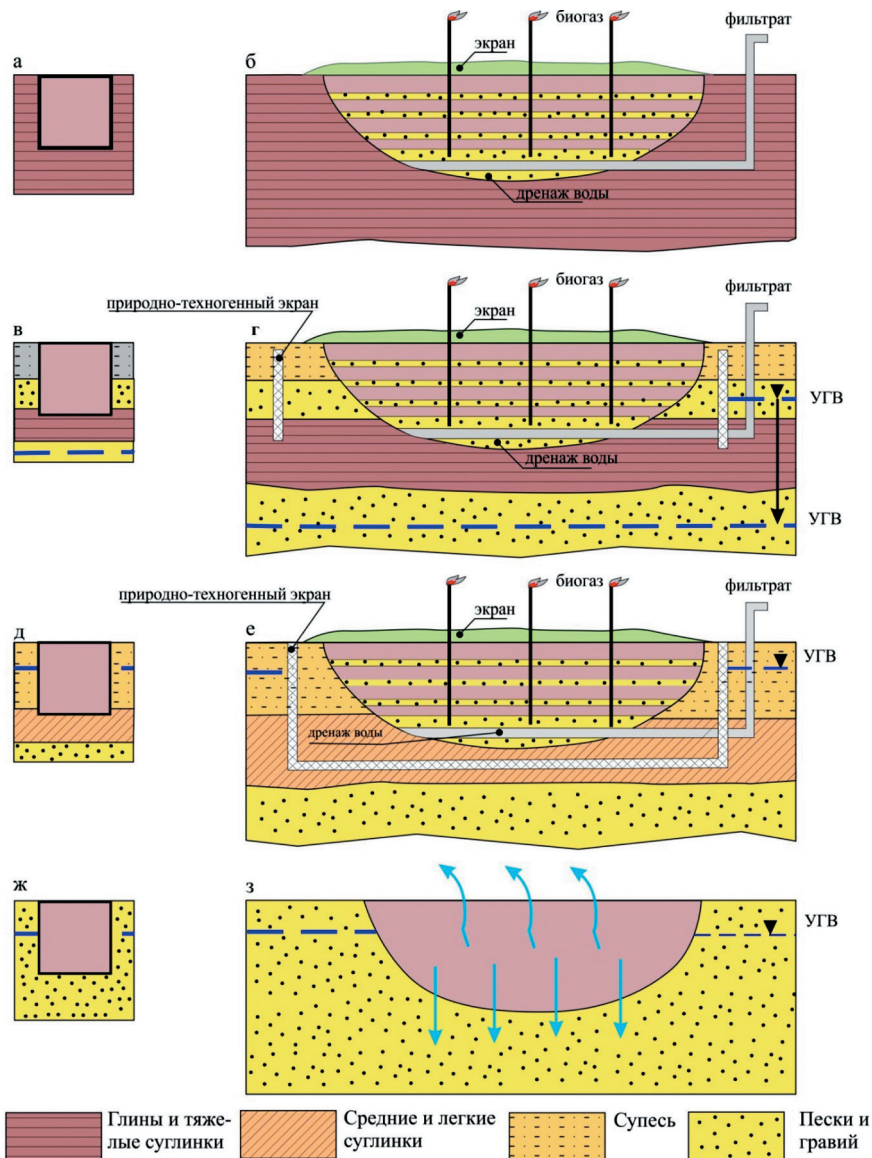


Рис. 3.6.4. Обобщенные модели геологического строения участков, выделяемых на карте районирования территории по условиям размещения ТКО

Поверхностный защитный экран может представлять собой техногенный геологический барьер, создаваемый из отсыпаемого и уплотненного слоя влажной глины, мощностью 1,5–3 м. Наряду с этим можно использовать комбинированный барьер, состоящий из искусственно создаваемого водонепроницаемого покрытия в виде различных пленок и матов и техногенного геологического барьера (отсыпанный слой влажной глины мощностью до 1,5 м).

Создаваемые комплексы даже с соблюдением всех правил безопасности остаются объектами повышенного риска, требующими постоянного наблюдения (мониторинга) за их состоянием. Мониторинг полигонов — комплексное мероприятие, включающее атмосферные, гидрогеологические, геотехнические и санитарно-гигиенические наблюдения, производимые как внутри полигона, так и за его пределами. Получаемая информация должна быстро обрабатываться и оперативно анализироваться.

Площадки, располагаемые на *условно пригодных территориях*, приурочены к массивам полупроницаемых и проницаемых пород, но имеющим в основании толщу глин или тяжелых суглинков, которая может служить надежным геологическим барьером. Важно, что на такой площадке подземные воды, залегающие в пределах зоны влияния свалки, находятся ниже основания свалки. Это не исключает, однако, что даже при незначительном поднятии УПВ может возникнуть контакт свалки с подземными водами (рис. 3.6.4, в, г). Поэтому на таких участках необходимо возводить по периметру свалки природно-техногенный барьер, создаваемый с применением методов технической мелиорации грунтов и опирающийся на непроницаемый глинистый слой в основа-

нии свалки. Помимо перекрывающего и защитного экрана по периметру свалки создаются системы дренирования биогаза и загрязненного фильтрата воды.

Территории, имеющие величину баллов от 10 до 40, составляют **условно непригодную** категорию участков, приуроченных к местам распространения проницаемых обводненных пород (супесей, песков). В основании таких участков залегают полупроницаемые толщи легких или средних суглинков (рис. 3.6.4, *д*, *е*). В ходе инженерной подготовки таких участков требуются значительные финансовые средства для создания слабопроницаемого техногенного барьера на поверхности и по периметру свалки и систем сбора/удаления биогазов, загрязненных подземных вод, мониторинга, но самое главное — это решить технически сложную задачу: снизить водопроницаемость суглинков, залегающих в основании свалки, методами технической мелиорации или с применением дорогостоящих искусственных экранов. Поэтому условно непригодные территории используются для создания полигонов размещения ТКО только в исключительных случаях.

Территории четвертого уровня включают **участки, непригодные** для размещения отходов. К ним относятся обводненные и затопливаемые паводковыми водами территории, сложенные толщей легко водопроницаемых пород (крупнообломочных, трещиноватых, песчаных), в геологическом разрезе которых отсутствуют подстилающие и перекрывающие непроницаемые или полупроницаемые горизонты пород, а также участки, располагающиеся в зоне месторождений подземных вод или над гидрогеологическими окнами. К ним же относятся территории интенсивного

развития карстовых, суффозионных, оползневых и других опасных процессов. Инженерная подготовка таких участков требует огромных финансовых затрат на создание искусственных и природно-техногенных барьеров в основании, сверху и по контуру сооружения, систем для дренажа биогаза, загрязненных подземных вод и мониторинга. Поэтому размещение объектов ТКО на таких участках должно быть категорически запрещено.

Рассмотренные выше примеры являются лишь частными случаями создания полигонов на участках с различными уровнем пригодности по геологическим условиям. В действительности таких ситуаций может быть достаточно много. Важным является сохранение единого принципа оценки природных условий при проведении инженерно-геологического районирования.

Таким образом, предлагаемая методика поэтапной оценки геологической среды по степени ее пригодности для размещения объектов ТКО на основе специального инженерно-геологического районирования представляется важным инструментом учета природных условий для размещения объектов ТКО. Ее применение в сочетании с оценкой социально-экономических параметров на стадии планирования позволяет принять решения по ряду вопросов, а именно:

- научно обосновать выбор участков размещения отходов с учетом природных условий, социально-экологической безопасности и экономической целесообразности;
- осуществлять инвентаризацию мест размещения существующих и ранее сформированных полигонов и свалок ТКО с целью решения вопросов их закрытия, перезахоронения и реабилитации;

- принимать предварительные решения по конструкции будущих объектов обращения с ТКО, объему и содержанию работ по их инженерной подготовке и защите;
- выявлять логистические проблемы, включающие доступность объекта, его оптимальное размещение относительно мест накопления ТКО и расположения перерабатывающих предприятий и другие.

Заключение

Всестороннее изучение проблемы захоронения твердых коммунальных отходов проведено по трем основным направлениям: теоретические и методические принципы и подходы для обеспечения безопасного захоронения твердых коммунальных отходов в геологической среде; обеспечение экологической безопасности полигонов твердых коммунальных отходов; разработка методологии инженерно-геологического районирования территорий для обеспечения безопасного захоронения ТКО в геологической среде.

Выполнен критический анализ российских и зарубежных литературных, законодательных и нормативных документов по геологической безопасности территорий утилизации ТКО и градостроительным технологиям их планирования и разработаны концептуальные предложения по методологии планирования и размещения объектов хранения ТКО в РФ.

Показано, что современное состояние управления отходами требует принятия концептуальных решений. Одним из них является применение системы барьеров при строительстве полигонов ТКО, которая может сократить расходы и обеспечить оптимальные условия изоляции отходов.

С использованием опыта зарубежных стран представлены рекомендации по устройству мультибарьеров на полигонах ТКО, обеспечивающих их безопасность для окружающей среды. Исходя из того, сколько и каких барьеров предполагается использовать при проектировании полигонов ТКО, столько необходимо разработать соответствующих рекомендаций и методик. Созданные рекомендации и

методики должны получить подтверждение и развитие в нормативных документах.

Исключительно национальным достижением российской науки является разработка учения о геохимических барьерах, позволяющего сократить затраты на обустройство полигонов ТКО. Предлагаются варианты применения геохимических барьеров, использованных при проектировании природоохранных установок, получивших положительные результаты, которые с успехом можно внедрять при проектировании полигонов ТКО.

Полигоны ТКО относятся к природоохранным объектам повышенной геоэкологической опасности. Функция обустройства полигона — исключить его негативное воздействие и осуществить процесс физической и химической нейтрализации свалочного тела, т.е. превратить его в безопасную субстанцию с возможностью использования в последующем в народном хозяйстве. Для решения этих задач предлагается концепция, основанная на теории мультибарьеров, представляющих систему обеспечения изоляции и локализации свалочного тела в пределах полигона ТКО.

В исследованиях для обеспечения экологической безопасности полигонов твердых коммунальных отходов в качестве объекта выбраны Московская область и расположенные на ней полигоны захоронения отходов (рекультивируемые, действующие и проектируемые). Проблемы Московской области в сфере обращения с ТКО те же, что и везде в России. Здесь много старых полигонов, практически исчерпавших свой ресурс, крайне негативное отношение населения к любым объектам обращения с отходами — и к полигонам захоронения, и к мусоросжигательным заводам, какими бы современными они не были. Это, безусловно, одна из наи-

более подходящих территорий для выработки научных основ обеспечения экологической безопасности полигонов твердых коммунальных отходов.

Анализ результатов изучения полигонов ТКО в Московском регионе показал, что в целом ряде случаев отсутствует минимально необходимая информация, позволяющая оценить состояние свалочного тела, окислительно-восстановительную зональность подземных вод вокруг полигона, осуществить термодинамическое моделирование. В связи с этим был проведен поиск подходов, которые позволили решить поставленные задачи.

Достаточно сложной проблемой на территориях полигонов ТКО является определение окислительно-восстановительного потенциала (E_h) в фильтрате и подземных водах. В условиях отсутствия информации о величине окислительно-восстановительного потенциала (E_h), определяющего распределение и миграционные способности элементов с переменной валентностью, одним из подходов является использование экспериментально изученных природных эмпирических зависимостей между концентрациями растворенного кислорода в подземных водах и E_h . Данный метод был апробирован на ряде полигонов.

Были изучены факторы формирования состава подземных вод и почв, проанализировано состояние свалочного тела и подземных вод на момент исследования. Оценка состояния свалочного тела выполнялась на основе анализа химического состава фильтрата. Выяснено, что загрязнение подземных вод может привести к существенному изменению окислительно-восстановительных условий.

Выполнено термодинамическое моделирование геохимической системы фильтрат – грунтовые воды. Термодина-

мическое моделирование проводилось с использованием PHREEQC 3.7.0. На модели исследовались диагенетические реакции, которые могут происходить в зонах, где свалочный фильтрат смешивается с грунтовыми водами. Фильтрат, образовавшийся в теле полигона, мигрирует вниз в виде шлейфа, смешиваясь с подземными водами. По мере миграции фильтрата происходит серия окислительно-восстановительных реакций (метаногенез, восстановление сульфата, восстановление железа и марганца, денитрификация, осаждение карбонатов). Следует отметить, что термодинамические расчеты для сложных геохимических систем, таких как полигоны отходов, могут дать представление только о важнейших химических свойствах системы и тенденциях её развития.

С целью исследования почв как вторичного источника загрязнения подземных вод на участках расположения полигонов ТКО Московской области проведены химико-аналитические исследования валового состава элементов, форм их нахождения с использованием метода вытяжек — водной, ацетатно-аммонийной и азотнокислый. Установлен ряд закономерностей аэротехногенного загрязнения почв на участках полигонов и в окрестностях.

Исследован морфологический состав свалочных тел ряда полигонов ТКО Московской области, проанализирована зависимость состава отходов от расположения полигонов, возраста, даты закрытия, а также изучено изменение соотношений видов отходов по глубине в разрезе свалочного тела. Показано, что свалочные тела представляют собой сложные современные геологические тела, с выраженной слоистостью, взаимосвязанной со скоростью перехода «быстроразлагающихся» отходов в твердые органические частицы.

Для оценки защищенности грунтовых вод от фильтрата было исследовано 17 полигонов, расположенных в Московской области и подлежащих рекультивации. При построении схем защищенности грунтовых вод наилучшие результаты были получены при использовании метод крикинга и метода обратных взвешенных расстояний (IDW).

Большое внимание уделено разработке и развитию методологических принципов инженерно-геологического районирования для целей обращения с твердыми коммунальными отходами. Рассмотрены научно-методические основы оценки инженерно-геологических условий платформенных территорий для выбора экологически безопасных мест размещения полигонов ТКО. На примере Центрального федерального округа России и его части — Владимирской области показан алгоритм оценки пригодности геологической среды на основе комплексного учета геологического строения территории, литологического состава грунтовых массивов, гидрогеологических условий, проявления опасных экзогенных процессов. Проведено поэтапное типологическое районирование геологической среды: первый этап — мелко-масштабное, для предварительной оценки грунтовых условий крупных регионов на федеральном уровне; второй — среднемасштабное, для комплексной оценки территории по совокупности природных условий и предварительного выделения благоприятных областей на региональном уровне; третий — крупномасштабное, для выделения и сравнительной оценки конкретных участков возможного размещения площадок захоронения ТКО на основании балльной оценки факторов. Для каждого выделенного типа грунтовых условий определены дополнительные инженерные защитные мероприятия при обустройстве полигонов ТКО.

Для Центральной России выполнена сравнительная качественная оценка геологического риска как величины вероятного экономического и социального ущерба от негативного воздействия объектов ТКО на геологическую среду для каждой из 17 областей на основании таких критериев, как доля неблагоприятных районов от общей площади территории области, число объектов ТКО, расположенных в этих районах, плотность населения и инфраструктурная нагрузка. Такая оценка носит обзорный характер и предназначена для органов федерального управления, планирующих инвестиции в решение проблемы отходов в России.

На примере территории Московской области рассмотрены проблемы изучения геологической среды для размещения объектов твердых коммунальных отходов. Показано, что в состав геоинформационной системы (электронной модели) территориальной схемы обращения с отходами субъектов РФ целесообразно включение типизации геологической среды на основе оценки её естественной защищенности от загрязнения, поступающего с поверхности и районирования территории. Типизация геологической среды Московской области представляет собой формализацию геологического строения. Каждый тип может быть легко оценен с точки зрения естественной защищенности геологической среды и пригодности для размещения объектов ТКО в зависимости от наличия в геологическом разрезе слабопроницаемых толщ. Формальная оценка геологической среды должна легко вписаться в суммарную многокритериальную оценку участка, используемую в электронной модели. Типизация грунтовых толщ — это первый этап оценки степени благоприятности территории для реализации проектов обращения с ТКО. Следующий этап — создание двух

информационных картографических слоев: пространственное расположение типов дочетвертичных отложений и пространственное расположение типов четвертичных отложений. Взаимное наложение этих слоев позволяет дать площадную оценку естественной защищенности геологической среды от загрязнения с поверхности на картах специального инженерно-геологического районирования. Для составления таких карт создан проект в программе QGIS. Для всей территории Московской области осуществлена пространственная привязка листов Государственных геологических карт дочетвертичных и четвертичных отложений масштаба 1:200 000. Составлены карты типологического и оценочного районирования.

Показано, что оценка регионов России по геоэкологической благоприятности размещения полигонов ТКО является многоступенчатым процессом и определяется не только природными факторами, но и социально-экономическими условиями. Для интегральной оценки предлагается использовать Индекс благоприятности размещения полигонов ТКО, выраженный в баллах, который по единой методике рассчитывается индивидуально для каждого субъекта Российской Федерации. В комплексной оценке учитываются такие показатели, как количество городов и численность городского населения, региональные нормы сбора ТКО, удорожание строительства полигона при наличии различных геоэкологических ограничений, ценность занимаемых полигоном земель и прочее.

Предложенный многоступенчатый подход к оценке благоприятности размещения полигонов ТКО позволяет комплексно определить основные ограничения, как природные, так и социально-экономические на единой методической

основе на федеральном уровне. Полученные количественные оценки территории субъектов, выраженные Индексом благоприятности размещения полигонов ТКО, рассчитанным в баллах, могут быть использованы при принятии эффективных решений в области управления отходами.

Таким образом, показано, что проблема обеспечения безопасного полигонного захоронения ТКО в геологической среде на основе развития природоподобных технологий чрезвычайно многогранная. Она включает много геоэкологических аспектов и задач, требующих внимания специалистов различного профиля в области наук о Земле. Проведенные исследования коллектива авторов ИГЭ РАН, результаты которых нашли отражение в данной монографии, представляются важным шагом на пути решения этой глобальной проблемы.

Литература

- Абросимов А.В. Использование космических снимков и геоинформационных технологий для мониторинга мест складирования отходов // Экология урбанизированных территорий. 2014. № 1. С. 38–43.
- Алексашина В.В. Экология города. Мусоросжигательные заводы // Academia. Архитектура и строительство. 2014. № 4. С. 77–86.
- Алёшина Т.А., Чернышев С.Н. Современное геоэкологическое состояние свалок и полигонов твердых бытовых отходов Московской области и пути решения // Вестник МГСУ. 2012. № 9. С. 185–190.
- Аревкин Ю. А. Прогноз загрязнения геологической среды в зонах свалок твердых бытовых отходов (на примере полигона «Тимохово») : автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук. М., 2002. 24 с.
- Блинов Л.Н., Букреев В.В., Ложечко В.П. Большой город. Экология, безопасность жизнедеятельности. СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2014. 405 с.
- Бoguш А.А., Трофимов А.Н. Применение торфо-гуминовых веществ для снижения техногенного влияния отходов на окружающую среду// Химическая промышленность. 2005. № 3. С. 153–158 https://thesa.ru/chemjournals/chemprom/2005/2005_03.html
- Бояркин В.М., Бояркин И.В. География Иркутской области. 7-е изд., перераб. и доп. Иркутск: Сарма, 2011. 255 с.
- Бурова В.Н., Козлякова И.В., Еремина О.Н. Проблемы размещения твердых коммунальных отходов и оценка риска на примере Центрального федерального округа России // Геоэкология. 2022. № 6. С. 3–16.
- Вайсман Я.И. и др. Управление отходами. Полигонные технологии захоронения твердых бытовых отходов. Рекультивация и

- постэксплуатационное обслуживание полигона. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. 244 с.
- Васильева Е.А. Технология обращения с твердыми коммунальными отходами. Ч. 2: учебное пособие. СПб. : ВШТЭ СПбГУПТД, 2021. 80 с.
- Воронкевич С.Д. Основы технической мелиорации грунтов. М.: Научный мир, 2005. 504 с.
- Вторичная переработка мусора: что можно переработать вторично? URL: <https://bezotxodov.ru/pererabotka/vtorichnaja-pererabotka-othodov#i-2>
- Геология СССР. Том 4. Центр Европейской части СССР. Геологическое описание (Московская, Владимирская, Ивановская, Калининская, Калужская, Костромская, Рязанская, Тульская, Смоленская и Ярославская области) / под ред. Леоненко И.В., Сидоренко А.В., Шик С.М. М.: Недра, 1971. 742 с.
- Глушанкова И.С. Моделирование состава фильтрационных полигонов захоронения твердых бытовых отходов // Геоэкология. 2004. № 4. С. 334–341.
- Гольдберг В.М. Взаимосвязь загрязнения подземных вод и природной среды. Л., 1987. 247 с.
- Гончарова Л.В. Основы искусственного улучшения грунтов. М. : Изд-во МГУ, 1973. 376 с.
- ГОСТ Р 59415-2021 Биологическая безопасность. Система сбора свалочного газа на полигонах твердых коммунальных отходов, состоящая из специальных вертикальных газовых скважин. Общие технические условия.
- ГОСТ Р 59418-2021 Биологическая безопасность. Очистка сточных, технических, поверхностных вод и фильтратов полигонов твердых коммунальных отходов на основе обратного осмоса. Общие технические условия.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации, масштаб 1:1000 000. СПб.: ВСЕГЕИ, 1999.
- Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды Российской Федерации в 2017 г.». М. : Министерство природных ресурсов и экологии; НПП «Кадастр», 2018. 888 с.

- Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды Российской Федерации в 2018 г.». М. : Минприроды России ; НПП «Кадастр», 2019. 844 с.
- Грунтоведение: учеб. для студентов вузов, обучающихся по геол. специальностям. М., 2005. 1023 с.
- Дементьев С.Ю. Основные проблемы инженерно-геологического, гидрогеологического и экологического изучения участков размещения полигонов захоронения ТБО и пути их решения : автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук. М., 2000. 22 с.
- Джамалов Р.Г., Медовар Ю.А., Юшманов И.О. Влияние полигона твердых бытовых отходов на качество подземных и поверхностных вод (на примере Владимирской области)// Сергеевские чтения. Вып. 20: Обращение с отходами: задачи геоэкологии и инженерной геологии : материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (22 марта 2018 г.). М.: РУДН, 2018. С. 175–178.
- Директива Совета Европейского Союза 1999/31/ЕС от 26 апреля 1999 г. по полигонам захоронения отходов, 2018. 27 с. URL: <http://base.garant.ru/2563786/>.
- Европейская практика обращения с отходами: проблемы, решения, перспективы. СПб.: Региональное энергетическое партнерство, 2005. 73 с.
- Жарков И.В. Внедрять энергетику будущего или оставаться в прошлом. 2020. <https://ekogradmoscow.ru/vshody/eko-energetika/vnedryat-energetikubudushchego-ili-ostatsya-v-proshlom>
- Жилинская Я.А. Рекультивация полигонов захоронения твердых бытовых отходов продуктами механобиологической переработки отходов: дисс. ... канд. тех. наук 03.00.16. Пермь, 2010. 220 с.
- Завизион Ю.В., Слюсарь Н.Н., Глушанкова И.С., Загорская Ю.М. Оценка физико-химических параметров отходов разного срока захоронения // Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика. 2015. №3 (19). С. 82–96.

- Загорская Ю.М. Оценка степени биологической стабильности отходов по показателю дыхательной активности микроорганизмов // Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика. 2014. № 2. С. 131–143.
- Заиканов В.Г., Заиканова И.Н., Булдакова Е.В. Геоэкологический и ландшафтно-экологический анализ территорий существующих свалок ТБО Московской области // Сергеевские чтения: Вып. 20: обращение с отходами: задачи геоэкологии и инженерной геологии : материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (22 марта 2018 г.). М. : РУДН, 2018. С. 65–73.
- Закон РФ «О недрах» от 21.02.1992, № 2395-1 (https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_343/)
- Зотов В.Б. Проблемы утилизации твёрдых бытовых отходов в Российской Федерации и пути их решения //Управление государственное, муниципальное и корпоративное: теория и лучшие практики : материалы I Всерос. научно-практ. конф. с междунар. участием / под ред. А.Н. Гуда. – 2016. С. 13–18.
- Ильиных Г.В., Коротаев В.Н., Вайсман Я.И. Алгоритм оценки экологической нагрузки на объекты окружающей среды при обращении с твердыми бытовыми отходами с учетом их состава и свойств // Вестник МГСУ. 2014. № 2. С. 131–139.
- Инженерная геология СССР. Т. 1. Русская платформа / под ред. И.С.Комарова. М. : Изд-во МГУ, 1978. 527 с.
- Инструкция по проектированию, эксплуатации и рекультивации полигонов для твердых бытовых отходов. Утверждена Министерством строительства Российской Федерации 2 ноября 1996 г. https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_146721/
- Касимов Н.С., Перельман А.И. Геохимия ландшафта. М. : Изд-во МГУ, 1999. 610 с.
- Кашперюк П.И., Макеева Т.Г., Аканов А.В., Никитина К.В., Подлесных А.И. Некоторые правовые и природоохранные вопросы формирования полигонов переработки и захоронения ТКО в Подмоскowie //Сергеевские чтения. Вып.20. Обраще-

- ние с отходами: задачи геоэкологии и инженерной геологии : материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (22 марта 2018 г.). М. : РУДН, 2018. С. 71–73.
- Козлов Г.В., Ивахнюк Г.К. Морфологический состав твердых коммунальных отходов по регионам мира в XX и начале XXI века (обзор) // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2014. № 24 (50). С. 58–66.
- Козлякова И.В., Еремина О.Н. Оценка геологической среды для размещения твердых коммунальных отходов на территории Московской области. Геоэкологические проблемы техногенного этапа истории Земли—2022 // Сб. матер. Всерос. (национальной) научно-практ. конф. (Москва, 14 октября 2022 г.). М. : Изд-во МИСИ—МГСУ, 2022. С. 201–208.
- Козлякова И.В., Еремина О.Н., Романова Е.Р., Хайрединова А.Г., Чуткерашвили Е.С. Карта типологического инженерно-геологического районирования для размещения твердых коммунальных отходов на территории Московской области //Сергеевские чтения. Вып. 24. Фундаментальные и прикладные вопросы инженерной геодинамики. М. : Геоинфо, 2023. С. 168–171.
- Козлякова И.В., Еремина О.Н., Романова Е.Р., Хайрединова А.Г., Чуткерашвили Е.С. Оценочное инженерно-геологическое районирование для территориальной схемы обращения с твердыми коммунальными отходами // Сергеевские чтения. Вып. 25. Региональная инженерная геология и геоэкология. М. : Геоинфо, 2024. С. 297–300.
- Козлякова И.В., Еремина О.Н. Романова Е.Р., Хайрединова А.Г., Чуткерашвили Е.С. Оценка геологической среды для территориальной схемы обращения с твердыми коммунальными отходами // Геоэкология. 2024. № 5 (в печати).
- Козлякова И.В., Кожевникова И.А., Анисимова Н.Г., Иванов П.В. Инженерно-геологическое районирование Центрального

- федерального округа России по условиям размещения предприятий и полигонов утилизации твердых бытовых отходов // Сергеевские чтения. Вып. 20: Обращение с отходами: задачи геоэкологии и инженерной геологии. М. : РУДН, 2018. С. 74–78.
- Козлякова И.В., Кожевникова И.А., Анисимова Н.Г., Еремина О.Н. Геоэкологические аспекты проблемы размещения твердых коммунальных отходов (на примере Центральной России) // Сергеевские чтения. Вып. 22. М. : РУДН. 2020. С. 129–132.
- Козлякова И.В., Кожевникова И.А., Еремина О.Н., Анисимова Н.Г. Методологические принципы оценки геологической среды для размещения объектов обращения с ТКО // Геоэкология. 2021. № 1. С. 48–58. <https://doi.org/10.31857/S0869780921010045>.
- Крайнов С.Р., Швец В.М. Гидрогеохимия. М. : Недра, 1992. 463 с.
- Кулыгин В.В. Методика оценки взаимовлияния совокупности опасных природных явлений// Геориск. 2017. № 2. С. 30–37.
- Леонтьев Л.И. Перспективы утилизации твёрдых коммунальных отходов РФ // Труды конгресса с международным участием и конференции молодых учёных «Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований» Техноген-2019. Екатеринбург : ИМЕТ УрО РАН, 2021. С. 18– 25.
- Лесин Ю.В. Фильтры для очистки воды из крупнокусковых отходов угледобычи // Уголь. 1986. № 2. С. 43–44.
- Лукашев В.К., Лукашев К.И. Геохимия ландшафтов. Минск : Высшая школа, 1972. 358 с.
- Мазурин И., Понуровская В., Колотухин С. О принципиальной непригодности технологий мусоросжигания для России. URL: <https://regnum.ru/news/innovatio/2512284.html>
- Мазурин И.М., Понуровская В.В. Сжигание мусора несовместимо с концепцией устойчивого развития// Всероссийский междисциплинарный семинар — международная конференция геологического и географического факультетов МГУ «Систе-

- ма Планета Земля». 28–31 января 2017. <https://regnum.ru/news/innovatio/2240524.html>
- Мазурин И.М., Понуровская В.В., Колотухин С.П. Системный анализ задачи переработки твёрдых бытовых отходов // Вестник РАЕН. 2018. № 5. С. 76–84.
- Максимович Н.Г., Хайрулина Е.А. Геохимические барьеры и охрана окружающей среды: учебное пособие. Пермь, 2011. 249 с. <http://nsi.psu.ru/labs/gtp/stat/2011/0381.pdf>
- Малышевский А.Ф., Хабиров В.В. Обоснование выбора оптимального способа обезвреживания твердых бытовых отходов в городах России. М.: ИФЗ РАН, 2012. 42 с.
- Миронов О.К. Применение геоинформационных технологий в геоэкологических и инженерно-геологических исследованиях // Сергеевские чтения. Вып. 2. М. : ГЕОС, 2000. С. 326–330.
- Миронов О.К., Полеводова С.Н. О задаче выбора места размещения полигона хранения твердых бытовых отходов с помощью ГИС-технологий// Сергеевские чтения. Вып. 20. М. : РУДН, 2018. С. 81–84.
- Москаленко Н.Н., Гинзбург Л.Н. Городские агломерации: проблема геохимического фона // Проблемы управления качеством городской среды. М. : Прима-Пресс, 2001.
- Московская область. Геологическая карта дочетвертичных отложений. https://hge.spbu.ru/mapgis/subekt/moskow/25_Moscow_geol.pdf
- Мочалова Л.А., Гриценко Д.А., Юрак В.В. Система обращения с твердыми коммунальными отходами: зарубежный и отечественный опыт // Известия УГГУ. 2017. Вып. 3 (47). С. 97–101.
- Музалевский А.А., Федоров М.П., Сергеев В.В. Риск-анализ модели полигонов твердых бытовых отходов вокруг Санкт-Петербурга// Геоэкология. 2019. № 3. С. 22–27. DOI:10.24411/1816-1863-2019-13022.
- Музалевский А.А., Федоров М.П., Сергеев В.В. Оценка экологических рисков в природно-технических системах, образованных полигонами твердых бытовых отходов // Экологическая

- безопасность строительства и городского хозяйства. 2020. № 1. С. 28–34. DOI:10.24411/1816-1863-2020-11028.
- Негуляева Е.Ю. Оптимизация системы обращения с твердыми коммунальными отходами как фактор безопасности геоэкологической среды: дисс. ... канд. техн. наук 25.00.36. СПб., 2005. 151 с.
- Осипенко М.А., Громова О.А. Особенности воздействия полигона ТБО «Тимохово» на состояние окружающей среды// Поколение будущего: взгляд молодых ученых : материалы научн. конф. 13–14 ноября 2018 г. Т. 4. М., 2018. С. 58–61.
- Осипов В.И. Управление твердыми коммунальными отходами как федеральный экологический проект // Геоэкология. 2019. №3. С. 3-11. DOI: 10.31857/S0869-7809201933-11.
- Осипов В.И. Что лучше – сжигать или разлагать твердые коммунальные отходы // Вестник РАН. 2021. № 8. С. 769–778. DOI: 10.31857/S0869587321080089
- Осипов В.И., Аникеев А.В., Бурова В.Н. и др. Геологический риск урбанизированных территорий / под ред. В.И. Осипова. М. : РУДН, 2020. 312 с.
- Осипов В.И., Галицкая И.В., Заиканов В.Г. Полигонная технология обращения с отходами // Геоэкология. 2022. № 3. С. 3–15. <https://doi.org/10.31857/S0869780922030079>
- Осипов В.И., Еремина О.Н., Козлякова И.В., Мамаев Ю.А., Кожевникова И.А., Анисимова Н.Г. Оценочное инженерно-геологическое районирование для размещения полигонов твердых коммунальных отходов (на примере Владимирской области Российской Федерации) // Геоэкология. 2024. № 1. С. 83–95.
- Осипов В.И., Мамаев Ю.А., Козлякова И.В. Территориальное размещение полигонов твёрдых коммунальных отходов // Вестник Российской академии наук. 2020, Т. 90. № 6. С. 567–574. <https://doi.org/10.1134/S101933162002015X>
- Осипов В.И., Соколов В.Н. Глины и их свойства. М. : ГЕОС, 2013. 575 с.

- Осипов В.И., Филимонов С.Д. Уплотнение и армирование слабых грунтов методом «Геокомпозит» // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2002. № 5. С. 15-21.
- Отходы в России: мусор или ценный ресурс. Сценарии развития сектора обращения с твердыми коммунальными отходами». М.: Международная финансовая корпорация, группа Всемирного банка, 2014. 92 с. https://www.waste.ru/uploads/library/ifc_waste_in_russia_report.pdf
- Пакет оперативной геологической информации (ГИС-Атлас) Центральный федеральный округ. ВСЕГЕИ 2018, <http://atlaspacket.vsegei.ru>
- Паспорт национального проекта «Экология». https://www.mnr.gov.ru/docs/np_ecology
- Патент 2015248RU. Способ создания противofiльтрационной завесы в лессовом грунте. Авт.: Осипов В.И., Филимонов С.Д., Мельников Б.Н., Кайль Е.В. // Изобретения. 1994. № 12. С. 95.
- Перельман А.И. Геохимия ландшафта. М., 1966. 392 с.
- Плужникова З., Иванникова Н. Диоксины: станет ли Россия вторым Вьетнамом? ИА REGNUM. 12 ноября 2018. <https://regnum.ru/news/polit/2517741.html>
- ПНД Ф 16.3.55-08 ФР 1.28.2015.19223 Количественный химический анализ почв и отходов. Методика определения морфологического состава твердых отходов производства и потребления гравиметрическим методом. М.: ФБУ «ФЦАО», 2014. 10 с.
- Погорелов А.В., Липилин Д.А. Мониторинг и классификация свалок на территории Краснодарского края// Известия Дагестанского государственного педагогического университета. 2014. № 1 (26). С.114–121.
- Подлипский И.И. Характеристика полигонов бытовых отходов как объектов геологического исследования // Вестник СПбГУ. 2010. Сер. 7. № 1. С. 15-31.
- Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 14.03.2002 № 10 «О введении в действие Санитарных правил

и норм „Зоны санитарной охраны источников водоснабжения и водопроводов питьевого назначения. СанПиН 2.1.4.1110-02“ (с изм. от 25.09.2014) (вместе с СанПиН 2.1.4.1110-02. 2.1.4. Питьевая вода и водоснабжение населенных мест. Зоны санитарной охраны источников водоснабжения и водопроводов питьевого назначения. Санитарные правила и нормы», утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 26.02.2002) (зарегистрировано в Минюсте РФ 24.04.2002 № 3399).

Постановление Правительства Московской области от 22.12.2016 № 984/47 «Об утверждении территориальной схемы обращения с отходами, в том числе твердыми коммунальными отходами, Московской области». <https://mep.mosreg.ru/dokumenty/normotvorchestvo/teksty-proektov-zakonov-moskovskoy-oblasti-po/postanovlenie-pravitelstva-moskovskoy-oblasti>

Постановление Правительства Московской области от 11.01.2022 № 3/1 «О внесении изменений в постановление Правительства Московской области от 22.12.2016 № 984/47 «Об утверждении территориальной схемы обращения с отходами Московской области» <https://mgkh.mosreg.ru/dokumenty/normotvorchestvo/postanovleniya/21-02-2022-14-38-07-postanovlenie-pravitelstva-moskovskoy-oblasti-ot>

Постановление Правительства от 18.06.2019 № 734-ПП «О реализации мероприятий по раздельному сбору (накоплению) твердых коммунальных отходов в городе Москве». URL: <http://docs.cntd.ru/document/560344806>

Постановление Правительства РФ «О лицензировании деятельности по сбору, транспортированию, обработке, утилизации, обезвреживанию, размещению отходов I–IV классов опасности» от 3 октября 2015 г. № 1062.

Постановление Правительства Российской Федерации от 12 ноября 2016 г. № 1156 «Об обращении с твердыми коммунальными отходами и внесении изменения в постановление Правительства Российской Федерации от 25 августа 2008 г. № 641

«О Единых требованиях к объектам обработки, утилизации, обезвреживания, размещения твердых коммунальных отходов».

Постановление Правительства РФ от 22 сентября 2018 г. № 1130 «О разработке, общественном обсуждении, утверждении, корректировке территориальных схем в области обращения с отходами производства и потребления, в том числе с твердыми коммунальными отходами, а также о требованиях к составу и содержанию таких схем». <https://docs.cntd.ru/document/551187872#6540IN>

Постановление Правительства РФ от 31 августа 2018 г. № 1039 «Об утверждении Правил обустройства мест (площадок) накопления твердых коммунальных отходов и ведения их реестра». URL: <http://docs.cntd.ru/document/551031834>

Постановление Правительства Российской Федерации от 15 декабря 2018 года № 1572 «Об обращении с твердыми коммунальными отходами и внесении изменения в Постановление Правительства Российской Федерации от 25 августа 2008 г. № 641» от 31 августа 2018 г. № 1039.

Постановление Правительства Российской Федерации от 12 октября 2020 г. № 1657 О Единых требованиях к объектам обработки, утилизации, обезвреживания, размещения твердых коммунальных отходов (в ред. Постановления Правительства Российской Федерации от 17.02.2023 № 255).

Приказ Росприроднадзора от 22.05.2017 № 242 (ред. от 18.01.2024) «Об утверждении Федерального классификационного каталога отходов».

Природные опасности России. Экзогенные геологические опасности / под ред. В.М. Кутепова, А.И. Шеко. М. : Крук, 2002. 348 с.

Промежуточные итоги реализации реформы в сфере ТКО. Отчет ППК « Российский Экологический Оператор», 2020 г.

Путилина В.С., Галицкая И.В., Юганова Т.И. Влияние органического вещества на миграцию тяжелых металлов на участках

- складирования твердых бытовых отходов : аналит. обзор. Новосибирск: ГПНТБСОРАН; ИГЭРАН, 2005. 100 с.
- Пучков В.Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ООО ДизайнПолиграфСервис, 2010. 280 с.
- Распоряжение Департамента жилищно-коммунального хозяйства города Москвы № 01-01-14-590/19 от 26.12.2019 «Об утверждении территориальной схемы обращения с отходами города Москвы».
- Романов В.И. Отходы России в начале XXI века. Обзор, анализ, прогнозы. М. : ЭРА, 2016. 229 с.
- Рыбальченко В.С., Рыбальченко И.В. Перевод дискуссии о способах утилизации мусора из плоскости бизнес-решений в сферу научного обсуждения как важнейшая государственная задача // Экологический вестник России. 2019. № 8. С. 28–33.
- Рыбальченко В.С., Рыбальченко И.В. Российские технологии мусоропереработки. Почему страна — абсолютный лидер в части научных достижений в области утилизации мусора — закупает технологии за рубежом? // Экологический вестник России. 2019. № 12. С. 40–49.
- Рычагов Г.И. Общая геоморфология. М., 2006.
- Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / пер. с англ. М. : Радио и связь, 1993. 278 с.
- СанПиН 2.1.7.1038-01 Гигиенические требования к устройству и содержанию полигонов для твердых бытовых отходов. Министерство здравоохранения Российской Федерации, 2001.
- Сборник удельных показателей образования отходов производства и потребления. Госкомэкология РФ, 1999 г. <https://www.solidwaste.ru/i/news/30019/1999.pdf>
- Свод правил СП 320.1325800.2017 «Полигоны для твердых коммунальных отходов. Проектирование, эксплуатация и рекультивация». С изм. 16 марта 2022 г. URL: <http://docs.cntd.ru/document/556610331>

- Свод правил СП 42.13330.2016. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений.
- Система управления отходами в странах ЕС. URL: <http://waste-nn.ru/sistema-upravleniya-othodami-v-stranah-es>
- Слюсарь Н.Н. Использование результатов оценки экологического риска для разработки программ вывода из эксплуатации старых свалок // Вестник МГСУ. 2016. № 8. С. 88-99.
- Слюсарь Н.Н., Вайсман Я.И., Коротаев В.Н. Оценка долгосрочных эмиссий объектов захоронения твердых коммунальных отходов: результаты полевых исследований и лабораторного моделирования // Экология и промышленность России. 2016. Т. 20. № 4. С. 32–39.
- СНиП 2.01.28-85. Полигоны по обезвреживанию и захоронению токсичных промышленных отходов. Основные положения по проектированию. М.: Госстрой СССР, 1985. <http://docs.cntd.ru/document/556794132>
- Соглашение № 118 от 06.07.2017 между Правительством Московской области и ООО «АГК-1» // Аргументы недели. № 36(578). 14 сентября 2017 г.
- Солнцева Н.П. Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов. М.: Изд-во МГУ, 1998. 367 с.
- Сосновцев В.В. Наилучшие мусоросжигательные заводы недоступны для России. 2018. <https://regnum.ru/news/polit/2453732.html>
- СП 3.131130.2009 Системы противопожарной защиты. Система оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре. Требования пожарной безопасности.
- СП 499.1325800.2021 Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от карстово-суффозионных процессов. Правила проектирования.
- Статистика Евросоюза по бытовым отходам <https://www.gsvm.ru/news/statistika-evrosoyuza-po-bytovym-othodam>
- Территориальная схема обращения с отходами, в том числе с твердыми коммунальными отходами, Московской области. Красногорск, 2018. 85 с.

- Тимофеева С.С., Шешукова Л.В., Охотин А.Л. Мониторинг свалок твердых бытовых и промышленных отходов в Иркутском районе по данным космических снимков// Вестник ИрГТУ. 2012. № 9. С.76–81.
- Титов Б.Ю. Системы управления бытовыми отходами разных стран: Рецепты для России. Институт экономики роста им. П. Столыпина. 2019 г. <https://stolypin.institute/research/our/sistemy-upravleniya-bytovymi-othodami-raznyh-stran-recepty-dlya-rossii>
- Титова А.Г. Оценка влияния полигона твердых коммунальных отходов на окружающую среду с использованием междисциплинарного подхода// Проблемы региональной экологии. 2019. № 2. С. 53–58. DOI:10.24411/1728-323X-2019-12053.
- Третьякова Е.А., Шимановский Д.В. Социальное благополучие и эколого-экономическая динамика: аналитическая модель // Проблемы прогнозирования. 2020. №1. С. 146–154. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42942040>.
- Труфанов А.А., Трушин Б.В., Новаковский Б.А., Расторгуев А.В., Прасолов С.В., Прасолова А.И. Воздействие полигона ТБО «Тимохово» на окружающую среду: результаты компьютерного геоэкологического картографирования// Экология и промышленность России. 1997. № 2. С. 16–21
- Трушин Б.В. Формирование загрязнения подземных вод на участках коммунальных свалов Московского региона : автореф. дисс. ... канд.геол.-мин. наук. М., 1994. 22 с.
- Федеральный закон от 24 июня 1998 г. № 89-ФЗ « Об отходах производства и потребления».
- Федеральный закон от 25 октября 2001 г. № 136-ФЗ «Земельный кодекс Российской Федерации»
- Федеральный закон от 30.12.2008 № 309-ФЗ «О внесении изменений в статью ФЗ «Об охране окружающей среды» и отдельные законодательные акты Российской Федерации».
- Фисун Н.В. Экологический потенциал эколого-гидрогеологических систем в зоне влияния кучинского полигона твёрдых бы-

- товых отходов (Московская область) // Геология и разведка, 2018. № 3. С. 58–63.
- Харькина М.А. Динамика геоэкологической обстановки на примере полигона твердых бытовых отходов «Тимохово» (Московская область) // Сергеевские чтения. Вып. 20. М. : РУДН, 2018. С. 215–218.
- Хмельченко Е.Г. Твердые бытовые отходы и способы решения проблемы их утилизации в России // Государство, власть, управление и право: история и современность : материалы 8-й Всерос. научно-практ. конф., 2017. С. 192–195.
- Хмельченко Е.Г. Проблемы утилизации твёрдых коммунальных отходов в Российской Федерации и пути их решения // Муниципальная академия. 2018. № 2. С. 110–114.
- Хмельченко Е.Г., Казакова И.Г., Богомолов Ю.Г., Савельев А.Ф., Медовар Ю.А. О влиянии полигона твёрдых коммунальных отходов на качество подземных вод в Московской и Владимирской областях // Муниципальная академия. 2018. № 3. С. 55–62.
- Швейцарские технологии мутировали в Подмосковье. <https://odintsovo.info/news/?id=66887>
- Шевелева О.Б. Полигон, которым можно гордиться //Твердые бытовые отходы. 2015. № 4. С. 17–21.
- Экзарьян В.Н. Геоэкология и охрана окружающей среды. М. : Щит-М, 2009.
- Экзарьян В.Н. Методологические основы районирования территорий для выбора мест размещения полигонов отходов //Сергеевские чтения. Вып.20. Обращение с отходами: задачи геоэкологии и инженерной геологии : материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (22 марта 2018 г.). М.: РУДН, 2018. С. 97–101.
- Юганова Т.И. Выбор участков для размещения объектов обращения с отходами на основе методов многокритериального при-

- нятия решений // Геоэкология. 2019. № 4. С. 79–93. DOI: 10.31857/S0869-78092019479-93.
- Юганова Т.И. Методология экологической оценки жизненного цикла твердых коммунальных отходов. Основные положения и примеры применения // Геоэкология. 2020. № 5. С. 3–23.
- Юганова Т.И. Выщелачивание загрязняющих веществ из захороненных продуктов механико-биологической обработки отходов в полномасштабных экспериментах // Геоэкология. 2023. № 1. С. 59–75. DOI: 10.31857/S0869780923010101
- Юганова Т.И., Путилина В.С. Остатки от сжигания твердых коммунальных отходов: состав, выщелачивание загрязняющих веществ, обработка для уменьшения воздействия на окружающую среду // Геоэкология. 2023. № 5.
- Якшилов Д.С., Ищенко О.В., Мартынов Н.В. и др. Методика прогнозирования морфологического состава твердых бытовых отходов Москвы // Известия СПбГТИ (ТУ). 2010. № 7 (35). С. 77–79.
- Adani F., Confalonieri R., Tambone F. Dynamic respiration index as a descriptor of the biological stability of organic wastes // Journal of Environmental Quality. 2004. V. 33, № 5. P. 1866–1876.
- Amirbahman A., Schenberger R., Johnson C.A., Sigg L. Aqueous- and solid phase biochemistry of a calcareous aquifer system downgradient from a municipal solid waste landfill (Ninterhur, Switzerland) // Environmental Science & Technology. 1998. Vol. 32, № 13. P. 1933–1940.
- Angelidaki I., Mogensen A.S., Ahring B.K. Degradation of organic contaminants found in organic waste // Biodegradation. 2000. V. 11. № 6. P. 377–383.
- Arkenbout A. Hidden emissions: A story from the Netherlands. Case Study. <https://zerowasteurope.eu/library/hidden-emissions-a-story-from-the-netherlands>

- Assmuth T.W., Strandberg T. Ground-water contamination at Finnish landfills // *Water, Air & Soil Pollution*. 1993. V. 69. № 1–2. P. 179–199.
- Balogun-Adeleye R.M., Longe E.O., Aiyesimoju K.O. Environmental assessment of municipal solid waste (MSW) disposal options: A case study of Olushosun landfill. Lagos State// 1st Int. Conf. on Sustainable Infrastructural Development. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. Paper 640. DOI:10.1088/1757-899X/640/1/012091.
- Barlaz M.A., Schaefer D.M., Ham R.K. Bacterial population development and chemical characteristics of refuse decomposition in a simulated sanitary landfill // *Applied and Environmental Microbiology*. 1989. Vol. 55. № 1. P. 55–65.
- Barlaz M.A., Schaefer D.M., Ham R.K. Inhibition of methane formation from municipal refuse in laboratory scale lysimeters // *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 1989. Vol. 20/21, compl. P. 181–205.
- Barry D.A., Prommer H., Miller C.T., Engesgaard P., Brun A., Zheng C. Modelling the fate of oxidisable organic contaminants in groundwater // *Advances in Water Resources*. 2002. V. 25. №8–12. P. 945–983.
- Bayard R., de Ara joMorais J., Ducom G., Achour F., et al. R. Assessment of the effectiveness of an industrial unit of mechanical-biological treatment of municipal solid waste // *J. of Hazardous Materials*. 2010. V. 175, № 1–3. P. 23–32.
- Belevi H., Baccini P. Long-term behavior of municipal solid waste landfills // *Waste Management & Research*. 1989. V. 7. № 1. P. 43–56.
- Bilgili M.S., Demir A., nce M., zkaya B. Metal concentrations of simulated aerobic and anaerobic pilot scale landfill reactors // *Journal of Hazardous Materials*. 2007. V. 145, № 1–2. P. 186–194.
- Bjerg P.L., Rügge K., Pedersen J.K., Christensen T.H. Distribution of redox-sensitive groundwater quality parameters downgradient of a landfill (Grindsted, Denmark) // *Environmental Science & Technology*. 1995. V. 29. P. 1387–1394.

- Bottero M., Ferretti V. An Analytic Network Process-based approach for location problems: The case of a new waste incinerator plant in the Province of Torino (Italy) // *J. of Multi-Criteria Decision Analysis*. 2011. V. 17. № 3–4. P. 63–84.
- Bozkurt S. Simulations of the long-term chemical evolution in waste deposits: Licentiate Thesis / Department of Chemical Engineering and Technology, Royal Institute of Technology, Sweden, 1998.
- Bozkurt S., Moreno L., Neretnieks I. Long-term fate of organics in waste deposits and its effect on metal release // *The Science of the Total Environment*. 1999. Vol. 228. № 2–3. P. 135–152.
- Bozkurt S., Moreno L., Neretnieks I. Long-term processes in waste deposits // *The Science of the Total Environment*. 2000. V. 250. № 1–3. P. 101–121.
- Brady N.C., Weil R.R. *The Nature and Properties of Soils*: 13th edition. NJ, USA: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 2002. 960 p.
- Buss S.R., Herbert A.W., Morgan P., Thornton S.F., Smith J.W.N. A review of ammonium attenuation in soil and groundwater // *Quarterly Journal of Engineering Geology & Hydrogeology*. 2004. V. 37. №4. P. 347–359.
- Caccavo F., Jr, Lonergan D. J., Lovley D.R., Davis M., Stolz J.F., McInerney M. J. *Geobactersulfurreducens* sp. nov., a hydrogen- and acetate-oxidizing dissimilatory metal-reducing microorganism // *Applied and Environmental Microbiology*. 1994. V. 60. № 10. P. 3752–3759.
- Calace N., Massimiani A., Petronio B.M., Pietroletti M. Municipal landfill leachate-soil interactions: a kinetic approach // *Chemosphere*. 2001. V. 44. №5. P. 1025–1031.
- Chauhan A., Singh A. A hybrid multi-criteria decision making method approach for selecting a sustainable location of healthcare waste disposal facility // *J. of Cleaner Production*. 2016. № 139. P. 1001–1010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.098>.
- Christensen J.B., Botma J.J., Christensen T.H. Complexation of Cu and Pb by DOC in polluted groundwater: A comparison of experimental

- data and predictions by computer speciation models (WHAM and MINTEQA2) // *Water Research*. 1999. V. 33. №15. P. 3231–3238.
- Christensen T.H., Kjeldsen P., Bjerg P.L., Jensen D.L., Christensen J.B., Batin A., Albrechtsen H.-J., Heron G. Biogeochemistry of landfill leachate plumes // *Applied Geochemistry*. 2001. V. 16, № 7–8. P. 659–718.
- Ciavatta C., Govi M., Simoni A., Sequi P. Evaluation of heavy metals during stabilization of organic matter in compost produced with municipal solid wastes // *Bioresource Technology*. 1993. V. 43, № 2. P. 147–153.
- Coates J.D., Ellis D.J., Blunt-Harris E.L., Gaw C.V., Roden E.E., Lovley D.R. Recovery of humic-reducing bacteria from a diversity of environments // *Applied and Environmental Microbiology*. 1998. V. 64. №4. P. 1504–1509.
- Council directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the landfill of waste. 1999. 19 pp. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal_content/EN/TXT/PDF/?uri=OJ:L:1999:182:FULL&from=EN
- Cozzarelli I.M., Bhlke J.K., Masoner J., Breit G.N., Lorah M.M., Tuttle M.L.W., Jaeschke J.B. Biogeochemical evolution of a landfill leachate plume, Norman, Oklahoma // *Ground Water*. 2011. V. 49. № 5. P. 663–687.
- Cremiato R., Mastellone M.L., Tagliaferri C., Zaccariello L., Lettieri P. Environmental impact of municipal solid waste management using life cycle assessment: the effect of anaerobic digestion, materials recovery and secondary fuels production // *Renewable Energy*, Elsevier, 2018.V. 124(C). P. 180–188. DOI: 10.1016/j.renene.2017.06.033.
- De Simone L.A., Barlow P.M., Howes B.L. A Nitrogen-rich Septage-effluent Plume in a Glacial Aquifer, Cape Cod, Massachusetts, February 1990 through December 1992, 1996. 96 p.
- Deswal, M., Laura, G.S. GIS based modeling using Analytic Hierarchy Process (AHP) for optimization of landfill site selection of Rohtak city, Haryana (India) // *Journal of Applied and Natural Science*, 2018. 10(2): 633–642.

- Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. URL: <https://www.giz.de/de/weltweit/15109.html>
- Di Lonardo M. C., Binner E., Lombardi F. Influence assessment of a lab-scale ripening process on the quality of mechanically-biologically treated MSW for possible recovery // *Waste Management*. 2015. V. 43. P. 50–60.
- Di Lonardo M.C., Lombardi F., Gavasci R. Characterization of MBT plants input and outputs: a review // *Reviews in Environmental Science & Bio/Technology*. 2012. V. 1. № 4. P. 353–363.
- Di Lonardo M. C., Lombardi F., Gavasci R. Quality evaluation and improvement of mechanically–biologically treated municipal solid waste in view of a possible recovery // *Int. J. of Environmental Science & Technology*. 2015. V. 12, № 10. P. 3243–3254.
- Dijkstra J.J., Meeussen J.C., van der Sloot H.A., Comans R.N. A consistent geochemical modelling approach for the leaching and reactive transport of major and trace elements in MSWI bottom ash // *Applied Geochemistry*. 2008. V. 23, №6. P. 1544–1562.
- Djokanović S., Abolmasov B., Jevremović D. GIS application for landfill site selection: a case study in Pan evo. Serbia // *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 2016.V. 75. № 3. P. 1273–1299. DOI: 10.1007/s10064-016-0888-0.
- Ehrig H.-J. Quality and quantity of sanitary landfill leachate // *Waste Management and Research*. 1983. Vol. 1. P. 53–68.
- Elliott P., Eaton N., Shaddick G., Carter R. Can incidence near municipal solid wasn't incinerators in Great Britain. Part 2: Histopathological and casenote review of primary liver cancer cases // *British Journal of Cancer*. 2000. V. 85. № 5. P. 1103–1106. DOI: 10.1054/bjoc.1999.1046.
- Erkut E., Karagiannidis A. et al. A multicriteria facility location model for municipal solid waste management in North Greece// *European Journal of Operational Research*. 2008. № 187. P. 1402–1421.
- Erskine A.D. Transport of ammonium in aquifers: retardation and degradation // *Quarterly Journal of Engineering Geology & Hydrogeology* 2000. 33(2), p. 161–170; DOI:10.1144/qjegh.33.2.161

- Falatoonitoosi E., Leman Z., Sorooshian S., Salimi M. Decision-making trial and evaluation laboratory. Research Journal of Applied Sciences, Engineering & Technology. 2013. V. 5. № 13. P. 3476–3480.
- Fazlollahtabar H., Eslami H., Salmani H. Designing a fuzzy expert system to evaluate alternatives in fuzzy analytic hierarchy process. Journal of Software Engineering & Applications. 2010. V. 3. № 4. P. 409–418.
- Flyhammar P., Tamaddon F., Bengtsson L. Heavy metals in a municipal solid waste deposition cell // Waste Management & Research. 1998. V. 16. № 5. P. 403–410.
- Galitskaya I., Pozdniakova I. et al. Water-rock interaction and redox zones in aquifer at waste. Water-Rock Interaction-Birkle and Torres-Alvarado (eds). 2010 Taylor& Francis Group, London, P. 603–606.
- Garsia-Pereza J., Fernandez-Navarroa P., Castelloa A. et al. Cancer mortality in towns in the vicinity of incinerators and installations for the recovery or disposal of hazardous waste // Environment International. 2013. V. 51. P. 31–44. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2012.10.003>
- Ghobadi, M.H., Taheri, M., Taheri, K. Municipal solid waste landfill siting by using analytical hierarchy process (AHP) and a proposed karst vulnerability index in Ravansar County, west of Iran//Environ Earth Sci. 2017. № 76. P. 68. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6392-4>
- Gounaris V., Anderson P.R., Holsen T.M. Characteristics and environmental significance of colloids in landfill leachate // Environmental Science & Technology. 1993. V. 27. P. 1381.
- Guler D., Yomralioglu T. Alternative suitable landfill site selection using analytic hierarchy process and geographic information systems: a case study in Istanbul // Environmental Earth Sciences, October 2017. 76: 678. DOI: 10.1007/s12665-017-7039-1.
- Harmesen J. Identification of organic compounds in leachate from a waste tip // Water Research. 1983. V. 17. № 6. P. 699–705.

- Hater G., Green R., Vogt G., Davis-Hoover W., Carson D., Thorneloe S., Kremer F. Landfills as Bioreactors: Research at the Outer Loop Landfill, Louisville, Kentucky. US Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, 2003. 411 p.
- He P.-J., Xiao Z., Shao L.-M., Yu J.-Y., Lee D.-J. In situ distributions and characteristics of heavy metals in full-scale landfill layers // Journal of Hazardous Materials. 2006. V. 137. №3. P. 1385–1394
- Heron G., Christensen T.H., Tjell J.C. Oxidation capacity of aquifer sediments // Environmental Science & Technology. 1994. V. 28. №1. P. 153–158.
- Heron G., Crouzet C., Bourg A.C.M., Christensen T.H. Speciation of Fe (II) and Fe (III) in contaminated aquifer sediments using chemical extraction techniques // Environmental Science & Technology. 1994. V. 28. № 9. P. 1698–1705.
- Horan N.J. Biological Wastewater Treatment Systems, Theory and Operation. Chichester, England, NY, USA: John Wiley & Sons, 1990. 310 p.
- Hwang C.L., Yoon K. Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. Springer-Verlag, Berlin, 1981.
- Hydrogeological Risk Assessments for Landfills and the Derivation of Groundwater Control and Trigger Levels: Landfill Directive Project LFTGN01, Bristol, UK: Environment Agency, 2003.
- Hyk J. Leaching from Municipal Solid Waste Incineration Residues: Ph.D. thesis / Technical University of Denmark, Department of Environmental Engineering. 2008. 64 p. URL: https://backend.orbit.dtu.dk/ws/files/127447161/ENV2008_033_1_.pdf
- Innovative Abfall management in Stockholm URL: <https://www.br.de/br-fernsehen/sendungen/euroblick/euroblick-schweden-abfall-100.html>
- Islam J., Singhal N., O’Sullivan M. Modeling biogeochemical processes in leachate-contaminated soils: a review // Transport in Porous Media. 2001. V. 43. № 3. P. 407–440.
- Ivanova L.K., Richards D.J., Smallman D.J. The long term settlement of landfill waste // Waste & Resource Management. 2008. V. 161. № 3. P. 121–133.

- Jensen D.L., Christensen T.H. Colloidal and dissolved metals in leachates from four Danish landfills // *Water Research*. 1999. V. 33. № 9. P. 2139–2147.
- Jensen D.L., Boddum J.K., Redemann S., Christensen T.H. Speciation of dissolved iron (II) and manganese (II) in groundwater pollution plume // *Environmental Science & Technology*. 1998. V. 32, № 18. P. 2657–2664.
- Jiang J.G., Yang G.D., Deng Z., Huang Y.F., Huang Z.L., Feng X.M., Zhou S.Y., Zhang C.P. Pilot-scale experiment on anaerobic bioreactor landfills in China // *Waste Management*. 2007. V. 27. № 7. P. 893–901.
- Kaoutar B., Lahcen B. A decision support approach for optimized siting of municipal solid waste landfill case study Tangier Morocco// *International Journal of Engineering Research & Applications (IJERA)*. 2012. V. 2. № 6. P. 1676–1684.
- Khan, D, Samadder, S.R. Municipal solid waste management using geographical information system aided methods: a mini review // *Waste Manag. Res.* 2014, 32:1049–1062.
- Kharat M.G., Kamble S.J., Raut R.D., Kamble S.S., Dhume S.M. Modeling landfill site selection using an integrated fuzzy MCDM approach. *Modeling Earth Systems & Environment*. 2016. V. 2. № 2, article 53. 16 p.
- Khodaparast, M., Rajabi, Ali M., Edalat, Ali. Municipal solid waste landfill siting by using GIS and analytical hierarchy process (AHP): a case study in Qom city, Iran// *Environmental Earth Sciences*, January 2018. № 77. P. 52. DOI: 10.1007/s12665-017-7215-3.
- Kim H., Jang Y.-C., Townsend T. The behavior and long-term fate of metals in simulated landfill bioreactors under aerobic and anaerobic conditions // *Journal of Hazardous Materials*. 2011. V. 194. P. 369–377.
- Kjeldsen P., Barlaz M.A., Rooker A.P., Baun A., et al. Present and long-term composition of MSW landfill leachate: A Review // *Critical Reviews in Environmental Science & Technology*. 2002. V. 32. № 4. P. 297–336.

- Kjeldsen P., Christophersen M. Composition of leachate from old landfills in Denmark // *Waste Management & Research*. 2001. V. 19, № 3. P. 249–256.
- Klein T., Niessner R. Characterization of heavy-metalcontaining seepage water colloids by flow FFF, ultrafiltration, ELISA and AAS // *MikrochimicaActa*. 1998. V. 129. № 1–2. P. 47–55.
- Kontos, T.D., Komilis, D.P., Halvadakis, C.P. () Siting MSW landfills with a spatial multiple criteria analysis methodology // *Waste Management*. 2005. № 25. P. 818–832.
- Kozliakova, I.V., Kozhevnikova, I.A., Eremina, O.N., Anisimova, N.G. Engineering geological typification and zoning territory for allocation of municipal solid waste management facilities// *PeriodicoTcheQuimica*, 2020. V. 17. № 35. P. 1124–1136.
- Kruempelbeck I., Ehrig H.-J. Long-term behavior of municipal solid waste landfills in Germany // *Sardinia 99, Seventh International Waste Management and Landfill Symposium*, 48 October, S. Margherita di Pula, Cagliari, Proceedings vol. I / Christensen T.H., Cossu R., Stegmann R., eds. CISA – Environmental Sanitary Engineering Centre, Cagliari, Italy 1999. P. 27–36.
- Laverman A.M, Blum J.S., Schaefer J.K., Phillips E.J.P., Lovley D.R., Oremland R.S. Growth of strain SES-3 with arsenate and other diverse electron acceptors // *Applied and Environmental Microbiology*. 1995. V. 61. № 10. P. 3556–3561.
- Li W., Sun Y., Huang Y., Shimaoka T., Wang H., Wang Y., Ma L., Zhang D. Evaluation of chemical speciation and environmental risk levels of heavy metals during varied acid corrosion conditions for raw and solidified/stabilized MSWI fly ash // *Waste Management*. 2019. V. 87. P. 407–416.
- Lieto A., Verginelli I., Zingaretti D., Lombardi F. Total organic carbon as a proxy for metal release from biostabilized wastes// *Environmental Science & Pollution Research International*. 2020. 11 pp. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11356-020-09960-1>.
- Lindberg D., Molin C., Hupa M. Thermal treatment of solid residues from WtE units: a review // *Waste Management*. 2015. V. 37. P. 82–94.

- Lloyd J.R., Macaskie L.E. A novel phosphorimager-based technique for monitoring the microbial reduction of technetium // *Applied and Environmental Microbiology*. 1996. V. 62. № 2. P. 578–582.
- Lombardi F., Costa G., Sirini P. Analysis of the role of the sanitary landfill in waste management strategies based upon a review of lab leaching tests and new tools to evaluate leachate production // *Revista Ambiente & Água*. 2017. V.12, № 4. 13 p.
- Lombardi F., Di Lonardo M.C., Lieto A., Sirini P. Investigating the leaching properties of MBT wastes and composts from aerobic/anaerobic processes // *Revista Ambiente & Água*. 2018. V. 13, № 1. 14 pp.
- Looser M.O., Parriaux A., Bensimon M. Landfill underground pollution detection and characterization using inorganic traces // *Water Research*. 1999. V. 33. № 17. P. 3609–3616.
- López A., García M., Esteban-García A.L., Cuartas M., Molleda A., Lobo A. Emissions from mechanically biologically treated waste landfills at field scale // *International Journal of Environmental Science & Technology*. 2018. V. 15, № 6. P. 1285–1300.
- Lornage R., Redon E., Lagier T., Hébli I., Carr J. Performance of a low cost MBT prior to landfilling: study of the biological treatment of size reduced MSW without mechanical sorting // *Waste Management*. 2007. V. 27, № 12. P. 1755–1764.
- Lovley D.R. Bioremediation of organic and metal contaminants with dissimilatory metal reduction // *Journal of Industrial Microbiology*. 1995. V. 14. P. 85–93.
- Lovley D.R., Anderson R.T. Influence of dissimilatory metal reduction on fate of organic and metal contaminants in the subsurface // *Hydrogeology Journal*. 2000. V. 8. № 1. P. 77–88.
- Lovley D.R., Baedeker M. J., Lonergan D.J., Cozzarelli I.M., Phillips E.J.P., Siegel D.I. Oxidation of aromatic contaminants coupled to microbial iron reduction // *Nature*. 1989. V. 339. № 6222. P. 297–299.
- Lovley D.R., Fraga J.L., Blunt-Harris E.L., Hayes L.A., Phillips E.J.P., Coates J.D. Humic substances as a mediator for microbially cata-

- lysed metal reduction // *ActaHydrochimica et Hydrobiologica*. 1998. V. 26. №3. P. 152–157.
- Lovley D.R., Lonergan D.J. Anaerobic oxidation of toluene, phenol, and p-cresol by the dissimilatory iron-reducing organism, GS-15 // *Applied and Environmental Microbiology*. 1990. V. 56. № 6. P. 1858–1864.
- Lovley D.R., Phillips E.J.P., Gorby Y.A., Landa E.R. Microbial reduction of uranium // *Nature*. 1991. V. 350. № 6317. P. 413–416.
- Lovley D.R., Woodward J.C., Chapelle F.H. Simulated anoxic biodegradation of aromatic hydrocarbons using Fe (III) ligands // *Nature*. 1994. V. 370. № 6484. P. 128–131.
- Lovley D.R., Woodward J.C., Chapelle F.H. Rapid anaerobic benzene oxidation with a variety of chelated Fe(III) forms // *Applied and Environmental Microbiology*. 1996. V. 62. №1. P. 288–291.
- Luo H., Cheng Y., He D., Yang E.-H. Review of leaching behavior of municipal solid waste incineration (MSWI) ash // *Science of The Total Environment*. 2019. V. 668. P. 90–103.
- Lyngkilde J., Christensen T.H. Redox zones of a landfill leachate pollution plume (Vejen, Denmark) // *Journal of Contaminant Hydrology*. 1992. V. 10. P. 273–289.
- MaguiriAbdelhakim El, KissiBenaissa, IdrissiLaila, Souabi Salah. Landfill site selection using GIS, remote sensing and multicriteria decision analysis: case of the city of Mohammedia, Morocco// *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 2016, no. 75, pp. 1301–1309. DOI 10.1007/s10064-016-0889-z.
- Management of APC Residues from W-t-E Plants. An overview of management options and treatment methods: Second edition / T. Astrup, Department of Environmental Engineering Technical University of Denmark; ISWA-WG Thermal Treatment of Waste, Subgroup APC Residues from W-t-E plants. ISWA, 2008. 116 p. URL: https://books.google.se/books/about/Management_of_APC_Residues_from_W_t_E_Pl.html?id=WGh9XwAACAAJ&redir_esc=y (дата обращения: 26.03.2023).

- Martensson A.M., Aulin C., Wahlberg O., Agren S. Effect of humic substances on the mobility of toxic metals in a mature landfill // *Waste Management & Research*. 1999. V. 17. № 4. P. 296–304.
- Mondelli, G., Giacheti, H.L., Gimenez Boscov, M.E. et al. Geoenvironmental site investigation using different techniques in a municipal solid waste disposal site in Brazil.// *Environ. Geol.* 2007. No. 52. P. 871–887. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0529-1>
- Muhammad TajammalMunir, Bing Li, Muhammad Naqvi, Abdul-SattarNizami. Green loops and clean skies: Optimizing municipal solid waste management using data science for a circular economy // *Environmental Research*. 2024. V. 243. 117786.<https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117786>
- Municipal waste management across European countries. URL: <https://www.eea.europa.eu/themes/waste/municipal-waste/municipal-waste-management-across-european-countries>.
- Nakhaei M., Amiri V., Rezaei K., Moosae F. An investigation of the potential environmental contamination from the leachate of the Rasht waste disposal site in Iran // *Bull. Eng. Geol. Environ.* 2015. № 74. P. 233–246. DOI 10.1007/s10064-014-0577-9.
- Norese M.F. ELECTRE III as a support for participatory decision-making on the localisation of waste-treatment plans // *Land Use Policy*. 2006. Vol. 23. № 1. P. 76–85.
- Ogola, J.S., Chimuka, L., Tshivhase, S. Management of municipal solid wastes: a case study in Limpopo Province, South Africa integrated // *Waste Management*. 2011. V. I. P. 91–112. Available at: www.intechopen.com
- Pantini S., Verginelli I., Lombardi F. Analysis and modeling of metals release from MBT wastes through batch and up-flow column tests // *Waste Management*. 2015. V. 38. P. 22–32.
- Phukon P., Phukan S., Goswami R. Municipal Solid Waste (MSW) disposal site selection in and around Guwahati city using GIS. *Map India* 2005. <https://www.researchgate.net/publication/228456456>.
- Price G.A., Barlaz M.A., Hater G.R. Nitrogen management in bioreactor landfills // *Waste Management*. 2003. V. 23. № 7. P. 675–688.

- Qu M., He P.J., Shao L.M., Lee D.J. Heavy metals mobility in full-scale bioreactor landfill: initial stage // *Chemosphere*. 2008. V. 70. № 5. P. 769–777.
- Rahmat Z.G., Niri M.V., Alavi N. et al. Landfill site selection using GIS and AHP: a case study: Behbahan, Iran // *KSCE Journal of Civil Engineering*. January. 2017. V. 21. Is. 1. P. 111–118. DOI: 10.1007/s12205-016-0296-9.
- Robinson H.D., Knox K., Bone B.D., Picken A. Leachate quality from landfilled MBT waste // *Waste Management*. 2005. V. 25, № 4. P. 383–391.
- Rooney-Varga J.N., Anderson R.T., Fraga J.L., Ringelberg D., Lovley D.R. Microbial communities associated with anaerobic benzene degradation in a petroleum-contaminated aquifer // *Applied and Environmental Microbiology*. 1999. V. 65. № 7. P. 3056–3063.
- Rosik-Dulewska C. Podstawy gospodarki odpadami. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN S.A., 2000. P. 49–52.
- Rügge K., Bjerg P.L., Christensen T.H. Distribution of organic compounds from municipal solid waste in the groundwater downgradient of a landfill (Grindsted, Denmark) // *Environmental Science & Technology*. 1995. V. 29. № 5. P. 1395–1400.
- Russo R. de F.S.M., Camanho R. Criteria in AHP: a systematic review of literature // *Procedia Computer Science*. 2015. V. 55. P. 1123–1132.
- Saaty T.L. Decision Making with Dependence and Feedback. The Analytic Network Process. RWS Publications, 2001. 370 p.
- Saaty T.L. Decision making with the analytic hierarchy process // *International Journal Services Sciences*. 2008. Vol. 1. No. 1. P. 83–98.
- Saaty T.L. How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process // *European Journal of Operational Research*. 1990. V. 48. P. 9–26.
- Saaty T.L., Tran L.T. Fuzzy judgments and fuzzy sets. *International Journal of Strategic Decision Sciences*, 2010. V. 1. № 1. P. 23–40.

- Schueler A.S., Mahler C.F. Classification method for urban solid waste disposal sites // *Journal of Environmental Protection*. 2011. № 2. P. 473–481. DOI: 10.4236/jep.2011.24055.
- Scott D.T., McKnight D.M., Blunt-Harris E.L., Kolesar S.E., Lovley D.R. Quinone moieties act as electron acceptors in the reduction of humic substances by humics-reducing microorganisms // *Environmental Science & Technology*. 1998. V. 32. № 19. P. 2984–2989.
- Siddiqui A.A., Richards D.J., Powrie W. Investigations into the landfill behaviour of pretreated wastes// *Waste Management*. 2012.V. 32. № 7. P. 1420–1426.
- Siddiqui A.A., Richards D.J., Powrie W. Biodegradation and flushing of MBT wastes // *Waste Management*. 2013.V. 33. № 11. P. 2257–2266.
- Thamdrup B., Dalsgaard T. Production of N_2 through anaerobic ammonium oxidation coupled to nitrate reduction in marine sediments // *Applied & Environmental Microbiology*. 2002. V. 68. № 3. P. 1312–1318.
- Tzeng G.-H., Huang J.-J. *Multiple Attribute Decision Making. Methods and Applications*. London, NewYork: CRC Press, Taylor & Francis Croup, 2011, 350 p.
- Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. O odpadach. URL: <https://www.infor.pl/akt-prawny/DZU.2018.003.0000021,ustawa-o-odpadach.html>
- van Praagh M., Heerenklage J., Smidt E., Modin H.,Stegmann R., Persson K.M. Potential emissions from two mechanically-biologically pretreated (MBT) wastes // *Waste Management*. 2009. V. 29. № 2. P. 859–868.
- Vodyanitskii Yu. N. Biochemical processes in soil and groundwater contaminated by leachates from municipal landfills (Mini review) // *Annals of Agrarian Science*. 2016. V. 14. №3. P. 249–256.
- Wang G., Qin L., Li G., Chen L. Landfill site selection using spatial information technologies and AHP: A case study in Beijing, China // *J. Environ Manage*. 2009. V. 90. № 8. P. 2414-2421. DOI: 10.1016/j.jenvman.2008.12.008.

- Waste-Environment-Europe-Commission.URL: <http://ec.europa.eu/environment/waste/index.htm>
- Weibel G., Eggenberger U., Schlumberger S., Mader U.K. Chemical associations and mobilization of heavy metals in fly ash from municipal solid waste incineration // Waste Management. 2017. V. 62. P. 147–159.
- Wu G., Li L.Y. Modeling of heavy metal migration in sand/bentonite and the leachate pH effect // Journal of Contaminant Hydrology. 1998. Vol. 33. № 3–4. P. 313–336.
- Yannah, M., Martens, K., Van Camp, M., Walraevens, K. Geophysical exploration of an old dumpsite in the perspective of enhanced landfill mining in Kermt area, Belgium // Bull.Eng. Geol. Environ, 2019, 78:55–67. DOI:10.1007/s10064-017-1169-2.
- Zelenović Vasiljević T., Srdjević Z., Bajčetić R. et al. GIS and the Analytic Hierarchy Process for Regional Landfill Site Selection in Transitional Countries: A Case Study From Serbia// Environmental Management. February 2012. V. 49. Is. 2.P. 445–458. DOI: 10.1007/s00267-011-9792-3.
- Zhang Y., Cetin B. , Likos W.J., Edil T.B. Impacts of pH on leaching potential of elements from MSW incineration fly ash // Fuel. 2016. V. 184. P. 815–825.
- Zhao R., Gupta A., Novak J.T., Goldsmith C.D. Evolution of nitrogen species in landfill leachates under various stabilization states // Waste Management. 2017. V. 69. P. 225–231.
- Zhao R.Z., Novak J.T., Goldsmith C.D. Evaluation of on-site biological treatment for landfill leachates and its impact: a size distribution study // Water Research. 2012. V. 46. №12. P. 3837–3848.

Научное издание

**БЕЗОПАСНОЕ ЗАХОРОНЕНИЕ
ТВЕРДЫХ
КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ
В ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЕ**

Редактор *Ж.В. Медведева*
Технический редактор *Н.А. Ясько*
Компьютерная верстка *Т.Н. Селивановой*
Дизайн обложки *М.В. Роговой*

Подписано в печать 03.06.2025. Формат 60×90/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура NewtonC.
Усл. печ. л. 31,75. Тираж 500 экз. Заказ 1986.

Российский университет дружбы народов
115419, ГСП-1, г. Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3

Типография РУДН
115419, ГСП-1, г. Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3
Тел.: 8 (495) 955-08-61. E-mail: publishing@rudn.ru

