

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЕХНОГЕННЫХ ГРУНТОВ НА ТЕРРИТОРИИ ЭЛЕКТРОЛИЗНОГО И ГЛИНОЗЕМНОГО ПРОИЗВОДСТВА

О. Ю. Ширинкин, В. А. Елохин

Physical and mechanical properties of technogenic soils on the territory of electrolysis and alumina production

O. Yu. Shirinkin, V. A. Elokhin

The subject of research are technogenic soils. The objective is to study physical and mechanical properties of soils, and, using methods of mathematical statistics, to identify patterns in the distribution of the studied parameters. Territory of research is in the southeastern part of the Kamensk-Ural'sk town and includes the territories of the alumina and electrolysis production. Stratum of foundation soils is inhomogeneous, within it are allocated 14 engineering-geological elements (EGE). Bulk soil represents dumps of natural soils and waste products (slag, concrete, construction waste). This study presents the main statistical indicators of physical and mechanical properties of anthropogenic soils tQ. In order to identify links between the studied parameters and determine the factors that affect their distribution, we performed correlation, cluster and factor analysis. Correlation analysis revealed that in technogenic soils the strongest positive correlation is between such parameters as yield strength – limit lamination ($r = 0,83$) and yield strength – plasticity ($r = 0,84$), at the critical value of correlation coefficient equal to 0.36. The revealed correlations allowed us to compile the regression equations. According to the results of cluster analysis, we grouped related pairs of indicators into clusters. The studies revealed that salinization of soils of industrial site develops unevenly over the area and depth. Correlation analysis revealed that in technogenic soils tQ the strongest relationship is between the contents of hydrocarbonate and sodium ($r = 0,75$), in addition, hydrogen has a direct positive relation to sodium and hydrogen index ($r = 0,56$ and $r = 0,51$, respectively), and sodium is linked with sulfate ($r = 0,62$) and chlorine ($r = 0,48$) at a critical value of the correlation coefficient of 0.48. According to the results of cluster analysis, authors grouped all the components into several clusters. The research of physical and mechanical properties of technogenic soils of basements and foundations of buildings and structures of electrolysis and alumina production of Ural aluminum factory allows us to conclude that the physical and mechanical properties are determined by the composition of soils. Mainly, argillaceous rocks are exposed to salinity, and to a lesser extent – sand and gravel residuals.

Keywords: soil; physical and mechanical properties of soils; electrolytic and alumina production; methods of mathematical statistics.

Предметом исследования являются техногенные грунты. Цель работы – изучить физико-механические свойства грунтов и с помощью методов математической статистики выявить закономерности в распределении исследованных параметров. Участок исследований, включающий территории глиноземного и электролизного производства, расположен в юго-восточной части города Каменска-Уральского. Толща грунтов оснований является неоднородной, в её пределах выделяется 14 инженерно-геологических элементов (ИГЭ). Насыпной грунт представляет собой отвалы естественных грунтов и отходов производства (шлаки, бетон, строительный мусор). В работе приведены основные статистические показатели физико-механических свойств техногенных грунтов tQ. С целью выявления связей между исследованными параметрами и определения факторов, влияющих на их распределение, выполнены корреляционный, кластерный и факторный анализы. Корреляционный анализ позволил установить, что в техногенных грунтах наиболее сильная положительная связь отмечается между такими параметрами, как предел текучести – предел раскатывания ($r = 0,83$); предел текучести – число пластичности ($r = 0,84$) при критическом значении коэффициента корреляции, равном 0.36. Выявленные корреляционные связи позволили составить уравнения регрессии. В ходе исследований установлено, что засоление грунтов промплощадки развивается неравномерно по площади и глубине. Корреляционный анализ позволил установить, что в техногенных грунтах tQ наиболее сильная связь отмечается между содержаниями гидрокарбоната и натрия ($r = 0,75$), кроме того, гидрокарбонат имеет прямую положительную связь с натрием и водородным показателем ($r = 0,56$ и $r = 0,51$ соответственно), а натрий связан с сульфатом ($r = 0,62$) и хлором ($r = 0,48$) при критическом значении коэффициента корреляции 0.48. По результатам кластерного анализа все компоненты сгруппировались в несколько кластеров. Проведенные исследования физико-механических свойств техногенных грунтов оснований и фундаментов зданий и сооружений электролизного и глиноземного производства Уральского алюминиевого завода позволяют сделать вывод, что физико-механические свойства определяются составом грунтов, а засолению подвержены главным образом глинистые породы и в значительно меньшей степени – песчано-гравийные разности.

Ключевые слова: грунты; физико-механические свойства грунтов; электролизное и глиноземное производство; методы математической статистики.

Участок исследований, включающий территории глиноземного и электролизного производства, расположен в юго-восточной части города Каменска-Уральского и приурочен к зоне развития эффузивных пород андезибазальтового состава среднедевонского возраста. Коренные породы в верхней части разреза разрушены до состояния древесно-щепенистого и глинистого материала, образуя соответственно обломочную и глинистую зоны коры выветривания материнских пород. На образованиях древней коры выветривания с угловым несогласием залегает толща гравийно-галечниковых и песчано-

глинистых пород нижнемелового возраста, перекрытых маломощным чехлом аллювиально-делювиальных четвертичных отложений, скрывающихся под слоем современных техногенных образований.

Инженерно-геологический разрез площадки до глубины 20 м слагают следующие разновидности грунтов (сверху вниз).

Техногенные образования tQ представляют собой планомерные насыпи естественных грунтов (щебень, песок, глина, почва) и производственных отходов (шлаки, металл, строительный мусор), а также асфальтобетонное дорожно-площадное покрытие; распространены на всей территории с поверхности до максимальной глубины 6,0 м.

Аллювиально-делювиальные отложения четвертичного возраста adQ представлены глинами, резе суглинками коричневого цвета от твердой до тугопластичной консистенции, с карбонатными стяжениями, редкими включениями гравия и гальки кварца, участками – с примесью органики. Имеют площадное распространение с глубины 0,2–2,5 м мощностью слоя от 0,5 до 5,5 м.

Аллювиальные песчаные и гравийно-галечниковые отложения нижнемелового возраста aK₁ залегают под четвертичными глинами. Верхняя часть разреза представлена песками желто-коричневого и серого цвета, полимиктового и кварцевого состава, от гравелистых до средней крупности. Отложения неоднородные, влажные и водонасыщенные. Залегают выдержанным слоем мощностью от 0,3 до 0,7 м. В нижней части разреза пески подстилаются гравийно-галечниковыми грунтами желтовато-коричневого цвета полимиктового состава, слабоокатанными, влажными и водонасыщенными. Мощность слоя от 1,0 до 5,0 м.

Аллювиальные глинистые отложения нижнемелового возраста aK₁ представлены глинами и суглинками желтовато-коричневого, охристого цвета, пестроцветными, от твердой до тугопластичной консистенции, с тонкими прослоями мелких и пылеватых песков, с включениями гальки кварца и конкреций лимонита. Подстилают (иногда замещают) песчано-гравийные разности с глубины 2,4–7,0 м, мощность слоя от 0,4 до 9,1 м.

Элювиальные образования дисперсной зоны коры выветривания eMZ представлены глинами и суглинками серо-голубого, синего, вишневого цвета, твердой и полутвердой (редко тугопластичной) консистенции, с дресвой и щебнем порфиритов от 10 до 40 %. Обнаружены на глубине от 4,5 до 13,0 м, вскрытая мощность достигает 15,5 м.

Элювиальные образования обломочной зоны коры выветривания eMZ представлены дресвяно-щебенистыми обломками порфиритов зеленовато-серого цвета с глинистым заполнителем от 20 до 40 %; обнаружены на глубине от 6,0 до 12,0 м, вскрытая мощность составила 1,5–5,0 м.

Скальные породы представлены порфиритами среднедевонского возраста D₂ темно-зеленого цвета, порфировой структуры, массивной

текстуры, выветрелыми, трещиноватыми, обводненными; залегают в основании разреза, обнаружены на глубине от 8,5 до 15,0 м, вскрытая мощность 16,0 м.

На протяжении 80-летнего периода инженерного освоения территории и эксплуатации завода на площадке развивались физико-геологические процессы техногенного характера.

Планировка территории: выемка, перемещение, обратная засыпка грунтов – привели к изменению природного рельефа, образованию мощной толщи насыпных грунтов, ликвидации естественных дрен и, как следствие, к нарушению условий поверхностного стока, образованию техногенной верховодки.

Площадное асфальтирование и бетонирование территории привели к снижению величины испарения и, как следствие, к подъему уровня грунтовых вод [1].

Технологический процесс электролизного производства изменил тепловой режим и температуру грунтов и, как следствие, повлиял на физические свойства грунтов оснований.

«Мокрый» технологический процесс глиноземного производства за счет инфильтрации сточных вод привел к изменению режима и химического состава подземных вод, образованию техногенной верховодки и также повлиял на физико-химические свойства грунтов оснований [2].

В результате многолетнего развития перечисленных процессов естественные инженерно-геологические условия изучаемой территории были нарушены, грунты оснований приобрели новые, специфические свойства, не учитывавшиеся в расчетной схеме «сооружение-основание» («фундамент-основание») [3].

Насыпной грунт представляет собой отвалы естественных грунтов (почва, песчано-глинистые, крупнообломочные породы) и отходов производства (шлаки, бетон, строительный мусор), а также участками – асфальтобетонное покрытие заводской территории.

Грунты отсыпаны сухим способом, по степени уплотнения от собственного веса – слежавшиеся. Техногенные образования характеризуются неоднородным составом и сложением, неравномерной плотностью и сжимаемостью, в качестве оснований сооружений не используются.

Основные статистические оценки распределения показателей физико-механических свойств техногенных грунтов *tQ* приведены в табл. 1.

С целью выявления связей между исследованными параметрами и определения факторов, влияющих на их распределение, выполнены корреляционный, кластерный и факторный анализы.

Корреляционный анализ (табл. 2) позволил установить, что в техногенных грунтах наиболее сильная положительная связь отмечается между такими параметрами, как предел текучести – предел раскатывания ($r = 0,83$); предел текучести – число пластичности ($r = 0,84$) при критическом значении коэффициента корреляции, равном 0,36.

Принято считать, что при $r \leq 0,25$ корреляция слабая; при $0,25 < r \leq 0,75$ – умеренная, при $r > 0,75$ – сильная [4].

Из табл. 2 следует, что кроме значимых положительных связей отмечаются значимые отрицательные связи. В целом значения предела текучести, предела раскатывания и числа пластичности определяются содержанием тонкой фракции Ф. В то же время количество тонкой фракции имеет отрицательную корреляцию с содержанием крупной фракции.

Таблица 1. Статистические показатели физико-механических свойств техногенных грунтов *tQ*.

Параметр	Количество проб	Среднее	Минимум	Максимум	Стандартное отклонение	
Природная влажность, доли ед.	5	0,174	0,137	0,192	0,022354	
Предел текучести, доли ед.	30	0,352	0,231	0,536	0,079404	
Предел раскатывания, доли ед.	30	0,216	0,131	0,345	0,046507	
Число пластичности, доли ед.	30	0,136	0,042	0,273	0,048669	
Показатель текучести, доли ед.	8	-0,330	-0,94	0,041	0,312128	
Плотность грунта, г/см ³	8	1,80	1,72	1,87	0,048088	
Плотность частиц грунта, г/см ³	8	2,67	2,61	2,69	0,025635	
Пористость, %	8	44,46	40,40	49,00	2,916425	
Коэффициент пористости, доли ед.	8	0,81	0,678	0,962	0,094740	
Коэффициент водонасыщения, доли ед.	8	0,720	0,435	0,879	0,142714	
Относительное содержание органического вещества, доли ед.	16	0,092	0,063	0,140	0,023064	
Степень засоленности, %	12	0,47	0,20	1,30	0,296444	
Гранулометрический состав, %	< 0,005 мм	30	11,38	2,20	34,40	7,553400
	0,005–0,01 мм	30	7,46	0,50	17,60	4,264568
	0,01–0,05 мм	30	16,77	7,00	32,40	6,793421
	0,05–0,1 мм	30	13,33	5,60	28,80	5,554194
	0,1–0,25 мм	30	10,98	6,80	22,90	3,838049
	0,25–0,5 мм	30	10,72	3,80	26,90	4,741773
	0,5–2,0 мм	30	11,47	4,50	23,10	4,505654
	2,0–10,0 мм	30	11,94	0,00	40,80	9,798511
	> 10,0 мм	30	5,96	0,00	21,70	6,587903

Таблица 2. Матрица парных коэффициентов корреляции физико-механических характеристик техногенных грунтов.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1,00	0,83	0,84	0,25	0,31	0,36	0,57	0,11	-0,27	-0,30	-0,47	-0,29	
	1,00	0,39	0,14	0,08	0,26	0,38	0,18	-0,32	-0,22	-0,27	-0,12	
		1,00	0,28	0,43	0,34	0,57	0,01	-0,14	-0,29	-0,52	-0,36	
			1,00	0,56	0,21	0,17	0,03	-0,12	-0,68	-0,57	-0,48	
				1,00	0,34	0,09	-0,07	-0,16	-0,59	-0,48	-0,45	
					1,00	0,03	-0,09	-0,12	-0,49	-0,46	-0,35	
						1,00	0,36	-0,15	-0,16	-0,46	-0,43	
							1,00	0,15	-0,15	-0,40	-0,19	
								1,00	0,28	-0,18	-0,23	
									1,00	0,43	0,38	
										1,00	0,40	
											1,00	
												1,00

1 – предел текучести; 2 – предел раскатывания; 3 – число пластичности; 4–12 – гранулометрический состав: 4 – < 0,005; 5 – 0,005–0,01; 6 – 0,01–0,05; 7 – 0,05–0,1; 8 – 0,1–0,25; 9 – 0,25–0,5; 10 – 0,5–2,0; 11 – 2,0–10,0; 12 – > 10,0.

Выявленные корреляционные связи позволили составить уравнения регрессии, основными из которых являются:

$$\text{Предел раскатывания} = 0,04586 + 0,48368 \cdot \text{предел текучести (при } r = 0,83).$$

$$\text{Число пластичности} = 0,51632 \cdot \text{предел текучести} - 0,0459 \text{ (при } r = 0,84).$$

$$\text{Предел текучести} = [\Phi(0,05-0,1) + 0,6808] / 39,768 \text{ (при } r = 0,57).$$

$$\Phi(0,5-2,0) = 16,111 - 0,4079 \cdot \Phi(< 0,005) \text{ (при } r = -0,68).$$

Из полученных уравнений следует, что, определив один из параметров в целом (например, предел текучести), другие можно рассчитать с меньшими затратами.

Выполненный корреляционный анализ отражает только наличие связей между парами показателей и не даёт представление о картине в целом. Поэтому дополнительно был выполнен кластерный анализ, позволивший сгруппировать взаимосвязанные пары показателей в кластеры и построить дендрограмму (рис.), на которой по оси абсцисс показаны исследованные параметры, а по оси ординат – значения 1 – r. По результатам кластерного анализа выявилось несколько групп (кластеров) взаимосвязанных параметров. Наиболее сильную связь имеют такие показатели, как предел текучести, число пластичности и предел раскатывания. Эта группа параметров связана с фракцией 0,05–0,1 мм, а все вместе они связаны с самыми тонкими фракциями.

Факторный анализ, выполненный на основе корреляционной матрицы, позволил выделить четыре фактора, влияющих на распределение показателей (табл. 3), два из которых являются значимыми.

Значительный вклад в фактор 1 с суммарной дисперсией 37,96 % вносят предел текучести, число пластичности и фракция частиц разме-

ром 2,0–10 мм, причем последний показатель имеет отрицательное значение. Следует отметить, что вклад таких показателей, как крупность зёрен размером от < 0,005 мм до 0,1 мм, близок к критическому значению 0,7, в то время как вклад крупнозернистой фракции 0,5–2,0 мм и > 10,0 мм также находится на уровне, близком к значимому. Исходя из этого, можно предположить, что в качестве фактора 1 выступают условия образования данных грунтов.

Значимый вклад в фактор 3 с суммарной дисперсией 13,3 % вносит такой параметр, как размер частиц 0,25–0,5 мм.

На территории электролизного производства грунты под воздействием технологических процессов подвержены значительному прогреву. Непосредственно под корпусами температура грунтов достигает +70 °С.

По результатам термокаротажных работ в скважинах наиболее интенсивному тепловому воздействию подвержены грунты, залегающие в интервале глубин 6,0–10,0 м, т. е. ниже глубины заложения фундаментов корпусов и технологического оборудования, где температура грунтов превышает +40 °С.

В ходе исследований установлено, что засоление грунтов промплощадки развивается неравномерно по площади и глубине. Основные статистические оценки распределения содержаний легкорастворимых солей, мг/дм³, и водородного показателя в техногенных грунтах на участке глиноземного производства приведены в табл. 4.

Корреляционный анализ позволил установить, что в техногенных грунтах tQ наиболее сильная связь отмечается между содержаниями гидрокарбоната и натрия (r = 0,75), кроме того, гидрокарбонат имеет прямую положительную связь с натрием и водородным показателем (r = 0,56 и r = 0,51 соответственно), а натрий связан с сульфатом (r = 0,62) и хлором (r = 0,48) при критическом значении коэффициента корреляции 0,48. По результатам кластерного анализа все компоненты сгруппировались в несколько кластеров. В первый кластер вошли натрий и гидрокарбонат, которые связаны с сульфатом. В свою очередь, эти три компонента имеют связь с хлором.

Общего засоления грунтов не наблюдается, выявлены лишь отдельные участки засоленных грунтов на территории глиноземного производства.

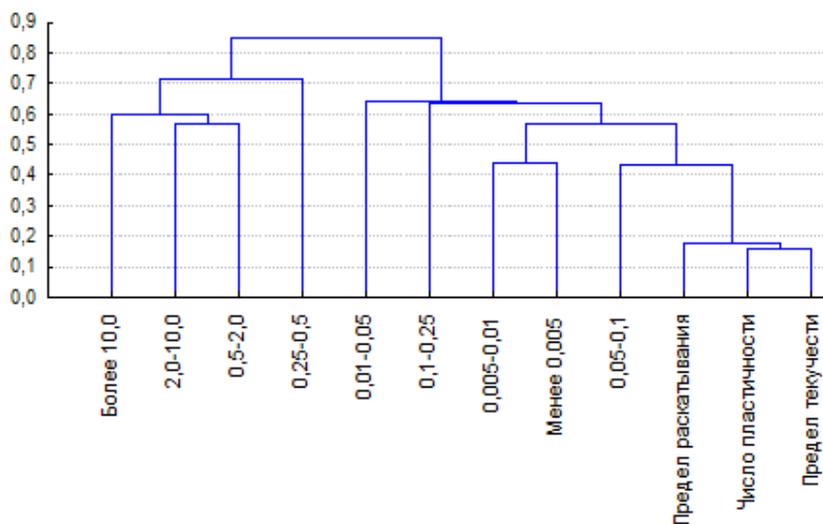
Таким образом, проведенные исследования физико-механических свойств техногенных грунтов оснований и фундаментов зданий и сооружений электролизного и глиноземного производства Уральского алюминиевого завода позволяют сделать вывод, что физико-механические свойства определяются составом грунтов, а засолению подвержены главным образом глинистые породы и в значительно меньшей степени песчано-гравийные разности.

Таблица 3. Матрица значений факторных нагрузок переменных на основные показатели.

Параметр	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4
Предел текучести	0,797547	-0,525930	-0,137550	-0,162127
Предел раскатывания	0,561545	-0,593970	-0,181044	0,098661
Число пластичности	0,764608	-0,290477	-0,051412	-0,358790
Гранулометрический состав, %	< 0,005 мм	0,644791	0,503776	-0,054038
	0,005–0,01 мм	0,642461	0,479616	-0,217921
	0,01–0,05 мм	0,553489	0,214709	-0,252012
	0,05–0,1 мм	0,596063	-0,459162	0,346545
	0,1–0,25 мм	0,236681	-0,175489	0,674653
	0,25–0,5 мм	-0,199355	0,275463	0,730250
	0,5–2,0 мм	-0,683893	-0,423245	0,232960
	2,0–10,0 мм	-0,766891	-0,152587	-0,367153
>10,0 мм	-0,614482	-0,304257	-0,361450	
Вклад в общую дисперсию	4,555373	1,856199	1,596492	1,023032
Суммарная дисперсия, %	37,96	15,47	13,30	8,53

Таблица 4. Статистические оценки распределения содержаний легкорастворимых солей, мг/дм³, и водородного показателя в техногенных грунтах на участке глиноземного производства

Параметр	pH	Na ⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
Количество анализов	18	18	18	18	18	18
Среднее	8,14	133,83	16,46	20,96	100,76	241,36
Минимум	7,20	52,00	0,0001	5,70	32,90	12,20
Максимум	9,50	358,00	96,20	49,60	422,20	683,40
Стандартное отклонение	0,7114	79,64	21,027	13,88	91,47	173,58



Дендрограмма парных коэффициентов корреляции / Dendrogram of pairwise correlation coefficients.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ширинкин О. Ю., Елохин В. А. Оценка воздействия электролизного и глиноземного производства на качество подземных вод и физические свойства грунтов оснований и фундаментов // Инженерно-геологические и геоэкологические проблемы городских агломераций. Сергеевские чтения: материалы годичной сессии Науч. совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (19–20 марта 2015 г.). М.: РУДН, 2015. Вып. 17. С. 391–396.
2. Елохин В. А., Ширинкин О. Ю. Оценка степени засоленности грунтов оснований и фундаментов зданий и сооружений на территории глиноземного производства // Изв. вузов. Горный журнал. 2015. № 5. С. 81–87.
3. Ширинкин О. Ю., Елохин В. А. Факторы деформаций оснований зданий и сооружений на территории глиноземного и электролизного производства // Изв. вузов. Горный журнал. 2015. № 7. С. 61–67.
4. Халафян А. А. Statistica 6. Статистический анализ данных. М.: Бинوم-Пресс, 2007. 512 с.

REFERENCES

1. Shirinkin O. Yu., Elokhin V. A. 2015, *Otsenka vozdeystviya elektroliznogo i glinozemnogo proizvodstva na kachestvo podzemnykh vod i fizicheskie svoystva gruntov osnovaniy i fundamentov* [Assessment of the impact of elec-

trollysis and alumina production on groundwater quality and physical properties of the soils of basements and foundations]. *Inzhenerno-geologicheskie i geoekologicheskie problemy gorodskikh aglomeratsiy. Sergeevskie chteniya: materialy godichnoy sessii Nauchnogo soveta RAN po problemam geoekologii, inzhenernoy geologii i gidrogeologii (19–20 marta 2015 goda)* [Engineering-geological and geo-ecological problems of urban agglomerations. Sergeev lectures: materials of annual session of Science Council of RAS on the problems of geoecology, geology and hydrogeology (19–20 March 2015)], Moscow, vol. 17, pp. 391–396.

2. Elokhin V. A., Shirinkin O. Yu. 2015, *Otsenka stepeni zasolenosti gruntov osnovaniy i fundamentov zdaniy i sooruzheniy na territorii glinozemnogo proizvodstva* [Assessment of soil salinity of basements and foundations of buildings and structures on the territory of alumina production]. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal* [News of the Higher Institutions. Mining Journal], no. 5, pp. 81–87.

3. Shirinkin O. Yu., Elokhin V. A. 2015, *Faktory deformatsiy osnovaniy zdaniy i sooruzheniy na territorii glinozemnogo i elektroliznogo proizvodstva* [Factors of deformations of buildings bases and structures on the territory of alumina and electrolysis production]. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal* [News of the Higher Institutions. Mining Journal], no. 7, pp. 61–67.

4. Khalafyan A. A. 2007, *Statistica 6. Statisticheskiy analiz dannykh* [Statistics 6. Statistical analysis of the data], Moscow, 512 p.

Олег Юрьевич Ширинкин,

ведущий гидрогеолог

shirinkin_ku@mail.ru

ООО НПФ "ГеоС"

Россия, Екатеринбург, ул. Основинская, 7

Елохин Владимир Аскольдович,

доктор геолого-минералогических наук, профессор

elokhin.v.a@mail.ru

Уральский государственный горный университет

Россия, Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30

Oleg Yur'evich Shirinkin,

leading hydrogeologist

shirinkin_ku@mail.ru

GeoS LLC

Ekaterinburg, Russia

Vladimir Askol'dovich Elokhin,

Dr, Professor

elokhin.v.a@mail.ru

Ural State Mining University

Ekaterinburg, Russia