

ГРУНТОВЕДЕНИЕ И МЕХАНИКА ГРУНТОВ

УДК 624.131.1(571.5)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ ГРУНТОВ ДАМБ ШЛАМОНАКОПИТЕЛЕЙ В РАЙОНЕ БАЙКАЛЬСКОГО ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОГО КОМБИНАТА

© 2022 г. Т. Г. Рященко^{1,*}, Н. Н. Гринь², С. И. Штельмах¹, Н. Н. Ухова^{1,**}

¹ Институт земной коры СО РАН, ул. Лермонтова, д. 128, Иркутск, 664033 Россия

² Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИРНИТУ),
ул. Лермонтова, д. 83, Иркутск, 664074 Россия

*e-mail: ryashenk@crust.irk.ru

**e-mail: nat_ukhova@crust.irk.ru

Поступила в редакцию 13.07.2021 г.

После доработки 08.10.2021 г.

Принята к публикации 12.10.2021 г.

Выполнены экспериментальные исследования дисперсных техногенных грунтов дамб, окружающих девять карт-накопителей лигнина в районе Байкальского БЦБК, по материалам бурения скважин (6–10 м) с отбором образцов нарушенной структуры и природной влажности. В лаборатории ИРНИТУ ситовым методом изучался гранулометрический состав – 69 образцов, для 34 (после отделения крупных фракций) определялись влажность, пластичность и гранулометрический состав методом пипетки; каждый образец (из 34), согласно ГОСТ 25100-2011, получил наименование “супесь песчанистая”. В ИЗК СО РАН проводились комплексные исследования 25 образцов “супесей песчанистых”, которые предлагается по визуальным признакам, составу и физико-химическим свойствам рассматривать как особую разновидность – “глинистые пески”. На примере “глинистых песков” подтвердились рекомендации о применении прогнозных формул для расчета числа пластичности по пределу текучести; с помощью кластерного анализа установлено совместное влияние на пластичность содержания пылеватых и глинистых фракций.

Ключевые слова: техногенные грунты, глинистые пески, гранулометрический, химический, микроэлементный состав, свойства, пластичность, кластерный анализ

DOI: 10.31857/S086978092201012X

ВВЕДЕНИЕ

Градообразующий Байкальский целлюлозно-бумажный комбинат (БЦБК) и Байкальск расположены в Слюдянском районе Иркутской области. Как известно, в сентябре 2013 г. основное производство комбината было приостановлено и принято решение о ликвидации его отходов, которые более 40 лет хранятся в грунтовых выемках-картах, окруженных дамбами (рис. 1).

По вопросам ликвидации отходов 1.12.2017 г. в инновационно-технологическом центре Иркутского национального исследовательского технического университета (ИРНИТУ) проводилось рабочее совещание, на котором в рамках проекта “Росгеология – ИРНИТУ” предлагалось реализовать следующие мероприятия: преобразование лигнина в малотоксичный твердый грунт; рекультивация территории биотехнологическим способом с помощью растений-фиторемедиантов; обезвреживание лигнина с помощью проморажи-

вания-оттаивания, обезвреживание надшламовых вод с помощью различных сорбентов [1].

О реальном выполнении перечисленных мероприятий сведений нет, лишь несколько позже появилась публикация [5], в которой представлен один из методов создания из лигнина монолитного техногенного массива путем добавки супеси, цемента и особой минеральной смеси. Модель имела плотность 1.65 г/см³, влажность 36.7%, прочность до 0.5 МПа (при водонасыщении прочность снижалась до 0.31). Сведения о внедрении указанного метода отсутствуют до сих пор.

Однако, несомненно, что при решении практических задач преобразования шлам-лигнина будут востребованы сведения о свойствах грунтов, ограждающих выемки-карты.

В предвидении этого, в ноябре 2017 г. в рамках проекта “Росгеология–ИРНИТУ” в лаборатории по изучению состава и физико-механических свойств горных пород научно-исследовательской части ИРНИТУ началось изучение дисперсных



Рис. 1. Шламонакопители № 1–7 БЦБК. Фото В.А. Короткоручко.

техногенных грунтов гидротехнических сооружений — дамб, окружающих 9 карт-накопителей лигнина (длина карт 1500–2000 м, ширина 100–200 м, глубина 5–6 м). Для этого было пробурено 15 скважин глубиной 6–10 м с отбором образцов нарушенной структуры и природной влажности с интервалом 2 м. Эти образцы явились объектом экспериментальных лабораторных исследований дисперсных техногенных грунтов сотрудниками ИРНТУ и Института земной коры СО РАН (ИЗК СО РАН).

В лаборатории изучения состава и физико-механических свойств горных пород ИРНТУ ситовым методом определялся гранулометрический состав грунтов — 69 образцов, для 34 (после отделения крупнообломочных и грубых песчаных фракций) определялись гранулометрический состав методом пипетки, влажность, пределы и число пластичности. На основании данных, полученных ситовым методом, каждый из 69 образцов получил “наименование” согласно ГОСТ¹ 25100–2011 — песок гравелистый, дресвяный грунт с песком, супесь песчанистая с дресвой, супесь пылеватая щебенистая, супесь пылеватая дресвяная, супесь пылеватая с дресвой, супесь песчанистая; 34 образца по величине числа пластичности и гранулометрическому составу (метод пипетки) отнесены к супесям песчанистым.

В лаборатории инженерной геологии и геоэкологии, а также Центре коллективного пользования (ЦКП) “Геодинамика и геохронология” ИЗК СО РАН проводились комплексные исследования 25 образцов (из 34), которые (по стандарту) принадлежали “супесям песчанистым”. При их визуальном просмотре в воздушно-сухом состоянии установлено, что они являются серыми, разнотекстурными, пылеватыми песками, которые можно рассматривать в качестве особой разновидности дисперсных грунтов “переходного ти-

па” от глин и суглинков к стандартной группе песчаных грунтов. Эти образцы относятся к “глинистым пескам”, которые отличаются некоторыми физико-химическими свойствами (они ближе к пескам, но особым, чем к супесям). Рассматривая термин “глинистый песок”, обратимся к публикациям “старых” классических представлений о супесях (но не супесях песчанистых) и современным материалам.

Профессор В.Д. Ломтадзе [7, с. 307] предложил следующее определение термина: “супесь — глинистая порода четвертичного возраста, в составе которой содержится от 3 до 10% глинистых частиц; это сильно глинистый песок, обладающий некой связностью и пластичностью”. Известно, что в прежних классификациях отсутствовали супеси песчанистые, но выделялись супеси легкие (содержание фракции < 0.002 мм 3–6%) и тяжелые (6–10%), которые, если они принадлежали дочетвертичным образованиям, назывались песками глинистыми. В работе В.И. Каширского [6] указано, что термин “супесь” давно существует в классификации грунтов, принятой в СССР–России, но практически его нет в зарубежной нормативной литературе. За рубежом используется понятие “глинистый песок” в роли переходного типа от глин и суглинков к стандартной группе песчаных грунтов [15]. В указанной работе [15] рассматриваются плейстоценовые пески из обнажения Agrigento (Сицилия, Италия), обладающие связностью за счет пылеватых и глинистых частиц; каркас этих песков состоит из агрегатов-биокластов, также влияющих на их структурную связность.

В работе Н.М. Хайме [13, с. 39] представлены специальные термины, которые используются при инженерно-геологических изысканиях для строительства в Российской Федерации. В этом словаре термин “супесь” переводится как “sand dust” (песок пылеватый, но не супесь песчанистая).

¹ URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200095052>

Таблица 1. Результаты гранулометрического анализа техногенных грунтов

Образец-глубина, м	Размеры (мм) и содержание фракций (%)									
	200—2.0		2—1	1—0.5	0.50—0.25	0.25—0.10	0.10—0.05	0.05—0.002		<0.002
856—2*(П)	48	10	5	3	7	10	6	5	3	2
856—2**	48	10	5	9	18	28	16	15	9	5
857—4*(П)	22	9	1	4	13	18	10	11	8	4
857—4**	22	9	1	6	19	26	15	16	11	6
Образец-глубина, м	200—2.0		2—1	1—0.5	0.50—0.25	0.25—0.10	<0.10 мм			
858—6*	31	21	10	8	11	12	8			
859—8*	38	18	7	8	9	12	8			
860—10*	33	19	7	9	11	13	8			

Примечание: метод гранулометрического анализа: *ситовой, *(П) – ситовой с пересчетом содержаний фракций <0.1 мм на массу всего образца (уменьшается их содержание); **комбинированный.

В ряде публикаций по югу Восточной Сибири [12, 14] неоднократно исследовались и выделялись в особую разновидность природные “связные глинистые пески”, как продукт процессов лессового литогенеза. Для этих образцов, которые предлагается назвать “глинистыми песками” (но не супесями песчанистыми) выполнялись специальные исследования, которые включали определение химического и микроэлементного состава; химический анализ водных, солянокислых и щелочных вытяжек, оценку физико-химической активности (измерялась емкость катионного обмена). Кроме того, стандартными методами определялись углы естественного откоса на воздухе и под водой, величина седиментационного объема (это были простые, но вполне информативные признаки). Число пластичности рассчитывалось с помощью прогнозных формул по пределу текучести. С помощью программы кластерного анализа рассматривались взаимосвязи пластичности с содержанием пылеватых и глинистых фракций изученных техногенных глинистых песков.

МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕХНОГЕННЫХ ГРУНТОВ (ИРНТУ)

В лаборатории ИРНТУ, как отмечалось выше, для дисперсных техногенных грунтов определялся гранулометрический состав. Применялись два метода: ситовой – 69 образцов (с промывкой водой) и комбинированный – 34 образца. В первом случае количество частиц менее 0.1 мм обычно не превышало 10%, поэтому не определялась в их составе доля тонкопесчаных, пылеватых и глинистых фракций; во втором случае метод пипетки выполнял эту задачу.

По одной скважине (скв. 1, карта № 3) представляем сравнительные результаты гранулометрического анализа техногенных дисперсных

грунтов, выполненного различными методами (табл. 1).

Для 34 образцов определены пределы текучести (W_L), пластичности (W_p) и число пластичности (I_p), которое авторы называли экспериментальным, поскольку в дальнейшем были выполнены расчеты по прогнозным формулам с использованием предела текучести (I_{p1} , I_{p2} , I_{p3}) [11]. Статистическая обработка данных по I_p ($n = 34$) показала, что среднее значение пластичности составляет 3%, коэффициент вариации (V) равен 42%. Значительная разнородность значений связана с относительно широким диапазоном показателя (1–6) при общем слабом проявлении пластических свойств. Предел текучести в среднем составляет 19%, коэффициент вариации снижается до 17%.

Влажность изменялась от 4.0 до 25.8%, но только в двух случаях показатель текучести оказался >1 (1.24 при влажности 25.8% и 1.02 при влажности 22.9% в интервале 2–4 м) [4]. В остальных исследованных разрезах грунты находились в твердом состоянии. Возможно, аналогичные опасные зоны со временем могут появиться на других участках.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕХНОГЕННЫХ ГЛИНИСТЫХ ПЕСКОВ (МАТЕРИАЛЫ ИЗК СО РАН)

Химический состав. Определение содержания породообразующих оксидов выполнено для 6 образцов методом силикатного анализа. Проведена статистическая обработка данных. Рассчитаны специальные геохимические коэффициенты: кремнекислый K_i , основной BA и зрелости K_z , отражающие степень “химической зрелости” отложений; интенсивность окислительных процессов характеризует отношение FeO/Fe_2O_3 [8]. Значения кремнекислого коэффициента (3.7–4.1), ос-

Таблица 2. Результаты статистической обработки данных химического состава глинистых песков (tQ_4) ($n = 6$)

Статистические показатели	Содержание компонентов, %										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	ппп	H ₂ O ⁻
X_{cp}	58.70	15.34	3.53	4.06	4.09	4.98	2.60	1.53	0.69	3.57	0.29
X_{min}	57.87	14.06	3.15	3.48	3.50	3.53	2.20	1.14	0.65	2.84	0.16
X_{max}	60.18	15.99	3.88	4.66	4.91	6.20	2.75	1.98	0.72	4.59	0.42
σ	1.01	0.65	0.28	0.43	0.42	0.81	0.18	0.34	0.03	0.54	0.10
$V, \%$	2	4	8	11	10	16	7	22	4	15	33

Примечание: статистические показатели: X_{cp} , X_{min} , X_{max} – среднее, минимальное, максимальное значения; σ , V – стандартное отклонение, коэффициент вариации; n – число определений, ппп – потери при прокаливании пробы.

Таблица 3. Результаты статистической обработки данных о содержании токсичных микроэлементов в глинистых песках (tQ_4) ($n = 6$)

Статистические показатели	Микроэлементы, ppm									Z_c
	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Pb	As	F	
X_{cp}	151	114	25	54	46	88	17	8	548	17
X_{min}	121	84	21	38	34	75	15	7	289	15
X_{max}	171	134	28	70	56	100	20	9	777	18
σ	21.79	20.26	2.90	10.45	10.48	10.22	1.94	1.14	200.38	1.05
$V, \%$	14	18	9	19	23	12	12	14	37	6

Примечание: Z_c – показатель загрязнения [9].

новного (0.51–0.72) и зрелости (5.7–6.4) свидетельствуют о незначительной химической зрелости техногенных глинистых песков; коэффициенты для различных оксидов указывают на преобладание натрия и закисного железа. Статистическая обработка данных по содержанию оксидов показала, что их распределение в большинстве случаев однородно (коэффициент вариации <5–10%) за исключением CaO и K₂O (табл. 2).

Таким образом, исследованные техногенные глинистые пески характеризуются относительно однородным химическим составом, но обогащены оксидами железа (среднее общее содержание 7.60%), кальция и магния (среднее общее содержание 9.1%).

Микроэлементный состав. Для шести образцов, кроме химического состава, рентгенофлуоресцентным методом с помощью спектрометра S8 TIGER (Германия, фирма Брукер) определено содержание 23 микроэлементов (ppm): V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Pb, As, F, Sn, Ba, La, Ce, Nd, Sr, Y, Zr, Nb, Ga, U, Th, Rb, S.

Для группы токсичных компонентов (V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Pb, As, F) проведена статистическая обработка данных и рассчитан специальный показатель загрязнения Z_c (табл. 3). По содержанию преобладают фтор, ванадий, хром и цинк, распределение относительно однородное (коэф-

фициент вариации <25%), за исключением фтора. В группе отсутствует олово, поскольку его содержание < 4 ppm (ppm = 0.0001%).

Показатель загрязнения рассчитан по следующей формуле: $Z_c = \sum [Kd - (n - 1)]$, где Kd – коэффициент концентрации i -элемента в образце, равный для Co, Ni, Cu, Zn отношению концентрации токсичного элемента к фоновому содержанию, для Pb, As – отношению их содержаний к предельно допустимым концентрациям (ПДК); n – число учитываемых элементов ($n = 6$) [9]. По показателю Z_c отмечают удовлетворительную (< 16), критическую (16–32), чрезвычайную (32–128) и катастрофическую (>128) ситуацию по степени загрязнения отложений [3]. Для исследованных техногенных глинистых песков этот показатель составляет 15–18 (см. табл. 3), следовательно, ситуация близка к критической.

Для группы токсичных компонентов (V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Pb, As, F) проведена статистическая обработка данных и рассчитан специальный показатель загрязнения Z_c (табл. 3). По содержанию преобладают фтор, ванадий, хром и цинк, распределение относительно однородное (коэффициент вариации <25%), за исключением фтора. В группе отсутствует олово, поскольку его содержание < 4 ppm (ppm = 0.0001%).

Таблица 4. Коэффициенты концентрации токсичных микроэлементов в глинистых песках (tQ_4) ($n = 6$)

П	Микроэлементы																	
	V		Cr		Co		Ni		Cu		Zn		Pb		As		F	
	X_{cp}	max	X_{cp}	max	X_{cp}	max	X_{cp}	max	X_{cp}	max	X_{cp}	max	X_{cp}	max	X_{cp}	max	X_{cp}	max
C	151	171	114	134	25	28	54	70	46	56	88	100	17	20	8	9	548	777
Ckl	90		83		18		58		47		83		16		1.7		660	
K_c	1.68	1.90	1.37	1.61	1.39	1.56	1.06	1.25	4.71	1.06	1.25	4.71	1.06	1.25	4.71	5.29	0.83	1.18

Примечание: П – показатели: C – содержание микроэлемента (среднее и максимальное значения, ppm); Ckl – кларк по А.П. Виноградову (ppm); K_c – коэффициент концентрации (C/Ckl)

Определен коэффициент концентрации (K_c) токсичных микроэлементов, показывающий отношение конкретного содержания компонента (среднего и максимального) к величине кларка по А.П. Виноградову [2] (табл. 4). Превышают кларк ($K_c > 1$) V, Cr, Co, особенно As (K_c от 4.71 до 5.29), остальные близки к его значению.

Из числа других элементов ведущее место занимают барий (485–728 ppm), стронций (246–349 ppm) и сера (112–376 ppm), несколько превышена концентрация циркония (79–134 ppm). La, Ce, Nd, Y, Nb, Ga, Rb по содержанию (<10–50 ppm) относятся к второстепенным компонентам; радиоактивный уран (<3 ppm) опасности не представляет, торий (4.7–7.5 ppm) по содержанию близок мышьяку и, видимо, опасен.

Карбонаты, $Al_2O_3^*$, водорастворимые соли. Отмечается широкий диапазон по общему содержанию карбонатов (6.3–23.1%), в большинстве образцов преобладают железистые и магниевые формы; подвижные (свободные) оксиды алюминия ($Al_2O_3^*$) имеют положительные и отрицательные “пики” (0.70–3.52%) (табл. 5).

Содержание водорастворимых солей <0.3% ($n = 11$), преобладают сульфаты; реакция среды (рН) щелочная; только в одном случае (в образце 865, отобранном с глубины 10 м) обнаружены аномальное засоление (2.36%) и кислая среда (рН 4.0).

Емкость катионного обмена. Определялась по методу Л.И. Кульчицкого, разработанному еще в 1977 г., в качестве рекомендаций при изучении грунтов и почв. Этот метод давно применяется в лаборатории инженерной геологии и геоэкологии ИЗК СО РАН, подробно описан в работе [10]. Величина емкости катионного обмена (ЕКО, мг-экв на 100 г вещества) отражает степень физико-химической активности грунта. Измерения проводились для 10 образцов, в среднем ЕКО составила 35 мг-экв, но отмечены минимальный (10 мг-экв) и максимальный (62 мг-экв) пики.

Пластичность. Число пластичности (I_p), которое определялось в лаборатории ИРНТУ для 34 образцов глинистых песков (по стандартной

классификации они отнесены к песчанистым супесям), характеризуется очень небольшими значениями: (1–3%), только в 6 случаях фиксируется увеличение до 4–6%. По пределу текучести W_L проведен расчет ($n = 34$) числа пластичности с помощью прогнозных формул, предложенных Б.Ф. Галаем (1), (2) и сотрудниками треста ВостСибТИСИЗа в Иркутске (3) [11]:

$$I_{p1} = 0.75W_L - 11, \quad (1)$$

$$I_{p2} = 0.8W_L - 14, \quad (2)$$

$$I_{p3} = 0.599W_L - 0.079, \quad (3)$$

где W_L – предел текучести. По формулам (1) и (2) расчеты проводятся в процентах, по формуле (3) – в долях единицы, затем переводятся в проценты.

Пересчет по (1) и (3) подтвердил удовлетворительное совпадение экспериментальных (I_p) и расчетных (I_{p1} , I_{p3}) значений числа пластичности

Таблица 5. Карбонаты и подвижные формы оксида алюминия в глинистых песках (tQ_4 , $n = 11$)

Образец-глубина, м	Компоненты, %				
	$CaCO_3$	$MgCO_3$	Fe_2O_3	$S_{кр}$	$Al_2O_3^*$
842–4	11.96	6.11	4.99	23.06	0.70
846–2	1.99	3.06	3.86	8.91	2.51
848–6	3.99	2.29	2.41	8.69	1.33
850–10	2.99	1.53	3.46	7.98	2.44
853–6	2.99	0.76	5.39	9.14	2.61
856–2	2.99	2.29	6.92	12.20	1.30
857–4	1.99	2.29	2.01	6.29	1.98
860–10	15.95	4.77	4.19	24.91	0.71
861–2	1.99	1.53	5.39	8.91	2.26
862–4	2.99	1.53	8.45	12.97	3.52
865–10	2.99	0.76	6.44	10.19	0.72

Примечание: $S_{кр}$ – общее содержание карбонатов, $S_{кр} CaCO_3$, $MgCO_3$ определялись по данным химического анализа солянокислой вытяжки с использованием специальных коэффициентов; $Al_2O_3^*$ – подвижные формы оксида алюминия.

Таблица 6. Результаты сопоставления (фрагмент) экспериментальных и прогнозных значений числа пластичности глинистых песков (tQ_4)

Образец-глубина, м	Показатели пластичности, %			
	W_L	I_p	I_{p1}	I_{p3}
842–4	18.1	3	3	3
846–2	20.9	3	5	5
848–6	17.3	2	2	3
849–8	16.3	2	1	1
850–10	20.6	3	5	2
853–6	17.5	1	2	3
856–2	22.8	5	6	6
861–2	23.5	2	6	6

Примечание: W_L – предел текучести; число пластичности: I_p – экспериментальное, I_{p1} – расчетное по (1), I_{p3} – расчетное по (3).

техногенных глинистых песков (табл. 6). Средние значения пластичности составили соответственно 3% (I_p), 4% (I_{p1}), 3% (I_{p3}).

Углы естественного откоса, седиментационный объем. Углы естественного откоса измерены для 13 образцов, при этом установлена общая закономерность – под водой происходит снижение на 7° – 13° . Эта закономерность является признаком склонности глинистых песков к плавунности.

Седиментационный объем (V_c , см^3), определение которого выполнено для 25 образцов глинистых песков, является классификационным признаком плавунности: тип I ($V_c < 3.3 \text{ см}^3$) – пески; тип II ($V_c = 3.3$ – 10.0 см^3) – пылевато-глинистые, в том числе лессовые грунты; тип III ($V_c > 10 \text{ см}^3$) – плавунные глины. Из 25 образцов 21 относятся к I типу, таким образом, подтверждается их принадлежность к плавунным пескам, тем более что для них характерно резкое снижение угла естественного откоса под водой за счет, вероятнее всего, присутствия глинистых и пылеватых частиц.

Таким образом, простейшие методы показывают, что объекты исследования не относятся к лёссовым грунтам или плавунным глинам, но принадлежат к особой разновидности песков.

С помощью кластерного анализа R -типа [10] выполнена оценка влияния содержания тонкозернистых песчаных (0.01–0.05 мм), пылеватых (0.05–0.002) и глинистых (< 0.002) фракций на пластичность техногенных глинистых песков. Располагая данными о количестве указанных фракций и экспериментальными значениями числа пластичности (I_p), авторы построили четыре варианта графиков-дендрограмм, по вертикальной оси которых располагаются признаки

(содержание фракций и число пластичности), по горизонтальной – коэффициент корреляции (r). Оценка тесноты связей между признаками: при $r > 0.7$ связи существенные, $r < 0.4$ – несущественные, 0.4–0.7 – заметные (среднего уровня).

Первый вариант графика-дендрограммы показал отрицательную (обратную) взаимосвязь пластичности с содержанием тонкозернистой песчаной фракции ($r = -0.18$). Во втором варианте установлены заметные связи с глинистой фракцией ($r = 0.64$), в третьем – существенные с пылеватыми частицами ($r = 0.72$). На заключительном этапе (четвертый вариант) установлена корреляция пластичности с общим содержанием глинистых и пылеватых фракций ($r = 0.73$).

На основе представленных данных показано совместное влияние содержания пылеватых и глинистых фракций на проявление пластичности техногенных глинистых песков, при этом уровень взаимосвязей пылеватых частиц даже выше (0.72), чем глинистых (0.64).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа совместных материалов ИРНТУ и ИЗК СО РАН с привлечением опубликованных источников в составе техногенных грунтов гидротехнических сооружений (дамб), окружающих карты-накопители отходов Байкальского ЦБК, выделена (в качестве дискуссионного предложения) особая разновидность грунтов – пески глинистые, пылеватые, слабо пластичные, представляющие “переходный тип” от глин и суглинков к стандартной группе песчаных грунтов (согласно ГОСТ 25100-2011 – это супеси песчаные).

Для техногенных глинистых песков выполнены исследования химического (силикатный анализ) и микроэлементного (рентгенофлуоресцентный анализ) состава. Содержание породообразующих оксидов относительно однородно при обогащении железом, кальцием и магнием. Загрязнение токсичными микроэлементами оказалось почти критическим (значения Z_c находятся в пределах 15–18), при этом зафиксированы высокая концентрация (по сравнению с кларком) мышьяка, присутствие радиоактивного тория и повышенные содержания фтора и серы.

Техногенные глинистые пески обладают некоторыми “аномальными” свойствами – они слабо пластичны, проявляют физико-химическую активность, снижают угол естественного откоса под водой, по величине седиментационного объема ($< 3.3 \text{ см}^3$) относятся к группе плавунных песков.

На примере нового объекта подтвердились рекомендации о применении в практике инженерно-геологических изысканий метода определения числа пластичности по пределу текучести.

С помощью программы кластерного анализа показано совместное влияние на пластичность содержания пылеватых и глинистых фракций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Брайт О.* Проблема БЦБК: ИРНТУ предлагает объединить усилия // Аргументы недели, 2017. № 49. С. 12–13.
2. *Виноградов А.П.* Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 78 с.
3. Геохимия окружающей среды / [Кол. авт. Сает Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П., Смирнова Р.С. и др.]. М.: Недра, 1990. 335 с.
4. *Гринь Н.Н., Ланкин Ю.К., Рященко Т.Г.* Изучение техногенных грунтов в рамках проекта рекультивации отходов Байкальского ЦБК // Сергеевские чтения: матер. годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. Вып. 20. М.: РУДН, 2018. С. 112–117.
5. *Жабриков С.Ю., Кнатько М.В., Здобин Д.Ю.* Обеспечение геоэкологической безопасности размещения отходов в границах центральной экологической зоны Байкальской природной территории // Сергеевские чтения: матер. годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. Вып. 20. М.: РУДН, 2018. С. 118–122.
6. *Каширский В.И.* Нормативные документы в условиях перехода к саморегулируемым организациям // Сергеевские чтения: матер. годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. Вып. 12. М.: РУДН, 2010. С. 30–39.
7. *Ломтадзе В.Д.* Словарь по инженерной геологии. СПб.: СПбГИ, 1999. 360 с.
8. *Лукашев В.К.* Геохимические индикаторы процессов гипергенеза и осадкообразования. Минск: Наука и техника, 1972. 320 с.
9. *Порядин А.Ф., Хованский А.Д.* Оценка и регулирование качества окружающей природной среды. М.: Прибой, 1996. 350 с.
10. *Рященко Т.Г.* Региональное грунтоведение (Восточная Сибирь). Иркутск: ИЗК СО РАН, 2010. 287 с.
11. *Рященко Т.Г., Тирских С.А.* Определение пластичности глинистых и лессовых грунтов: оценка расчетного метода и рекомендации // Инженерные изыскания. 2016. № 8. С. 10–14.
12. *Рященко Т.Г., Ухова Н.Н.* Химический состав дисперсных грунтов: возможности и прогнозы (Восточная Сибирь). Иркутск: ИЗК СО РАН, 2008. 131 с.
13. *Хайме Н.М.* Русско-английский и англо-русский словарь терминов, используемых при инженерно-геологических изысканиях для строительства. Казань: Астор и Я, 2016. 96 с.
14. *Ryashchenko T.G., Akulova V.V., Ukhova N.N.* Processes of loess lithogenesis during the Pleistocene–Holocene // Quaternary International, 2011. №. 240. P. 150–155.
15. *Zimbaro M., Ercoli L., Megna B.* The open metastable structure of a collapsible sand: fabric and bonding // Bulletin Engineering Geology and the Environment, 2016. V. 75. №. 1. P. 125–139.

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE TECHNOGENIC SOILS OF THE SLUDGE COLLECTOR DAMS IN THE AREA OF THE BAIKAL PULP AND PAPER MILL

T. G. Ryashchenko^{a, #}, N. N. Grin^b, S. I. Shtel'makh^a, and N. N. Ukhova^{a, ##}

^a Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, ul. Lermontova, 128, Irkutsk, 664033 Russia

^b Irkutsk National Research Technical University, ul. Lermontova, 83, Irkutsk, 664074 Russia

[#]e-mail: ryashenk@crsut.irk.ru;

^{##}e-mail: nat-ukhova@crust.irk.ru

The experimental studies of fine technogenic soils of dams surrounding nine lignin collector cells were performed according to the borehole drilling (6–10 m) data with taking samples of disturbed structure and the natural humidity in the area of the Baikal PPM. The particle-size distribution was analyzed in 69 samples by the sieve method in the laboratory of the INRTU. Soil moisture and plasticity indices were determined; and the particle-size distribution was analyzed by the pipette method for 34 samples after the separation of the coarse fractions. Each sample out of 34 was classified as arenaceous sandy loam according to the State Standard classification (GOST) 25100-2011. The comprehensive studies of 25 samples of arenaceous sandy loams were carried out at the Institute of the Earth's Crust, SB RAS. Authors propose to consider the arenaceous sandy loam as a special variety of clayey sands in accordance with the visual signs, the composition and the physical-chemical properties. By the example of clayey sands, the study has confirmed the usefulness of predictive formulas for calculation of the plasticity index by the liquid limit. The cluster analysis revealed the joint influence of silty and clayey fractions on plasticity.

Keywords: technogenic soils, clayey sands, particle-size distribution, chemical, microelement composition, properties, plasticity, cluster analysis

REFERENCES

1. Brait, O. *Problema BTsBK: IRNITU predlagayet ob'yedinit' usiliya* [BPPM problem: IRNITU proposes to join efforts]. *Argumenty nedeli*, 2017, no. 49, pp. 12–13. (in Russian)
2. Vinogradov, A.P. *Geokhimiya redkikh i rasseyannykh khimicheskikh elementov v pochvakh* [Geochemistry of rare and trace chemical elements in soils]. Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1957, 78 p. (in Russian)
3. *Geokhimiya okruzhayushchei sredy* [Geochemistry of the environment]. Sayet, Yu.E., Revich, B.A., Yanin, E.P., Smirnova, R.S., et al. Moscow, Nedra Publ., 1990, 335 p. (in Russian)
4. Grin', N.N., Lankin, Yu.K., Ryashchenko, T.G. *Izuchenie tekhnogennykh gruntov v ramkakh proyekta rekul'tivatsii otkhodov Baikal'skogo TSBK* [Study of technogenic soils in the framework of the project for reclamation of waste from the Baikal PPM]. *Sergeevskie chteniya. Materialy godichnoi sessii Nauchnogo soveta RAN po problemam geoekologii, inzhenernoi geologii i gidrogeologii*. Moscow, RUDN Publ., 2018, vol. 20, pp. 112–117. (in Russian)
5. Zhabrikov, S.Yu., Knat'ko, M.V., Zdobin, D.Yu. *Obe-spechenie geoekologicheskoi bezopasnosti razmeshcheniya otkhodov v granitsakh tsentral'noi ekologicheskoi zony Baikal'skoi prirodnoi territorii* [Ensuring geoecological safety of waste disposal within the boundaries of the central ecological zone of the Baikal natural reserve territory]. *Sergeevskie chteniya. Materialy godichnoi sessii Nauchnogo soveta RAN po problemam geoekologii, inzhenernoi geologii i gidrogeologii*. Moscow, RUDN Publ., 2018, vol. 20, pp. 118–122. (in Russian)
6. Kashirskii, V.I. *Normativnye dokumenty v usloviyakh perekhoda k samoreguliruemym organizatsiyam* [Regulatory documents in the context of the transition to self-regulatory organizations]. *Sergeevskie chteniya. Materialy godichnoi sessii Nauchnogo soveta RAN po problemam geoekologii, inzhenernoi geologii i gidrogeologii*. Moscow, GEOS Publ., 2010, vol. 12, pp. 30–39. (in Russian)
7. Lomtadze, V.D. *Slovar' po inzhenernoi geologii* [Dictionary of engineering geology]. St. Petersburg, SPGI Publ., 1999, 360 p. (in Russian)
8. Lukashev, V.K. *Geokhimicheskie indikatory protsessov gipergeneza i osadkoobrazovaniya* [Geochemical indicators of the processes of hypergenesis and sedimentation]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1972, 320 p. (in Russian)
9. Poryadin, A.F., Khovanskii, A.D. *Otsenka i regulirovanie kachestva okruzhayushchei prirodnoi sredy* [Assessment and regulation of the quality of the natural environment]. Moscow, Priboi Publ., 1996, 350 p. (in Russian)
10. Ryashchenko, T.G. *Regional'noe gruntovedenie (Vostochnaya Sibir')* [Regional soil science (Eastern Siberia)]. Irkutsk, Institut zemnoi kory SO RAN, 2010, 287 p. (in Russian)
11. Ryashchenko, T.G., Tirsikh, S.A. *Opreделение plasticnosti glinistyykh i lyossovyykh gruntov: otsenka raschetnogo metoda i rekomendatsii* [Determination of plasticity of clay and loess soils: evaluation of the calculation method and recommendations]. *Inzhenernye izyskaniya*. 2016, no. 8, pp. 10–14. (in Russian)
12. Ryashchenko, T.G., Ukhova, N.N. *Khimicheskii sostav dispersnykh gruntov: vozmozhnosti i prognozy (Vostochnaya Sibir')* [Chemical composition of dispersed soils: possibilities and forecasts (Eastern Siberia)]. Irkutsk, Institut zemnoi kory SO RAN, 2008, 131 p. (in Russian)
13. Khaime, N.M. *Russko-angliiskii i anglo-russkii slovar' terminov, ispol'zuemykh pri inzhenerno-geologicheskikh izyskaniyakh dlya stroitel'stva* [Russian-English and English-Russian dictionary of terms used in engineering and geological surveys for construction]. Kazan': Astor i Ya Publ., 2016, 96 p. (in Russian)
14. Ryashchenko, T.G., Akulova, V.V., Ukhova, N.N. Processes of loess lithogenesis during the Pleistocene–Holocene. *Quaternary International*, 2011, vol. 240, pp. 150–155.
15. Zimbardo, M., Ercoli, L., Megna, B. The open metastable structure of a collapsible sand: fabric and bonding. *Bulletin Engineering Geology and the Environment*, 2016, vol. 75, no. 1, pp. 125–139.