



ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ НАМЫВНЫХ ТЕХНОГЕННЫХ ГРУНТОВ

ENGINEERING-GEOLOGICAL FEATURES OF MAN-MADE ALLUVIAL GROUNDS

ОГОРОДНИКОВА Е.Н.

Доцент экологического факультета Российского университета дружбы народов, к.г.-м.н., г. Москва, ogorodnikova50@mail.ru

НИКОЛАЕВА С.К.

Доцент кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, к.г.-м.н., г. Москва, sk.niko@geol.msu.ru

НАГОРНАЯ М.А.

Ведущий специалист ЗАО «Раменский региональный экологический центр», к.г.-м.н., г. Раменское Московской обл., vik-mari@yandex.ru

OGORODNIKOVA E.N.

An associate professor of the ecology faculty of Peoples' Friendship University of Russia, candidate of science (Geology and Mineralogy), Moscow, ogorodnikova50@mail.ru

NIKOLAEVA S.K.

An associate professor of the engineering and ecological geology department of the geology faculty of Lomonosov Moscow State University, candidate of science (Geology and Mineralogy), Moscow, sk.niko@geol.msu.ru

NAGORNAYA M.A.

A lead specialist of the «Ramenskiy Regional Environmental Center» CJSC, candidate of science (Geology and Mineralogy), Ramenskoye, Moscow Region, vik-mari@yandex.ru

Ключевые слова:

техногенные намывные грунты; хвостохранилище; минеральный состав; дисперсность; свойства.

Key words:

man-made alluvial grounds; tailing dump; mineral composition; dispersion, properties.

Аннотация

В статье рассмотрены инженерно-геологические особенности массивов намывных техногенных грунтов. Показано, что состав и строение намывных грунтов Лебединского горно-обогатительного комбината, определяют их водно-физические и физико-механические свойства.

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с тематикой международного проекта РФФИ «Теоретические и методологические основы изучения техногенных грунтов и управление их свойствами» авторами проводились исследования по намывным техногенным грунтам (НГ) и их массивам, при которых рассматривались вопросы их систематизации и инженерно-геологических особенностей. Основанием для написания данной статьи послужили классификация НГ, которая расширяет и уточняет существующие представления об общей классификации техногенных отложений, и оригинальные исследования намывных грунтов Лебединского горно-обогатительного комбината (ГОК). Межгосударственный стандарт ГОСТ 25100-2011 «Грунты. Классификация» [4] не содержит в своей номенклатуре конкретные виды и подвиды техногенных грунтов, которые в общей классификации техногенных грунтов А.П. Афолина и др. [1] относятся к намывным и входят в классы техногенно переотложенных и образованных разностей. Эти отложения мало изучены, являются термодинамически неустойчивыми и требуют присталь-

Abstract

The article considers engineering-geological features of man-made alluvial ground massives. The composition and structure features of the man-made grounds of the Lebedinskiy ore-dressing and processing enterprise that determine their water-physical and physical-mechanical properties are shown.



Таблица 1

Систематизация массивов намывных техногенных грунтов	
Отрасль промышленности, источник формирования техногенных грунтов	Типы массивов техногенных грунтов
Добыча и обогащение полезных ископаемых	Массивы гидроотвалов
	Массивы хвостов обогатительных фабрик
Переработка полезных ископаемых	Массивы шламов
Энергетика	Массивы золошлакоотвалов
Строительство (планомерный намыв грунтов)	Массивы грунтов земляных сооружений
	Массивы грунтов намывных территорий

ного инженерно-геологического и инженерно-экологического внимания.

Цель настоящей публикации — систематизировать массивы намывных грунтов и на одном из примеров, а именно на хвостах Лебединского горно-обогатительного комбината, показать специфику свойств НГ, мало изученных в инженерной геологии. При этом были поставлены следующие задачи: (1) дать общую характеристику намывных грунтов и массивов, провести систематизацию последних по отраслям промышленности, являющимся источниками формирования техногенных отложений; (2) описать основные инженерно-геологические особенности разных типов НГ; (3) показать взаимосвязи состава, строения и свойств одного из типов намывных грунтов — хвостов обогащения железных руд.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА НАМЫВНЫХ ГРУНТОВ И МАССИВОВ

Под намывными грунтами понимают любые дисперсные горные породы или твердые отходы производственной и хозяйственной деятельности человека, уложенные способами гидромеханизации [6]. Укладка приводит к образованию массива НГ, который является частью созданной природно-технической системы.

Для массивов намывных грунтов характерно фракционирование по длине пляжа намыва, слоистое строение, анизотропия фильтрационных и физико-механических свойств, уплотнение и упрочнение, изменение степени фильтрационной анизотропии во времени. Они характеризуются рядом специфических инженерно-геологических особенностей, которые отличают их от природных разностей, и образуют техногенный рельеф.

По составу и строению намывные грунты, формирующие техногенный массив, отличаются от природных разностей. В НГ присутствуют отдельные минералы или их сочетания, которые отсутствуют в природных минералогических ассоциациях. Намытые массивы содержат техногенные водоносные горизонты, представленные грунтовыми водами. В их составе часто встречаются загрязняющие компоненты. Для массивов намывных грунтов характерны процессы, обусловленные как литогенетическими преобразо-

ваниями их состава и свойств, что соответствует природным процессам прогрессивного и регрессивного литогенеза, так и экзогенными процессами — суффозией, оползнеобразованием, дефляцией и др.

В таблице 1 приведена систематизация массивов намывных техногенных грунтов по отраслям промышленности.

МАССИВЫ ГИДРООТВАЛОВ

Добыча полезных ископаемых методами гидромеханизации и их последующее обогащение приводят к формированию массивов намывных техногенных грунтов, состав и свойства которых отличаются от природных разностей. В качестве примера формирования таких отложений приведем гидроотвалы горного производства Кузбасса [3].

На угольных месторождениях Кузбасса гидравлической разработке подвергаются четвертичные отложения главным образом пылевато-глинистого состава — пылеватые суглинки, лессовидные суглинки, реже пылеватые глины, иловатые суглинки, легкие супеси [3]. В таблице 2 приводятся значения показателей состава и физико-механических свойств природных и намывных грунтов такого рода.

В процессе гидроотвалообразования по мере удаления от фронта намыва происходит дифференциация пульпы по фракциям. При этом крупные песчаные частицы концентрируются в районе выпуска пульпы, формируя наружную приоткосную зону. Более мелкие частицы, преимущественно тонкопесчаные и пылеватые, относятся потоком несколько дальше и образуют промежуточную зону. И, наконец, тонкие глинистые частицы осаждаются в прудке-отстойнике. Изменения дисперсности в разных зонах намыва определяют различия в строении и физико-механических свойствах таких техногенных грунтов в пределах сформированного массива.

МАССИВЫ ХВОСТОВ ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ ФАБРИК

Хвосты образуются в результате обогащения полезных ископаемых при отделении пустой породы методами гравитации, магнитной сепарации

Таблица 2

Состав и свойства природных и намывных грунтов гидроотвала «Свободный» (Кузбассе) [2]											
Тип грунта		Содержание фракций, %, с размером частиц, мм			Плотность твердых частиц, г/см ³	Влажность, %	Плотность грунта, г/см ³	Плотность скелета грунта, г/см ³	Пористость, %	Удельное сцепление C , МПа	Угол внутреннего трения φ , °
		> 0,05	0,05–0,001	< 0,001							
Природные разности*	1	17	65	18	2,68	23,3	1,94	1,57	41,4	0,460	21,3
	2	10	74	16	2,70	26	1,94	1,57	41,4	0,044	20,0
	3	9	75	16	2,62	35,5	1,80	1,33	49,2	0,450	18,2
	4	15	60	25	2,68	22,0	1,96	1,61	39,9	0,380	21,0
Приоткосная зона		32	60	8	2,67	21,0	1,85	1,53	42,7	0	19,0
Промежуточная зона		5	79	16	2,70	29,0	1,88	1,45	44,3	0,020	15,0
Прудковая зона		2	72	26	2,72	33,0	1,90	1,43	48,2	0,035	11,0

* 1 — суглинок пылеватый макропористый, ожелезненный, с гравием и галькой мощностью до 25 м; 2 — суглинок лессовидный макропористый, с дресвой и щебнем мощностью до 20–23 м; 3 — суглинок иловатый туго-текучепластичный, с редкими включениями дресвы, гравия, гальки мощностью 2–4 м; 4 — глина пылеватая туго- и мягкопластичная мощностью 2–5 м.

или флотации и складываются на хвостохранилищах гидротранспортом. Следует заметить, что процесс флотации связан с введением поверхностно-активных веществ (ПАВ).

Примером может служить обогащение железных руд — железистых кварцитов, которые дробят, измельчают, превращают в дисперсный материал, а затем методом магнитной сепарации извлекают из них полезный продукт. Пустая порода, представленная остроугольными обломками кварцита и отдельных кристаллов, в виде пульпы транспортируется в хвостохранилище.

МАССИВЫ ШЛАМОВ

Шламы — продукты обогащения и переработки полезных ископаемых на стадии получения готовой продукции [3, 6]. К шламам гидроудаления можно отнести:

- угольные (побочные продукты обогащения угля);
- нефелиновые (отходы производства алюминия);
- красные (побочные продукты переработки и обжига бокситов);



Рис. 1. Последствия разлива красного шлама (город Айка, Венгрия)



Рис. 2. Пульпопровод Назаровской ГРЭС. Золоотвал пойменного типа, расположенный в пойме реки Чулым

- карбонатные (отходы переработки серных руд);
- нефтяные (побочные продукты добычи и переработки нефти).

В качестве примера рассмотрим *красный шлам* — побочный продукт переработки и обжига бокситов при производстве алюминия, который удаляется гидротранспортом и содержит около 70% частиц размером 1–5 мм при плотности отложений в шламонакопителе 1,2 г/см³. По химическому составу он включает: оксид кальция (37%), оксид железа (21%), оксид кремния (18%), оксид алюминия (8%). На каждую тонну полученного оксида алюминия приходится от 360 до 800 кг шлама. Вследствие значительного содержания оксида кальция красный шлам характеризуется вяжущими свойствами, поэтому

при длительном хранении в шламонакопителе наблюдается некоторая его цементация на участках, где откладываются мелкие фракции.

На рисунке 1 показаны последствия разлива примерно 1 млн м³ красного шлама в венгерском городе Айка 4 октября 2010 г. — в результате прорыва плотины шламохранилища на крупном заводе.

МАССИВЫ ЗОЛОШЛАКООТВАЛОВ

Золошлаки и золы — продукты сжигания твердого топлива: каменного и бурого угля, торфа или горючих сланцев на теплоэлектростанциях. Они транспортируются по пульпопроводам (в условиях гидроудаления) на золоотвал при concentra-



Рис. 3. Сброс пульпы в золошлакоотвал



Рис. 4. Слоистость в золоотвале



Рис. 5. Создание намывных площадей в г. Санкт-Петербурге. Аэрофотоснимок



Рис. 6. Сброс пульпы в хвостохранилище Лебединского горно-обогатительного комбината

ции пульпы 50–60% (рис. 2, 3). В результате формируется массив техногенного грунта — золошлакоотвал, состав и свойства грунтов в котором неоднородны по глубине и простиранию.

На рисунке 4 в техногенных грунтах золоотвала по изменениям их цвета и дисперсности видна слоистость, которая приводит к анизотропии свойств этих грунтов.

Все рассмотренные выше массивы сложены намывными грунтами, которые относятся к техногенно образованным разностям. Они характеризуются следующими особенностями:

- состав таких отложений отличается от состава природных разностей, что зависит не только от условий их образования, но и от тех гипергенных изменений, которые в них происходят;
- в массивах этих грунтов наблюдается неоднородность как по простиранию, так и по глубине;
- неоднородность состава определяет изменчивость свойств данных отложений.

Основные задачи исследований таких грунтов касаются путей их обезвреживания, консолидации и влияния на природные условия окружающих территорий.

МАССИВЫ ГРУНТОВ НАМЫВНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Массивы планомерно намытых техногенных грунтов образуются при возведении намывных сооружений или территорий из природных грунтовых материалов.

Особого внимания заслуживают намывные территории. Цели их создания состоят в увеличении площадей селитебных территорий или расширении городской застройки за счет подъема абсолютных отметок. В результате формируется техногенный рельеф.

Например, в строящемся порту в г. Санкт-Петербурге завершились работы по формированию (обвалованию) периметра для намыва второй очереди морского терминала. В июле 2011 г. была сформирована дамба протяженностью около 1 км и устроено временное берегоукрепление на ее внешней стороне. Внутри обвалованной территории будет осуществляться намыв искусственного массива на природное грунтовое основание песчаным грунтом, добытым в ходе

днуоуглубительных работ на акватории нового порта и в подходных каналах к нему. Общий объем намыва составит 2 млн м³, площадь образованной территории будет составлять около 85 га (рис. 5).

Основные требования, предъявляемые к массивам грунтов намытых территорий:

- наличие необходимой несущей способности;
- отсутствие неравномерных осадок;
- отсутствие подтопления;
- отсутствие опасных инженерно-геологических процессов (суффозионных, провальных и др.).

НАМЫВНЫЕ ГРУНТЫ (ХВОСТЫ) ЛЕБЕДИНСКОГО ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНОГО КОМБИНАТА

Кратко охарактеризовав инженерно-геологические особенности различных типов намывных техногенных грунтов и их массивов, остановимся на особенностях состава и свойств таких разностей, как хвосты Лебединского горно-обогатительного комбината (ГОК) (рис. 6).

На территории хвостохранилища Лебединского ГОК были отобраны пробы техногенного грунта по двум профилям. Главный профиль длиной 90 м был расположен вдоль основного движения пульпы при намыве (от зоны сброса в сторону пруда-отстойника). Его длина определялась возможностью отбора проб с поверхности намытых отложений без привлечения специальной техники. Дополнительный профиль, имевший длину 50 м (равную среднему расстоянию между выпусками пульпопроводов), перпендикулярно пересекал главный в месте выпуска пульпы. Отбор образцов в естественном сложении проводился с глубины 3–4 см, а в нарушенном сложении — с глубины 15–20 см.

Приведенные в статье показатели соответствуют свойствам образцов, отобранных:

- в зоне сброса пульпы (M17, M19, M110);
- по главному профилю вдоль фронта намыва (M15-M11);
- в центральной части хвостохранилища (M10);
- по поперечному профилю (M21-M32).

Исследование состава и свойств намывных грунтов проводилось по стандартным методикам [5].

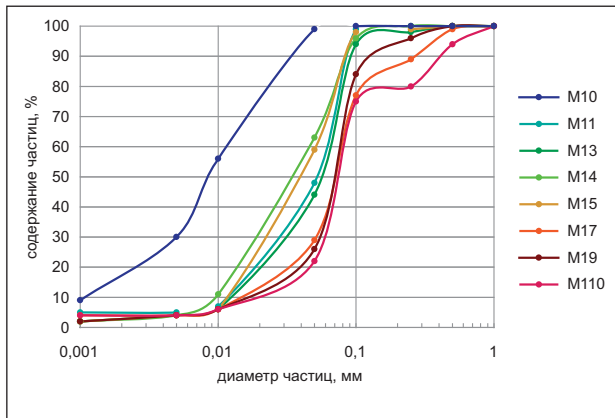


Рис. 7. Интегральные кривые гранулометрического состава проб хвостов пылеватых, отобранных по главному профилю. Пробы взяты из зоны сброса пульпы (M17, M19, M110), промежуточной зоны (M15–M11) и зоны пруда-отстойника (M10)

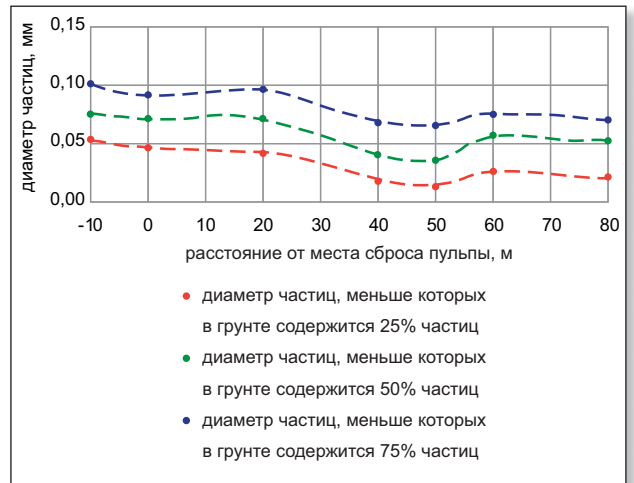


Рис. 8. Распределение частиц по направлению намыва

Состав и строение грунтов

Результаты гранулометрического анализа подтверждают, что на фоне общей закономерности фракционирования намывного материала (уменьшения его крупности по мере удаления от места выпуска пульпы) существуют более мелкие колебания дисперсности, связанные с локальными факторами. Интересно, что по направлению намыва в пределах главного профиля содержание фракций глины и мелкой пыли (с размером частиц менее 0,01 мм), неустойчивых к ветровой дефляции, практически не меняется и составляет 6–14%. Во всех исследованных образцах, являющихся хвостами пылеватыми (по существующей классификации хвостов обогащения [1]), преобладают фракции тонкого песка (22–58%) и крупной пыли (16–66%). Тем не менее на графиках гранулометрического состава грунтов главного профиля (рис. 7) по дисперсности четко выделяются зона сброса (M17, M19, M110) и промежуточная зона (M11, M13, M14, M15). Отдельно расположена кривая, соответствующая образцу-аналогу из зоны пруда-отстойника (M10).

На графике распределения диаметров частиц, соответствующих 25, 50 и 75% их содержания, на фоне мелких колебаний хорошо видна общая тенденция к увеличению дисперсности при удалении от места выпуска пульпы (рис. 8). В зоне ее сброса

эта закономерность также наглядно прослеживается по обе стороны от места выпуска.

Как видно из приведенных на рис. 7 данных, характерные для природных грунтов соотношения содержаний отдельных фракций в хвостах обогащения железных руд нарушены. При определении названий этих техногенных грунтов главная сложность заключается в низком содержании песчаных фракций в зонах сброса и промежуточной (22–78%, в среднем 50%). Поэтому общепринятые классификации отложений по гранулометрическому составу (включая ГОСТ 25100-2011) для них не подходят: исследуемые хвосты не являются песками и не могут классифицироваться как глинистые грунты, поскольку не проявляют свойств пластичности. По классификации хвостов обогащения, разработанной институтом «ВИОГЕМ», все исследуемые грунты являются хвостами пылеватыми [2].

Для образцов тонко- и грубодисперсных разновидностей намывных грунтов (M10 и M19 соответственно) был выполнен валовый химический анализ, результаты которого представлены в табл. 3. Полученные показатели соответствуют средним данным, характерным для хвостов черной металлургии [6]. В составе этих разновидностей преобладает SiO₂, в заметном количестве содержится Fe₂O₃, FeO, CaO, MgO, Al₂O₃. Интересно, что в тонкодисперсном образце (M10) содержание Al₂O₃ и FeO наряду с P₂O₅, CaO, MgO и другими элементами выше, чем в грубодисперсной

Таблица 3

Химический состав намывных грунтов хвостохранилища Лебединского ГОК										
Зона фракционирования	Название грунта	Содержание компонентов, %								
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	TiO ₂	CaO	MgO	п.п.п.*
Зона сброса пульпы	Хвосты пылеватые (M10)	69,53	2,11	6,39	9,37	0,18	0,20	2,71	4,63	3,28
Зона пруда-отстойника	Хвосты пылеватые (M19)	62,41	2,75	8,55	5,98	0,43	0,22	3,92	7,65	4,94

* п.п.п. — потери при прокаливании.

Таблица 4

Минеральный состав намывных грунтов хвостохранилища Лебединского ГОК (содержание, %)								
Зона фракционирования	Название грунта	Кварц	Альбит	Доломит	Железосодержащие минералы			
					Mg,Fe-амфиболы	биотит	магнетит	сидерит
Зона сброса пульпы	Хвосты пылеватые (M10)	54	3	5	31	3	2	1
Зона пруда-отстойника	Хвосты пылеватые (M19)	35	4	5	23	9	<1	<1

Таблица 5

Результаты количественного анализа микроструктуры намывного грунта из зоны сброса пульпы				
Ориентировка образца по отношению к направлению намыва	Средний диаметр пор, мкм	Средняя площадь пор, мкм ²	Средний периметр пор, мкм	Удельная поверхность грунта, мкм ⁻¹
Перпендикулярно	0,49	2,78	4,64	0,34
Параллельно	0,57	2,96	4,26	0,48

пробе (M19). При этом с увеличением дисперсности содержание SiO_2 уменьшается незначительно.

Результаты рентгеноструктурного анализа показывают, что содержание основных породообразующих минералов в составе намывного грунта различается для тонкодисперсной и грубодисперсной разностей (табл. 4): в тонкодисперсных образцах (M10) содержание кварца и Mg-Fe-амфиболов ниже (составляет 35 и 23% в M10 и M19 соответственно). Суммарное содержание «легковесных» и железосодержащих минералов больше в грубодисперсной пробе. Однако в образце M10 появляются тальк, нонктронит, хлорит, каолинит, вермикулит, суммарное содержание которых равно 22%. Пирит в количестве 1% обнаружен только в пробе M19, а гематит (2%) — в M10.

Таким образом, полученные данные свидетельствуют об изменении минерального состава в соответствии с дисперсностью намывных грунтов.

В составе водной вытяжки концентрации гидрокарбонат- и сульфат-ионов невысоки и сопоставимы между собой для разных образцов. Содержание ионов хлора более значительно и, по-видимому, возрастает по мере удаления от зоны сброса. Для образца промежуточной зоны концентрации натрия и калия преобладают над таковыми кальция и магния, а для пробы, характеризующей участок пруда-отстойника, — наоборот. Суммарное содержание солей в пылевато-глинистых разностях составляет 0,26%, что позволяет отнести их к незасоленным.

Для техногенных отложений в массиве характерна резкая смена песчаных разностей более тонкодисперсными, без постепенных переходов. Крупнозернистые фракции хвостов обогащения содержат отдельные частицы пустой породы и агрегаты, состоящие из мелких зерен железосо-



Рис. 9. Изменения по глубине слоистости намывных грунтов — хвостов обогащения Лебединского ГОК (фото Е.А. Лычагина)

Таблица 6

Параметры физических свойств намывных грунтов — пылеватых хвостов*											
Зона фракционирования	№ образца	W, %	ρ , г/см ³	ρ_d , г/см ³	ρ_s , г/см ³	n, %	e_{\min}	e_{\max}	$e_{\text{ест}}$	I_d	F
Зона сброса пульпы	M17	27	1,95	1,54	2,93	48	0,97	0,60	0,91	0,16	0,38
	M19	27	2,04	1,61	3,02	47	1,14	0,75	0,88	0,67	0,34
Промежуточная зона	M13	28	1,97	1,54	2,94	48	1,23	0,77	0,91	0,70	0,37
	M15	28	2,01	1,57	2,91	46	1,26	0,85	0,85	1,00	0,32
Зона влияния соседних выпусков	M21	18	1,84	1,56	2,88	46	1,29	0,85	0,85	1,00	0,34
	M22	19	1,81	1,52	2,86	47	1,07	0,68	0,88	0,49	0,36

* W — естественная влажность; ρ , ρ_d , ρ_s — плотность грунта в естественном сложении, плотность скелета и плотность твердого компонента соответственно; n — пористость; e_{\min} , e_{\max} , $e_{\text{ест}}$ — коэффициент пористости для плотного, рыхлого и естественного сложения соответственно; I_d — степень плотности; F — уплотняемость. Характеристика мест отбора образцов с указанием их номеров приводится в тексте.

держащих минералов, находящихся в основной массе частиц кварца. Морфология зерен намывных грунтов отличается от таковой для природных разностей. Отдельные частицы достаточно изометричны, имеют остроугольную неокатанную форму. Зерна кварца являются прозрачными, в сростках с железосодержащими минералами — серыми, разных оттенков.

Более тонкие фракции содержат уже только единичные частицы железосодержащих минералов, которые хорошо видны под микроскопом при 100-кратном увеличении благодаря даваемому ими характерному отблеску. Они имеют изометричную неокатанную форму и уменьшаются по размеру вдоль профиля намыва от 1,2 до 0,2 мм.

Кроме вышеописанных отдельно можно выделить палочковидные частицы различных размеров и плоские агрегаты, расщепляющиеся по спайности. Последние, судя по их достаточно высокому содержанию в общей массе, по-видимому, являются Mg-Fe-амфиболами (ленточными силикатами).

Более тонкие фракции, содержание которых увеличивается при удалении от места выпуска пульпы, представлены различными по форме частицами. Они беспорядочно располагаются среди относительно крупных зерен. Угловатость частиц может объясняться как механическим дроблением исходной породы и недолгим временем намыва хвостов, так и неспособностью частиц тонкопесчаного и пылеватого размеров окатываться в водной среде.

Микроструктура рассматриваемого грунта является скелетной, по типу пор — межзернистой. В таблице 5 приводится характеристика порового пространства, полученная В.Н. Соколовым при обработке растровых электронно-микроскопических изображений образца M19 (из зоны сброса пульпы) при его ориентировке в перпендикулярном и параллельном намыву направлениях. Приведенные данные подтверждают анизотропное строение исследуемого массива на микроуровне, что выражается в проявлении слоистости, и на макроуровне (рис. 9).

Физические и водно-физические свойства грунтов

Для намывных грунтов — хвостов обогащения Лебединского ГОК — были определены некоторые показатели физических и водно-физических свойств. Полученные результаты представлены в табл. 6.

Благодаря наличию железосодержащих минералов в составе хвостов обогащения грунты в целом имеют высокие значения различных показателей плотности. При этом естественная плотность (1,74–2,04 г/см³), величина которой зависит в т.ч. и от естественной влажности, будет меняться не только по направлению намыва, но и с течением времени после прекращения намыва благодаря испарению и инфильтрации воды. Значения плотности твердого компонента высокие (2,86–3,02 г/см³), они определяются особенностями минерального состава. Показатели плотности хвостов в рыхлом и плотном сложении достаточно постоянны. В зоне сброса эти параметры по дополнительному профилю имеют более низкие значения (1,53–1,70 г/см³), чем в месте выпуска пульпы (M19). Это особенно важно, т.к. грунты этой зоны в основном используются для возведения новых дамб.

Значения естественной влажности, при незначительных колебаниях, иллюстрируют постепенное увлажнение грунтов по направлению к пруду-отстойнику. Низкие значения гигроскопической влажности (доли процента) говорят о малом количестве активных зон на поверхности минералов, способных удерживать воду. При этом в тонкодисперсных фракциях (M10) такая способность возрастает благодаря появлению слоистых силикатов, в т.ч. глинистых минералов.

Полученные расчетные показатели физических свойств (табл. 6) говорят о том, что изучаемые грунты являются неоднородными: коэффициент (степень) их плотности I_d варьирует в широких пределах — от 0,16 до 1,00. При этом плотное сложение характерно для более тонкодис-



Таблица 7

Результаты компрессионных испытаний пылеватых хвостов*					
Зона фракционирования	№ образца	Интервал давления, МПа	Коэффициент уплотнения a , 1/МПа	Компрессионный модуль деформации, $E_{ок}$, МПа	Модуль деформации E , МПа
Зона сброса пульпы	M17	0–0,05	2,40	0,6	0,5
		0,05–0,40	0,33	4,4	3,8
	M19	0–0,1	0,06	25,0	21,0
		0,1–0,4	0,01	220,0	190,0
Промежуточная зона	M13	0–0,1	0,04	37,0	32,0
		0,1–0,2	0,09	16,0	14,0
		0,2–0,4	0,04	37,0	32,0
	M14	0–0,2	0,02	73,0	63,0
		0,2–0,4	0,05	29,0	25,0
	M15	0–0,1	0,23	6,3	5,5
		0,1–0,2	0,12	12,0	10,0
0,2–0,4		0,02	73,0	63,0	
Зона влияния соседних выпусков пульпы	M21	0–0,1	0,02	73,0	63,0
		0,1–0,4	0,05	29,0	25,0
	M22	0–0,05	3,40	0,4	0,4
		0,05–0,40	0,83	1,8	1,5
	M32	0–0,05	0,60	2,5	2,1
		0,05–0,40	0,05	28,0	24,0

* Характеристика мест отбора образцов с указанием их номеров приводится в тексте.

персных грунтов ($I_d = 0,70 \div 1,00$). В месте выпуска пульпы коэффициент плотности составляет 0,67. В зоне сброса, в радиусе 20 м от места выпуска пульпы, сложение грунтов может резко меняться: в пределах дополнительного профиля коэффициент плотности возрастает до 0,96–1,00, а по главному направлению намыва он уменьшается до 0,16. Уплотняемость грунтов является средней (0,32–0,38).

Для трех образцов — M10, M15, M19 — определялась высота капиллярного поднятия, которая составила 76, 72 и 77 см соответственно. Закономерности изменения его скорости для изученных грунтов соответствуют природным разностям. С увеличением крупности частиц скорость капил-

лярного поднятия возрастает. Большие численные значения его высоты являются благоприятным фактором (при неглубоком залегании грунтовых вод), влияющим на способность хвостов к пылению. Если грунты хвостохранилища будут находиться в зоне капиллярной каймы, то они будут достаточно увлажнены, чтобы их пыление не происходило.

Значения коэффициента фильтрации изученных грунтов изменяются в соответствии с их гранулометрическим составом. Для образца M19 (в зоне сброса пульпы) коэффициент фильтрации составляет 0,04 см/с, а у пробы M10 (взятой близ пруда-отстойника) он уменьшается до 0,0024 см/с.

Таблица 8

Изменение показателей прочности пылеватых хвостов по профилям намыва								
Показатель	Зона фракционирования							
	пруда-отстойника		промежуточная		сброса пульпы		влияния соседних выпусков	
	№ образца							
	M10	M11	M13	M15	M17	M19	M21	M32
Угол естественного откоса, °	-	34	36	32	34	34	37	38
Угол внутреннего трения, °	35	37	34	28	33	32	37	39
Удельное сцепление, МПа	0,007	0,008	0,005	0,015	0,007	0,100	0,002	0



Физико-механические свойства грунтов

Благодаря особому минеральному составу и способу образования хвостов обогащения эти грунты имеют высокие деформационные и прочностные характеристики. Их коэффициенты уплотнения и модули деформации были рассчитаны графическим способом в результате анализа компрессионных кривых (табл. 7). На рассматриваемых кривых можно выделить два три участка, отражающих разный характер деформаций. У ряда образцов есть небольшая структурная прочность, которая существует за счет капиллярной связности при начальных нагрузках (0–0,025 МПа). Деформация грунтов, проявляющаяся после преодоления структурной прочности, максимальна на первом этапе, т.е. для большинства образцов при сравнительно небольших нагрузках происходит более значимое уплотнение грунтов (при относительно низких значениях модулей деформации). При увеличении нагрузки компрессионные кривые выстраиваются.

Сходство значений угла внутреннего трения и угла естественного откоса, определенных стандартными методами [5], показывает, что у анализируемых грунтов они действительно иногда превышают величины, характерные для природных песчаных разностей (табл. 8). Благодаря особой угловатой форме частиц для хвостов обогащения характерно сцепление за счет механизма зацепления между отдельными зернами. Под водой угол естественного откоса составляет 32° для пылеватых хвостов из зон сброса пульпы и промежуточной (образцов М19 и М15).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Намывные отложения относятся к специфическим грунтам, образующим техногенные массивы, инженерно-геологические особенности которых во многом обусловлены источником их формирования — отраслью производственной деятельности человека. Поэтому именно это и является основой для систематизации намывных грунтов и массивов.

Слабая изученность таких отложений при инженерно-геологических и инженерно-экологических изысканиях вынуждает проводить дополнительные исследования с целью детального описания, определения их состава и свойств и прогноза взаимоотношений с окружающей природной средой. Специальные исследования намывных грунтов также необходимы при возведении дамб наращивания. В этом случае они являются не только основанием, но и материалом грунтового сооружения. Следует подчеркнуть, что нормативная база, регламентирующая производство изысканий на таких отложениях, практически не разработана.

Анализ инженерно-геологических особенностей хвостов Лебединского горно-обогатительно-

го комбината показал их специфический состав, обусловленный исходным составом руды, технологией ее добычи и переработки. Эти отложения имеют более высокую дисперсность, чем природные пески и супеси, но являются несвязными. Среднее содержание песчаных фракций у грунтов зон сброса и промежуточной составляет 50%. Минеральный состав хвостов Лебединского ГОК изменяется мало, однако заметно его различие между зонами сброса пульпы и прудковой. Эти отложения характеризуются скелетной структурой и слоистой текстурой, определяющей анизотропию свойств. Содержание железосодержащих минералов определяет высокие значения показателей их плотности при средней естественной пористости 45%. Эти намывные грунты обладают высокими прочностными и деформационными характеристиками.

Для анализа свойств хвостов обогащения используются методики и классификации, разработанные для природных грунтов. Для хвостов мокрой магнитной сепарации железных руд такие способы определения в основном обоснованы, но полученные результаты не всегда могут быть интерпретированы с использованием общих классификаций, закрепленных нормативными документами, действующими в Российской Федерации. Частные классификации имеют ряд ограничений, не позволяющих использовать их для рассматриваемых грунтов.

Непрерывное увеличение объемов накапливаемых техногенных грунтов приводит к тому, что они все чаще вовлекаются в сферу хозяйственной деятельности человека. Необходимость использования таких отложений в качестве оснований, среды или материала для строительства сооружений определяет актуальность их дальнейших исследований, обобщения имеющихся фактических материалов и разработки специальных нормативных документов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ ГФЕН №11-05-91165.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афонин А.П., Дудлер И.В., Зиангиров Р.С. и др. Классификация техногенных грунтов // Инженерная геология. 1990. № 1. С. 115–121.
2. Бересневич П.В., Кузьменко П.К., Неженцева Н.Г. Охрана окружающей среды при эксплуатации хвостохранилищ. М.: Недра, 1993. 128 с.
3. Гальперин А.М., Кутепов Ю.И., Кириченко Ю.В. и др. Освоение техногенных массивов на горных предприятиях. М.: Горная книга, 2012. 336 с.
4. ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация. М.: МНТКС, 2012. 78 с.
5. Лабораторные работы по грунтоведению / под ред. В.Т. Трофимова, В.А. Королева. М.: Высшая школа, 2008. 520 с.
6. Огородникова Е.Н., Николаева С.К. Техногенные грунты. М.: Изд-во МГУ, 2004. 250 с.