ВЕСТНИК РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК, 2020, том 90, № 6, с. 567–574

ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ

ТЕРРИТОРИАЛЬНОЕ РАЗМЕЩЕНИЕ ПОЛИГОНОВ ТВЁРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ

© 2020 г. В. И. Осипов[a,*], Ю. А. Мамаев[a,**], И. В. Козлякова[a,***]

[a] Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Москва, Россия

*E-mail: osipov@geoenv.ru

**E-mail: mamaev47ya@mail.ru

***E-mail: kozlyakova@rambler.ru

Поступила в редакцию 18.09.2019 г.
После доработки 01.11.2019 г.
Принята к публикации 03.12.2019 г.

В статье рассматриваются научные основы территориального планирования размещения твёрдых коммунальных отходов (ТКО), интенсивно накапливающихся в нашей стране. Отмечается, что хаотичное, не контролируемое их размещение приводит к загрязнению атмосферного воздуха, почв, горных пород, подземных вод – важнейших жизнеобеспечивающих ресурсов биосферы, что вызывает снижение качества жизни людей. Научно обоснованное решение этой проблемы базируется на инженерно-геологическом районировании территорий по геологическим условиям, позволяющем находить “геологические ловушки”, надёжно изолирующие отходы от окружающей среды. С учётом методики такого районирования приводятся примеры его применения при размещении отходов в геологических массивах различной степени пригодности.

Ключевые слова: твёрдые коммунальные отходы, инженерно-геологическое районирование территорий по геологическим условиям размещения ТКО, выбор участков размещения ТКО.

DOI: 10.31857/S0869587320040106

Экологически безопасное обращение с отходами относится к одной из важнейших проблем в нашей стране. Острота её объясняется тем, что в России быстрыми темпами идёт наращивание объёмов отходов производства и потребления, негативно воздействующих на окружающую среду, экологическую безопасность и здоровье населения. В настоящее время на полигонах и свалках ежегодно накапливается около 67 млн т ТКО [1], при этом на каждого гражданина Российской Федерации – приходится более 400 кг. Доля Москвы составляет около 5.5 млн т ТКО, а вместе с Московской областью – 11 млн т [1].

По данным Росприроднадзора, в России насчитывается 1399 полигонов, более 7000 санкционированных и около 17500 несанкционированных свалок ТКО. Общая площадь полигонов и свалок составляет более 150 тыс. га, площадь на-

ОСИПОВ Виктор Иванович – академик РАН, научный руководитель ИГЭ РАН. МАМАЕВ Юрий Александрович – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник ИГЭ РАН. КОЗЛЯКОВА Ирина Владимировна – кандидат геолого-минералогических наук, заведующая лаборатории экзогенной геодинамики и анализа геологических рисков ИГЭ РАН.

рушенных земель – свыше 1 млн га. Объём образующихся отходов существенно превышает объём перерабатываемых, что приводит к продолжающемуся росту общей площади полигонов и свалок: ежегодно она увеличивается по разным оценкам на 1000–5000 га. Большинство свалок расположено вблизи населённых пунктов (58%), водоохранных зон (16%), на землях сельскохозяйственного назначения (15%) и лесного фонда (8%).

Объекты складирования ТКО размещаются повсеместно без какого-либо научного обоснования, практически в силу хозяйственной необходимости. Их накопление идёт на открытых площадках, не защищённых от выпадающих осадков и других внешних воздействий. Часто для этого используются заброшенные песчаные карьеры и овраги, находящиеся недалеко от мест образования отходов, и никого не беспокоит тот факт, что песчаная толща – самая неблагоприятная среда для помещения ТКО из-за её высокой проницаемости.

Подобную практику необходимо прекратить, перейдя к научно обоснованному размещению отходов. Общепризнанная концептуальная основа безопасного их захоронения в геологической среде – создание многобарьерной изоляции. Суть её в применении как природных (геологических), так и инженерных (искусственных) барьеров. Первые из них, называемые также геологическими ловушками, изолируют отходы от биосферы на многие десятки лет до полного их разложения. От эффективности использования таких ловушек зависят необходимость и масштаб применения инженерных барьеров, что существенно влияет на стоимость сооружения безопасных полигонов ТКО.

Цель проводимых нами исследований – разработка теоретических основ районирования территорий субъектов Российской Федерации по степени пригодности и безопасности размещения объектов ТКО на основе всестороннего изучения природных условий, их экспертной оценки и отражения на картах районирования, а также разработка требований по охране окружающей среды. Наличие карт позволяет научно обоснованно принимать управленческие решения при планировании рационального использования территорий.

Поиск геологических массивов для безопасного размещения ТКО – ответственная научная задача, при решении которой должен учитываться комплекс факторов, влияющих на соблюдение экологических, социальных и экономических требований. Важнейшая процедура выбора площадок размещения объектов ТКО – районирование, заключающееся в разделении изучаемой территории на участки по признакам пригодности природных условий для размещения таких объектов [2, 3]. Районирование проводится на основе оценки изолирующих и других свойств геологической среды, создающих природные барьеры, что способствует снижению загрязнения территории, распространения вредных образований в атмосфере, ландшафтах, подземных водах, почвах и горных породах.

Районирование выполняется в два этапа. На первом рассматриваются геологические особенности территории, составляется соответствующая карта, на втором даётся сравнительная оценка, проводятся ранжирование и выделение участков по степени пригодности к размещению объектов ТКО.

Районирование по геологическим условиям. В ходе работ первого этапа изучаются возраст пород, их генезис, геодинамические условия образования, литологический состав и строение толщ, геоморфологические и гидрогеологические условия. Это позволяет выделять на изучаемой территории иерархию геологических тел (массивов), характеризующихся близостью геологической истории образования, строения, состояния и свойств [4]. По этим признакам определяются инженерно-геологические районы и участки обустраиваемой территории. В основу выделения районов (мезомассивов) берутся геоморфологические и литолого-стратиграфические признаки. Инженерно-геологические участки (массивы) обособляются в границах инженерно-геологических районов с учётом состава, строения и свойств грунтовых толщ, их обводнённости и развития опасных экзогенных процессов. При этом вся система ранжирования массивов различного ранга основывается на принципе “матрёшки”: территориальные единицы высокого ранга включают в себя серию мелких территориальных единиц низкого ранга.

Оценка инженерно-геологических массивов. На втором этапе исследований проводится сравнительная оценка выделенных инженерно-геологических массивов по степени их пригодности для размещения объектов ТКО с учётом экологических и социально-экономических требований. За основу такого районирования берётся анализ трёх основных факторов: литологический состав пород и их свойства, гидрогеологические условия, развитие опасных природных процессов. Анализ первого фактора позволяет оценить изолирующие свойства пород и их способность выполнять роль природных геологических барьеров, препятствующих распространению загрязнений от свалок. На основе второго фактора – гидрогеологических условий – оценивается объективная возможность контакта предполагаемого проектируемого объекта ТКО с подземными водами. Третий фактор отражает вероятность нару-

Таблица 1. Шкала баллов по оценке изолирующих свойств различных литологических типов пород

Критерии/Типы пород	Фильтрационная способность, Кф, м/сут	Баллы	Удерживающая способность, мг/кг	Баллы
Глины и тяжёлые суглинки	$<5 \times 10^{-5}$	50	>1000	20
Лёгкие и средние суглинки	5×10^{-5}–5×10^{-3}	20	500–1000	10
Супеси	5×10^{-3}–0.5	10	100–500	2
Пески и гравий	>0.5	0	<100	0

шения экологической безопасности объектов ТКО в результате развития опасных природных процессов, таких как затопление, подтопление, линейная эрозия и абразия, суффозия, развитие карста, оползней и др.

Оценка вклада указанных факторов в итоговый показатель пригодности инженерно-геологических массивов для размещения объектов ТКО производится по балльной шкале, разрабатываемой на основе экспертных оценок составителей карты. Для каждого фактора выстраивается отдельная шкала баллов, позволяющая учитывать его значимость при расчёте критерия оценки (пример таких оценок приводится ниже).

Литологический состав пород и их свойства. Изолирующие свойства вмещающей толщи пород – решающий фактор обеспечения безопасности объекта хранения/захоронения ТКО. Он предполагает формирование геологического барьера, препятствующего распространению загрязнения. Если защитные свойства геологической среды оценить по интегральной 100-балльной шкале, то предельный вклад состава пород в эту способность может достигать 70 баллов. Основными критериями изолирующих свойств пород являются коэффициент фильтрации ($К_ф$, м/сут) и удерживающая (поглощающая) способность (мг/г), причём в зависимости от литологического состава они могут существенно меняться. Так, у глин и тяжёлых суглинков фильтрационная способность ниже, а удерживающая способность выше, чем у лёгких и средних суглинков. За лёгкими и средними суглинками следуют супеси, а замыкают перечень пород по их изолирующим свойствам пески и гравий. Соответственно, фильтрационная способность глин и тяжёлых суглинков оценивается в 50 баллов, песков и гравия – 0 баллов (табл. 1).

Основным переносчиком загрязнений считается вода, фильтрующаяся через тело свалки. Поэтому с повышением коэффициента фильтрации защитные свойства вмещающей толщи резко снижаются. Наилучшими защитными характеристиками обладают глинистые породы, поровое пространство которых представлено тонкими порами (от долей миллиметра до микронных величин), часто закрытыми и недоступными для фильтрации воды. Кроме того, на поверхности глинистых минералов формируются гидратные плёнки адсорбированной воды, обладающие повышенной вязкостью и также препятствующие фильтрации [5]. Пески и тем более гравий свободно пропускают фильтруемый поток и практически не создают никакого защитного барьера.

С фильтратом во вмещающие породы поступают различные загрязнители, в том числе токсичные вещества, которые, взаимодействуя с минеральными частицами, удерживаются в породе. Общее содержание загрязнителей, накапливающихся в породах, характеризуется показателем массовой концентрации загрязнителей (мг/кг) [6]:

$$С_з = М_з/М_{тв},$$

где $М_з$ – масса накопленных загрязнителей всех видов, $М_{тв}$ – масса минеральной части пород. Физическая природа механизма удержания загрязнителей может быть различной: механической, физико-химической (адсорбционной), химической. При этом загрязнители могут находиться в виде привнесённых или вновь образующихся (в результате раскристаллизации) твёрдых включений, застревающих в порах или формирующих цемент на контактах частиц, скоплений ионов или химических образований, адсорбирующихся на активных поверхностях минералов, гелеобразных органо-минеральных комплексов и жидких образований в виде эмульсий.

Удерживающая способность геологической толщи так же, как фильтрационная, зависит от состава пород: наибольшая она у глин и тяжёлых суглинков, наименьшая – у песков и гравия. В зависимости от этого максимальная величина показателя массовой концентрации загрязнителей снижается при переходе от глин к пескам, что позволяет оценивать удерживающую способность различных типов пород от 20 до 0 (см. табл. 1).

Интегральная оценка изолирующей способности изучаемого массива (фильтрационной и удерживающей) осуществляется на основе сложения полученных баллов для каждого литологического типа пород, умноженных на его относи-

Таблица 2. Шкала баллов для оценки гидрогеологических условий участков размещения ТКО

Глубина залегания уровня грунтовых вод	Баллы
Отсутствие грунтовых вод в зоне влияния объекта	30
УГВ в зоне влияния объекта, но ниже основного геологического барьера	15
УГВ выше основного геологического барьера	5
Участок подтоплен (УГВ на глубине <2 м)	0

Таблица 3. Шкала баллов для оценки опасных природных процессов

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

тельную мощность в разрезе (в долях единицы). Рассмотренная выше шкала баллов составлена для массивов сыпучих и связанных пород мощностью 15–20 м.

Гидрогеологические условия. Гидрогеологические условия, наряду с составом пород, оказывают существенное влияние на условия размещения отходов, поскольку контакт жидкой фазы геологической среды с ТКО способствует быстрому распространению загрязнения в окружающей среде и снижению качества воды.

Для оценки влияния подземных вод на условия размещения объектов ТКО по балльной шкале важно определить максимальную величину показателя, отражающего роль гидрогеологических условий. По экспертной оценке, она может достигать 30 баллов. Эта величина варьируется в зависимости от наличия водоносного горизонта в среде, вмещающей объект ТКО, и взаимодействия с ним подземных вод. Важно, где находится уровень горизонта подземных вод (УГПВ): выше или ниже главного геологического барьера – толщи глинистых пород, являющейся основанием полигона. Исходя из этого, показатель гидрогеологических условий характеризуется четырьмя критериями, которым соответствует определённая балльная оценка (табл. 2).

Наиболее благоприятными следует считать условия, когда подземные воды отсутствуют в сфере влияния объекта ТКО (30 баллов), и менее благоприятными – когда УГПВ находится в зоне влияния объекта, но ниже толщи глинистых пород – главного геологического барьера (15 баллов). Гидрогеологические условия становятся неблагоприятными на участках, где УГПВ выше глинистой толщи, а подземные воды непосредственно контактируют с телом свалки (5 баллов). Массивы, полностью подтоплённые подземными водами (УГПВ на глубине не более 2 м) непригодны для размещения ТКО (0 баллов).

Опасные природные процессы. Третий фактор, влияющий на районирование территории по условиям размещения объектов ТКО, – опасные природные процессы. Для европейской части России ими могут быть затопление объекта в результате половодья, подтопление площадки при подъёме УГПВ, эрозия водными потоками, образование оползней, карстообразование и др. Развитие природных опасностей чревато разрушением объектов ТКО и экологическим бедствием, поэтому оценивается баллами с отрицательным значением, максимальная величина которого – 100. Наибольшая угроза возникает при затоплении в результате наводнений (–100 баллов), далее идут подтопление (–20), эрозия временными и постоянными водотоками (–10), склоновые процессы: оползни, осыпи (–10), карстообразование (–5).

Величина этого показателя зависит и от повторяемости опасного явления за весь период существования объекта до полного разложения свалочного тела (100 лет), выраженной в долях единицы. Каждый процесс оценивается как произведение его опасности (баллы) и повторяемости (доли единицы). В том случае, когда на площадке возможно развитие нескольких опасных процессов определяется интегральная величина баллов всех процессов (табл. 3).

По итогам анализа трёх факторов – литологического состава пород и их свойств, гидрогеологических условий, развития опасных природных процессов – вычисляется сумма набранных баллов. Этот численный показатель служит основным критерием подразделения массивов пород по условиям размещения объектов ТКО.

Районирование по условиям размещения ТКО. Суммарная величина баллов берётся за основу подразделения территории по условиям размещения отходов. Для этого все инженерно-геологические массивы ранжируются по баллам на 4 типа: участки благоприятные, условно благоприятные, условно неблагоприятные и неблагоприятные. Каждому из них соответствует диапазон баллов, характеризующий степень пригодности (табл. 4). Однотипные территории выделяются на карте одинаковым цветом, а сама она приобретает статус оценочной, позволяющей проводить районирование на количественной основе.

Детальность получаемой карты зависит от её масштаба. Карты, предназначенные для проектирования конкретных объектов в пределах относительно небольших по площади территорий (отдельных административных районов или муниципальных образований), составляются в масштабах 1:25 000 – 1:10000. Крупномасштабные карты относятся к числу важнейших документов при планировании размещения ТКО, позволяя принять решения по следующим вопросам:

• научное обоснование выбора участков размещения отходов с учётом природных условий, социально-экологической безопасности и экономической целесообразности;

• инвентаризация мест размещения существующих и ранее сформированных полигонов и свалок с целью их закрытия, перезахоронения и реабилитации;

• принятие предварительных решений по конструкции будущих объектов обращения с ТКО, объёму и содержанию работ, связанных с их инженерной подготовкой и защитой;

• выявление логистических проблем, включающих доступность объекта, его оптимальное размещение относительно мест накопления ТКО и расположения перерабатывающих предприятий.

Характеристика территорий, различающихся условиями размещения отходов. Выбор участка для размещения ТКО требует максимально ответственного подхода, так как с этим связана экологическая безопасность создаваемого объекта и стоимость его строительства. Применение карты инженерно-геологического районирования во многом способствует оптимальному решению острых вопросов.

Участки, расположенные на благоприятных 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 рисунке 1 *а*, *б*. Участок полностью сложен глинистой толщей, являющейся хорошим геологическим барьером, предотвращающим загрязнение атмосферы и подземных вод. Объёмы работ по инженерной защите тела свалки минимальны и заключаются в создании в теле свалки и её основании дренажной системы для сбора биогаза и загрязнённых вод, перекрытии свалки с поверхности после накопления непроницаемым для воды и газов экраном, а также организации мониторинга.

Таблица 4. Шкала баллов для деления территории по степени пригодности для размещения ТКО

Степень пригодности	Величина баллов	Цвет на карте
Пригодные	>80	Зелёный
Условно пригодные	40–80	Жёлтый
Условно непригодные	10–40	Оранжевый
Непригодные	<10	Красный

Дренажная система для сбора биогаза создаётся в теле свалки по мере её формирования – засыпаемый мусор периодически разравнивается и перекрывается слоем крупнозернистого песка или гравия мощностью до 0.5 м. По мере накопления мусора в теле свалки оборудуется сеть вертикальных дрен (они пересекают горизонтальные дренажные слои), через которые биогаз подаётся наверх и утилизируется.

Поверхностный защитный экран может представлять собой техногенный геологический барьер, формируемый из отсыпаемого и уплотнённого слоя влажной глины мощностью 1.5–3 м. Наряду с этим можно использовать комбинированный барьер, состоящий из искусственного водонепроницаемого покрытия в виде различных плёнок и матов и техногенного геологического барьера (отсыпанный слой влажной глины мощностью до 1.5 м).

Даже при соблюдении всех правил безопасности комплексы ТКО остаются объектами повышенного риска, требующими постоянного контроля 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 анализироваться в режиме онлайн.

Площадки, размещаемые на условно пригодных территориях, приурочены к массивам полу-

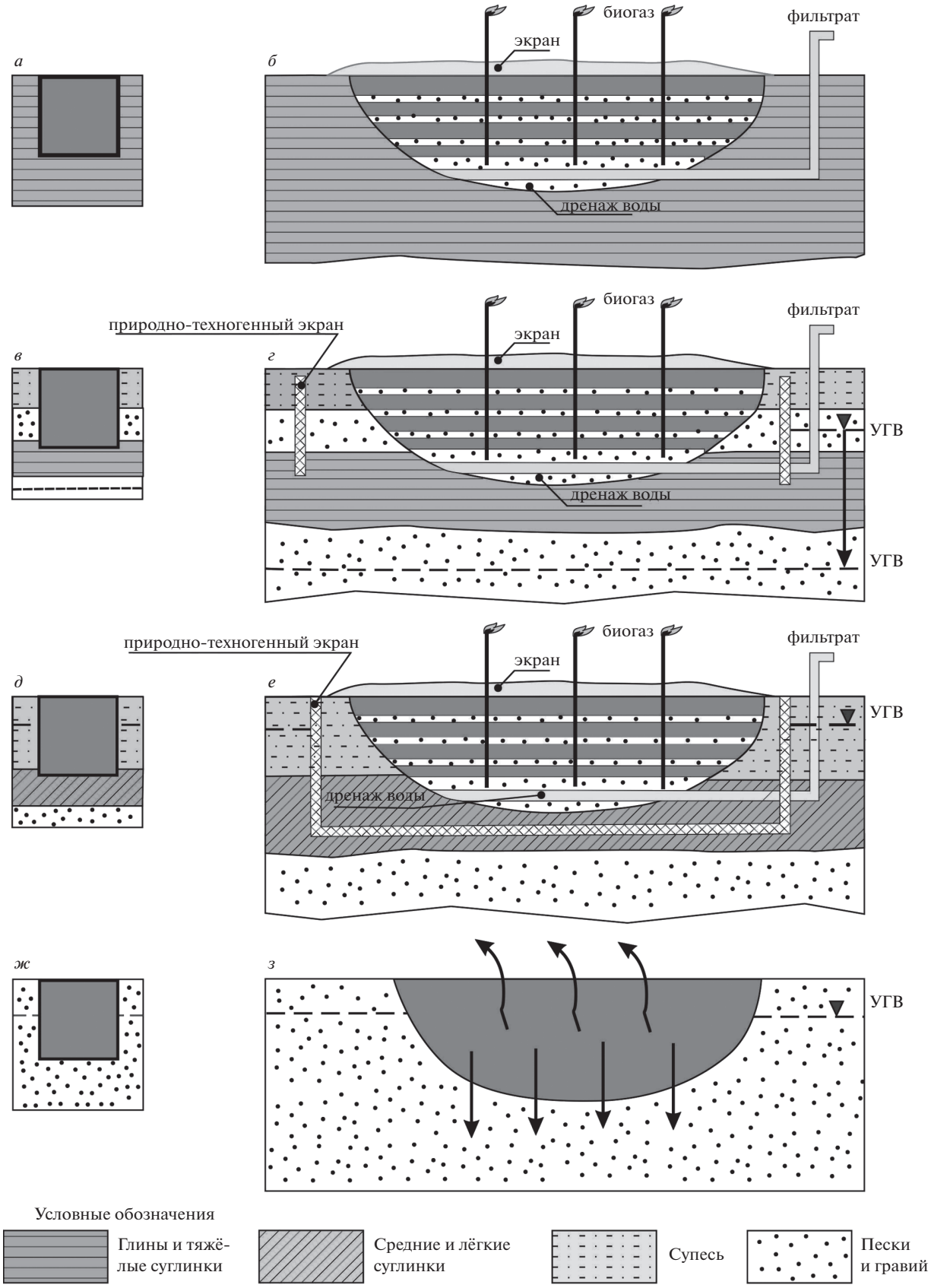

Рис 1. Размещение свалок ТКО на участках различной степени пригодности по геологическим условиям. Категории участков: *а, б* – благоприятные; *в, г* – условно благоприятные; *д, е* – условно неблагприятные; *ж, з* – неблагоприятные

проницаемых и проницаемых пород, но имеющим в основании толщу глин или тяжёлых суглинков, которая может служить надёжным 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 УГПВ может возникнуть контакт свалки с подземными водами (рис. 1 *в, г*). Чтобы его предотвратить, необходимо возводить по периметру природно-техногенный барьер с применением методов технической мелиорации грунтов и опирающийся на непроницаемый глинистый слой в основании свалки [7, 8]. Кроме того, необходимы системы дренирования биогаза и загрязнённого фильтрата воды.

Территории, оценённые баллами от 10 до 40, составляют условно непригодную категорию участков, приуроченных к местам распространения проницаемых обводнённых пород (супесей, песков). В основании таких участков залегают полупроницаемые толщи лёгких или средних суглинков (рис. 1 *д, е*). В подобных случаях создание слабопроницаемого техногенного барьера на поверхности и по периметру свалки требует значительных финансовых средств, поэтому условно непригодные территории используются для создания полигонов размещения ТКО только в исключительных случаях.

Территории четвёртого уровня включают участки, непригодные для размещения отходов. К ним относятся обводнённые и затапливаемые паводковыми водами территории, сложенные толщей легко водопроницаемых пород (крупнообломочных, трещиноватых, песчаных), в геологическом разрезе которых отсутствуют подстилающие и перекрывающие непроницаемые или полупроницаемые горизонты, 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 (рис. 1 *ж, з*). Инженерная подготовка таких участков сопряжена с огромными финансовыми затратами на создание искусственных и природно-техногенных барьеров в основании и в контуре сооружения, систем дренажа биогаза, загрязнённых подземных вод и мониторинга. По этим причинам размещение объектов ТКО на этих участках должно быть категорически запрещено.

Рассмотренные примеры описывают лишь малую часть ситуаций, возникающих при создании полигонов на участках с различным уровнем пригодности по геологическим условиям. Но необходимо подчеркнуть: как бы ни были различны эти ситуации, очень важно сохранение единого принципа оценки природных условий при подготовке карты инженерно-геологического районирования – она является важнейшим документом для разработки территориальной схемы обращения с отходами. При составлении такой схемы на карту, как на матрицу, наносится дополнительная информация, отражающая законодательные ограничения по размещению отходов и существующую ситуацию с их накоплением и размещением. С применением специальных знаков или штриховок указываются территории, запрещённые для размещения отходов: населённые пункты и санитарные зоны вокруг них, особо охраняемые исторические места, особо охраняемые водные и рекреационные территории, кладбища и скотомогильники.

Помимо карты инженерно-геологического районирования, территориальная схема обращения с отходами предполагает присутствие топографически привязанной дополнительной информации:

- мест накопления ТКО и их состав, включая размещение санкционированных и несанкционированных полигонов и свалок, а также захоронения неотсортированных отходов;
- мест размещения действующих объектов по промышленной сортировке, переработке и обезвреживанию отходов;
- мест организации раздельного сбора отходов;
- существующей дорожной сети с указанием категории дорог.

Вся указанная информация систематизируется на базе геоинформационной системы изучаемой территории и оцифровывается. В дальнейшем разрабатываются специальные программные средства, позволяющие решать в реальном режиме времени все необходимые задачи по управлению отходами, включая поиск оптимальных площадок по их размещению, доставку на перерабатывающие комплексы, разработку коммерческих схем взаимосвязи между предприятиями сортировки, переработки, обезвреживания и захоронения неутилизируемой части ТКО. Полученный таким образом комплекс информации станет базой реальной цифровой системы по территориальному управлению отходами.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания и плана НИР ИГЭ РАН на 2019–2021 гг.

ЛИТЕРАТУРА

1. Государственный доклад “О состоянии и охране окружающей среды Российской Федерации в 2017

году". М.: Министерство природных ресурсов и экологии, 2018.

2. *Осипов В.И.* Управление твёрдыми коммунальными отходами как федеральный экологический проект // Геоэкология. 2019. № 3. С. 3–11.
3. *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 твёрдых бытовых 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.
4. *Osipov V.I., Burova V.N., Zaikanov V.G. et al.* A Map of Large-Scale (Detail) Engineering Geological Zoning of Moscow Territory // Water Resources. 2012. V. 39(7). P. 709–721.
5. *Осипов В.И., Соколов В.Н.* Глины и их свойства. М.: ГЕОС, 2013.
6. *Королёв В.А.* Очистка и восстановление геологической среды. Учебное пособие для вузов. М.: ООО "Сампринт", 2019.
7. *Воронкевич С.Д.* Техническая мелиорация грунтов. М.: Академическая наука, 2015.
8. *Гончарова Л.В.* Основы искусственного улучшения грунтов. М.: МГУ, 1973.