

На правах рукописи



**БАДОВЕВ АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ**

**ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ  
ФОРМИРОВАНИЯ НАМЫВНЫХ ТЕХНОГЕННЫХ ГРУНТОВЫХ  
МАССИВОВ В УСЛОВИЯХ КРИОЛИТОЗОНЫ  
(на примере Норильского промышленного района)**

Специальность 25.00.08.

«Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Владикавказ, 2020

Работа выполнена в ФГБУН ФНЦ Владикавказский научный центр Российской академии наук

**Научный руководитель:**

**ЛОЛАЕВ АЛАН БАТРАЗОВИЧ**, доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты:**

**БОРТНИКОВА СВЕТАНА БОРИСОВНА**, доктор геолого-минералогических наук, профессор, ФГБУН Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск

**ГРИНЬ НАТАЛЬЯ НИКОЛАЕВНА**, кандидат геолого-минералогических наук, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск

Защита диссертации состоится 14 мая 2020 г. в 14<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 003.022.01 при ФГБУН Институте земной коры СО РАН по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ИЗК СО РАН и на сайте <http://www.crust.irk.ru/images/upload/newsfull185/2140.pdf>

Отзывы об автореферате в 2-х экземплярах, заверенные подписью и печатью учреждения, просим направлять по указанному адресу ученому секретарю диссертационного совета. Тел: (3952) 426133; e-mail: akulova@crust.irk.ru

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » марта 2020 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
к.г.-м.н.



В.В. Акулова

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность работы**

Технологии добычи и переработки полезных ископаемых постоянно совершенствуются, однако, несмотря на это, объем отходов горно-металлургического производства не уменьшается.

Горно-металлургические комбинаты и обогатительные фабрики ежегодно сбрасывают миллионы тонн отходов обогащения, для складирования которых требуются специальные хранилища (хвостохранилища, шламонакопители, гидроотвалы и т.д.), которые должны иметь не только максимальную емкость, но и удовлетворять условиям охраны окружающей среды.

В связи с этим, вопросы проектирования, оптимизации, строительства и безопасной эксплуатации накопителей отходов обогащения как опасных производственных объектов и источников воздействий на окружающую среду, в настоящее время имеют большую актуальность. Это связано с большим количеством аварий, необходимостью строительства новых накопителей отходов, а также плохим состоянием сооружений и прилегающих к ним территориях природной среды.

Особенно эта проблема актуальна в условиях криолитозоны, так как завершение процесса консолидации намытого слоя до начала промерзания является одним из условий обеспечения устойчивости сооружения. В связи с этим формирование намывных геотехнических массивов с учетом консолидационных характеристик хвостов является актуальной научной задачей.

**Цель работы** инженерно-геологическое обоснование формирования намывных геотехнических массивов в криолитозоне с учетом консолидационных свойств техногенных грунтов для повышения устойчивости.

**Идея работы:** повышение устойчивости намывных геотехнических массивов за счет учета консолидационных характеристик слагающих его грунтов.

**Методы исследования:** обобщение и анализ теории и практики, лабораторные и натурные исследования, физико-математическое моделирование с использованием методов сетевого планирования и математической статистики.

### **Научные положения, защищаемые в работе:**

1. Установлены закономерности формирования физико-механических свойств хвостов в намывных массивах, основные виды микроструктур и типы контактов между структурными элементами,

составлена классификация намывных грунтов, которая используется для прогноза технологической и экологической безопасности хвостохранилища

2. Формирование геотехнического массива происходит при оптимальном значении влажности 20%, а группы консолидационных характеристик намываемых грунтов, определенные при различных значениях влажности и плотности, однородны между собой, и различия между парами групп статистически незначимы.

3. Намыв геотехнического массива при отрицательных температурах прекращается за период, равный времени консолидации до наступления температуры  $-5^{\circ}\text{C}$ .

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

- Установлены закономерности формирования физико-механических свойств хвостов в намывных массивах, основные виды микроструктур и типы контактов между структурными элементами, составлена классификация намывных грунтов, которая используется для прогноза технологической и экологической безопасности хвостохранилища;

- Определены соотношения между максимальной плотностью и оптимальной влажностью хвостов в процессе консолидации твердой фракции при намыве геотехнического массива в условиях криолитозоны;

- Установлены корреляционные зависимости консолидационных характеристик намываемых хвостов при различных значениях влажности и плотности с использованием критериев Крускала-Уоллиса и Манна-Уитни;

- Выполнено математическое описание зависимости технологических параметров возведения геотехнического массива (времени заполнения участка намыва, высоты годового намыва, времени заполнения яруса участка намыва) от геометрических характеристик объекта и участка складирования, физико-механических свойств хвостов и климатических условий;

- Доказана необходимость учета консолидационных характеристик твердой фракции при возведении геотехнического массива с использованием сетевого планирования.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций** подтверждается обобщением и использованием большого объема исходных фактических данных, применением современных методов исследований, сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований с результатами опытно-промышленных работ (расхождение не более 5%) и положительной практической реализацией разработок на предприятии.

**Научное значение** состоит в инженерно-геологическом обосновании технологии формирования намывных геотехнических массивов в

криолитозоне с учетом консолидационных характеристик супесчаных грунтов.

**Практическое значение работы** заключается в том, что применение разработанной методики оптимизации параметров возведения намывного техногенного массива с учетом консолидационных характеристик слагающих грунтов, позволяет прогнозировать высоту годового намыва техногенного массива, оперативно осуществлять вариантное сравнение технологических схем возведения с учетом изменений исходных данных, давать прогнозную оценку сроков возведения и составлять сетевые графики производства работ.

Методика может быть использована горнорудными предприятиями, научно-исследовательскими и проектными организациями.

#### **Реализация результатов работы.**

Диссертация выполнена в соответствии с исполнением научно-исследовательских работ по темам, в которых автор принимал непосредственное участие в качестве исполнителя:

- «Исследования и разработка инновационных технологий комбинированной переработки и утилизации отходов предприятий цветной металлургии» в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007-2013 года», ГК №16.515.11.5027;

- «Развитие фундаментальных и прикладных исследований в области наук о Земле для мониторинга и изучения фанерозойского магматизма, современного состояния земной коры тектонически активных регионов Большого Кавказа, научного обеспечения прогнозирования, предупреждения и снижения ущерба от природных и техногенных катастроф, расширения минерально-сырьевой базы и неразрушающего природопользования» в рамках выполнения плана НИР в рамках государственного задания ВНИЦ РАН. Номер государственной регистрации - АААА-А19-119040190054-8.

Результаты исследований использованы при составлении проекта эксплуатации хвостохранилища «Лебяжье» Норильской обогатительной фабрики Заполярного филиала ПАО ГМК «Норильский Никель».

**Личный вклад соискателя** состоит в непосредственном его участии в получении исходных данных [3-6,8,13,19-20,22], анализе особенностей строительства и эксплуатации намывных техногенных массивов горнодобывающего и металлургического производства [10,14-18], исследовании физико-механических характеристик хвостов в лабораторных условиях и обработке экспериментальных данных [3,6,14-15,17-18,20,22-23], апробации результатов исследования [1,4,5,13,17-26], разработке методики оптимизации параметров намыва техногенных месторождений с учетом

времени консолидации техногенных грунтов [1,2,7,9,11,12,24], подготовке основных публикаций по работе, формулировке основных научных положений, выносимых на защиту, а также основных выводов и рекомендаций.

**Апробация работы.** Основные результаты исследований докладывались и получили положительную оценку на региональных, всероссийских и международных научно-технических конференциях и конгрессах: ежегодных научно-практических конференциях СКГМИ (ГТУ) (2011-2019); Строительно-промышленном форуме «Гостеприимная Осетия» (Владикавказ, 2011); Республиканской научно-технической конференции «Пути совершенствования качества строительства промышленных и гражданских зданий и инженерных сооружений» (Владикавказ, 2012); 2-nd International Conference “Geotechnics for Sustainable Development” GEOTEC (Hanoi, Vietnam, 2013); Всероссийской конференции «Геодинамика, вулканизм, сейсмичность и экзогенные геологические процессы природного и техногенного характера на Кавказе» (Владикавказ, 2014); 1-st International Conference on Natural Hazards&Infrastructure (Chania, Greece, 2016); XVIII Brazilian Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, "The Sustainable Future of Brazil goes through hour Minas" COBRAMSEG 2016 (Belo Horizonte, Brazil, 2016); 2-nd International Seminar “Numerical Analysis in Geotechnics” NAG2018 (Ho Chi Minh City, Vietnam, 2018); 1-ой Всероссийской научно-практической конференции «Современные научно-технические и социально-гуманитарные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации» (Владикавказ, 2019); 2-nd Conference of the Arabian Journal of Geosciences (CAJG) (Sousse, Tunisia, 2019); 3-rd International Conference on Information Technology in Geo-Engineering (ICITG2019) (Guimaraes, Portugal, 2019); 4-th International Conference on “Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development” GEOTEC (Hanoi, Vietnam, 2019).

**Публикации.** По теме диссертации опубликованы 26 работ, в том числе 4 в изданиях, включенных в международные базы цитирования Scopus, 4 в изданиях, рекомендованных ВАК и приравненных к ним, а также 1 патент РФ.

**Объем и структура работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав и заключения, содержит 29 рисунков, 23 таблицы. Список использованных источников включает 161 отечественных и зарубежных наименования.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Технологии возведения горно-технических сооружений, технологическим схемам эксплуатации и проектирования намывных накопителей техногенного сырья, требованиям к обеспечению их промышленной и экологической безопасности посвящены многочисленные работы специализированных организаций (НИИ ВОДГЕО, ГИДРОПРОЕКТ, ГУП ВИОГЕМ, ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, АОЗТ «Механобр инжиниринг», и др.), а также труды академика РАН К.Н. Трубецкого, члена-корреспондента РАН Д.Р. Каплунова, ученых И.И. Айнбиндера, С.В. Алексева, Е.Б. Близняка, Г.К. Бондарика, В.В. Бутюгина, А.М. Гальперина, Г.И. Кузнецова, Е.В. Кузьмина, А.Б. Лолаева, Г.Г. Ломоносова, В.П. Недриги, А.А. Петросова, А.М. Плюсины, Л.Н. Рассказова, Н.Н. Розанова, Т.Г.Рященко, И.Н. Савича, А.В. Хныкина, М.В. Щекиной, Л.А. Ярг и др.

Однако, несмотря на наличие всевозможных рекомендаций нормативных документов, многочисленных методик расчетов и соответствующего программного обеспечения (НИИ ВОДГЕО, Гидропроект, ГУП ВИОГЕМ, ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, МГСУ, НИТУ «МИСиС», УГГУ, АО «ВНИПИпромтехнологии» и др.), проблема оптимизации технологии намыва, обеспечивающая устойчивость ограждающих дамб и плотин не теряет своей актуальности особенно в условиях криолитозоны.

В работе содержатся сведения о климатических условиях района, данные о составе, распространении, температурах, строении многолетнемерзлых и талых пород, о гидрогеологических особенностях, а также об экзогенных геологических процессах и явлениях

Норильский промышленный район (НПР) характеризуется экстремальным климатом (среднегодовая температура воздуха – 9,8°C), сильными ветрами, широким распространением мерзлых и талых грунтов, развитием геологических процессов. Среди техногенных процессов распространены: оттаивание мерзлых грунтов в основаниях инженерных сооружений; изменение режимов стока, условий питания и химического состава поверхностных и подземных вод; уничтожение почвенно-растительного покрова и т.д.

Хвостохранилище «Лебяжье» ПАО ЗФ «Норильский никель» относится к сооружениям равнинного типа и эксплуатируется с октября 1983 года.

На сегодняшний день хвостохранилище «Лебяжье» представлено двумя полями. В соответствии с существующим проектом эксплуатации намыв дамбы осуществляется равномерно, чередуясь на первом и втором полях. При этом следует отметить, что примеров строительства дамб для водоемов с такой высокой концентрацией солей в условиях Заполярья в мировой практике нет.

К опасным техногенным процессам в зоне влияния хвостохранилища относятся: изменение природного рельефа; оттаивание мерзлых грунтов; изменение режимов стока, условий питания и химического состава поверхностных и подземных вод; уничтожение почвенно-растительного покрова, формирование техногенного рельефа, нарушение температурного режима грунтов, загрязнение поверхностных вод, гибель растительности и др.

Тело дамбы имеет неоднородное строение, обусловленное переслаиванием хвостов различного состава, строения и свойств, линз и прослоев льда мощностью от 0,05 до 5,0 м. Хвосты характеризуются широким разбросом значений физико-механических свойств. Отдельные разновидности имеют аномально высокие углы естественного откоса (до 22 градусов в сухом состоянии и до 16 - под водой), а значения удельного сцепления и угла внутреннего трения не коррелируются с влажностью и плотностью.

Результаты исследований показали, что техногенные грунты - хвосты обогащения Норильских месторождений имеют характерные особенности строения, состава и свойств.

В лабораторных условиях проведены исследования техногенных грунтов – хвостов по методической схеме, разработанной д.г.-м.н. Т.Г. Рященко (Институт земной коры СО РАН), и включающей определение комплекса показателей, которые разделены на четыре группы: структурную (характеризующую структурные элементы, тип структурных связей и типы структур), химическую (показатели химического состава и физико-химических свойств), физическую (показатели физического состояния и свойств) и механическую (показатели деформационных и прочностных свойств).

Гранулометрический анализ выполнялся пипеточным методом тремя способами: микроагрегатным, стандартным и дисперсным. Его результаты использовались при расчетах коэффициентов микроагрегатности, по которым определялись степень агрегированности грунтов и размеры их агрегатов и частиц. Эксперименты и расчеты позволили установить особенности микростроения хвостов, типы микроструктур и структурных моделей грунтов (Таблица 1).

Таблица 1 Типы микроструктур и структурные модели грунтов

Тип микроструктур	Тип модели по размеру преобладающих элементов	Тип структурной модели (G, %)
Скелетный	Тонко-мелкопесчаная [ $A^2+M^2$ ]	Элементарная (92,5)
Скелетный	Средне-крупнопесчаная [ $A^1+M^1$ ]	Элементарная (84,8)
Скелетный	Тонко-мелкопесчаная [ $A^2+M^2$ ]	Элементарная (93,5)

Проведенные исследования физико-механических свойств намытых хвостов методом «структурных диаграмм» позволили установить следующее: грунты агрегированы, степень агрегатизации высокая, зафиксированы крупнопылеватые, мелкопесчаные и мелкопылеватые агрегаты, сформированные за счет мобилизации мелкоглинистых фракций; основная масса пылеватых частиц является первичной. Структурные связи между частицами и агрегатами относятся к коагуляционному или переходному типу. Внутриагрегатные связи обусловлены присутствием водорастворимых солей и глинистых минералов. Грунты обладают средней физико-химической активностью (емкость катионного обмена 11-23 мг-экв); имеют слабокислую реакцию среды (6,7-6,9) (Таблица 2).

Таблица 2 Показатели физических и физико-химических свойств грунтов

№ пробы	$\rho_s$	$W_L$	$W_P$	$I_p$	$V$	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$D_j$	$E_{об}$
ПК-104	2,61	32,1	27,9	4,2	2,5	19,2	15,8	7,2	11,0
ПК-101	2,61	31,8	28,1	3,7	2,0	21,3	15,1	5,5	15,4
ПК-98	2,63	32,4	27,2	5,2	2,0	19,6	14,2	2,3	13,0

Примечание:  $\rho_s$  – плотность минеральной части грунта, г/см<sup>3</sup>;  $W_L$ ,  $W_P$ ,  $I_p$  – верхний, нижний пределы пластичности, число пластичности, %;  $V$  – седиментационный объем, см<sup>3</sup>;  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  – угол естественного откоса на воздухе и под водой, град.;  $D_j$  – величина изменения угла, град.;  $E_{об}$  – емкость катионного обмена грунта, мг-экв на 100 г вещества.

Кроме того, хвосты характеризуются слабой пластичностью (число пластичности не превышает 5,2%) и различной степенью гидрофильности. Хвосты, проявляющие пластичные свойства и характеризующиеся набуханием, имеют минимальные значения фильтрационных параметров.

Коэффициент фильтрации хвостов закономерно снижается при переходе от средне-крупнопесчаной структурной модели грунта к грубоглинистой.

Песчано-пылеватые разновидности хвостов относятся к группе набухающих грунтов (5,2-7,5 %); величина начальной влажности и плотности грунтов на степень набухания влияния не оказывает. Объемная усадка этих образцов не превышает 4%. Пылевато-песчаные хвосты, не обладающие пластическими свойствами, не проявляют и деформаций набухания.

Показатели прочности определялись на специально приготовленных образцах с влажностью, изменявшейся в диапазоне от 2 до 40 %. Подобный влажностной режим обусловлен небольшой разницей (5,2 %) между пределами пластичности и текучести; необходимостью оценки прочности при заниженной влажности, которая соответствует влажности грунтов в период отдыха пляжа.

Определение параметров прочности грунтов и оценка устойчивости намывных массивов позволили установить следующие **специфические свойства** хвостов. Образцы характеризуются очень высоким коэффициентом пористости (0,84-1,64), но по результатам быстрого сдвига имеют относительно высокие значения прочности ( $C = 0,065-0,085$  МПа;  $\varphi = 17-22^\circ$ ). При увеличении влажности сцепление уменьшается, угол внутреннего трения также уменьшается или остается без изменений. Длительная прочность грунтов при тех же значениях влажности (10,1-36,7%) находится в пределах 0,45 – 0,80 МПа, угол внутреннего трения – 14-29°.

Максимальные коэффициенты сжимаемости при нагрузке 0,1 МПа составляют 0,22-0,60 МПа<sup>-1</sup>, т.е. хвосты относятся к группе сильно сжимаемых разновидностей

Анализ полученных результатов позволил установить, что при влажности 16,0-22,0% сцепление составляет 0,055-0,085 МПа. Резкое падение прочности наблюдается только при значительном (на 6-8%) превышении предела текучести грунтов: при влажности 38,0-40,0% оно составляет 0,018-0,028 МПа.

В результате сформировано первое защищаемое положение.

**Защищаемое положение № 1. Установлены закономерности формирования физико-механических свойств хвостов в намывных массивах, основные виды микроструктур и типы контактов между структурными элементами, составлена классификация намывных грунтов, которая используется для прогноза технологической и экологической безопасности хвостохранилища.**

Методика определения оптимального значения влажности намытого слоя формируемого геотехнического массива заключается в моделировании процесса консолидации в реальности и получении значения влажности, при которой произошла консолидация, массив достиг максимальной плотности и еще не начался процесс пыления или выветривания основного слоя.

Для этого был рассмотрен метод стандартного уплотнения, который заключается в установлении зависимости плотности сухого грунта от его влажности при уплотнении образцов грунта и последовательным увеличением его влажности по ГОСТ на стандартном приборе уплотнения грунтов.

Значение оптимальной влажности было также определено вторым способом путем моделирования процесса заполнения пор водой для твердой фракции. При последовательном увеличении влажности  $w$  снизу-вверх происходит заполнение пор водой и, соответственно, увеличивается плотность грунта. Во время заполнения пор водой положение верхней границы хвостов в приборе не меняется.

При достижении критического значения влажности на поверхности грунта появляется вода, а твердая фракция в этот момент имеет максимальную плотность, так как все поры заполнены водой. При дальнейшем увеличении количества воды происходит уменьшение плотности.

В качестве контроля результатов, полученных по представленным способам, значение максимальной плотности было также найдено расчетным путем.

Результаты представлены на рисунке 1. Совпадение трех полученных точек указывает на то, что все подходы достоверны.

Экспериментальные, теоретические и практические данные, представленные на рисунке 1, показывают, что намыв слоя техногенных грунтов должен заканчиваться при достижении твердой фракцией оптимальной влажности 20%. После этого можно производить намыв следующего слоя, так как это состояние соответствует наиболее плотной укладке частиц грунта примерно одного размера, когда еще все поры заполнены жидкостью - они укладываются под действием собственного веса наиболее плотно.

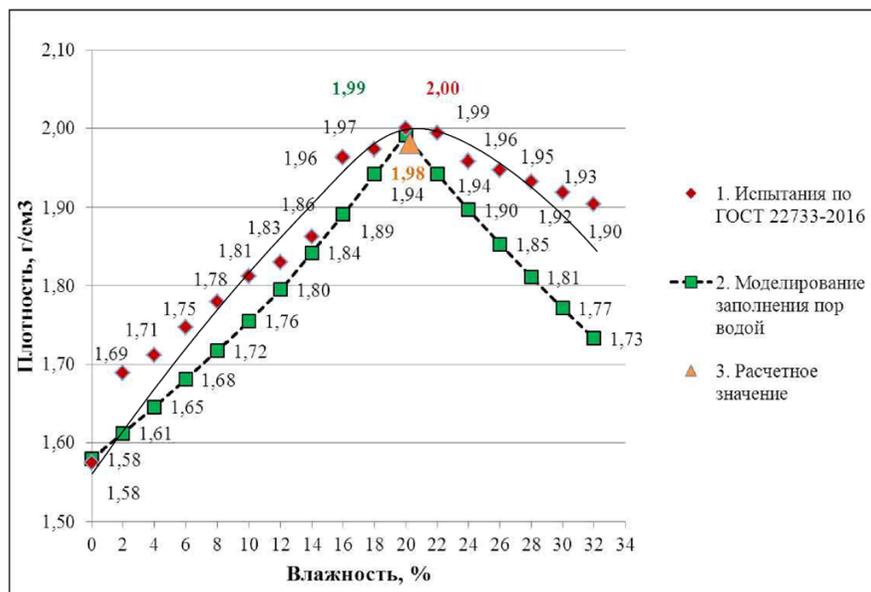


Рисунок 1. Зависимость плотности намывных грунтов от их влажности

Для обеспечения устойчивости сооружения необходимо установить и учитывать консолидационные характеристики хвостов в процессе намыва.

Как известно с учетом характера процессов, вызывающих уплотнение водонасыщенных грунтов в различные периоды времени, процесс консолидации условно разграничивают на две фазы; первичную или фильтрационную и вторичную, обусловленную ползучестью скелета грунта.

На первом этапе испытаний были сформированы 15 серий образцов при диапазоне влажности от 4 до 32 % и соответствующей плотности.

Следует отметить, что по результатам определения влажности хвостов на границе текучести равной 32,4% и влажности на границе раскатывания – 27,2% (индекс пластичности  $I_p=5,2$ ) было установлено, что по своим свойствам они наиболее близки к супесям. Физические свойства исследованных грунтов представлены в таблице 3.

Таблица 3. Физические свойства грунтов

Тип	№ опыта	Влажность W, %	Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Плотность частиц грунта $\rho_s$ , г/см <sup>3</sup>	Коэффициент пористости e	Число пластичности	Тип грунта по числу пластичности	Показатель текучести $I_L$	Равновидность по показателю текучести
Хвосты "Лебяжье"	1	4	1,05	2,63	1,60	5,2	Супесь	-4,46	Твердый
	2	6	1,01		1,76			-4,08	Твердый
	3	8	1,09		1,61			-3,69	Твердый
	4	10	1,12		1,58			-3,31	Твердый
	5	12	1,16		1,54			-2,92	Твердый
	6	14	1,18		1,54			-2,54	Твердый
	7	16	1,12		1,72			-2,15	Твердый
	8	18	1,15		1,70			-1,77	Твердый
	9	20	1,34		1,36			-1,38	Твердый
	10	22	1,3		1,47			-1,00	Твердый
	11	24	1,44		1,26			-0,62	Твердый
	12	26	1,51		1,19			-0,23	Твердый
	13	28	1,94		0,74			0,15	Пластичный
	14	30	1,87		0,83			0,54	Пластичный
	15	32	1,87		0,86			0,92	Пластичный

Далее были проведены компрессионные испытания с целью установления консолидационных характеристик хвостов.

Результаты компрессионных испытаний представлены на рисунке 2. Каждый график представляет собой отдельную группу характеристик со своими свойствами, однако все они являются однородными.

Консолидационные кривые (Рисунок 2) показывают, что поведение хвостов при разной влажности и плотности остается неизменным. Это

свидетельствует о том, что консолидационные характеристики возможно определять для любых сочетаний влажности и плотности хвостов в указанных пределах, что значительно сократит трудоемкость.

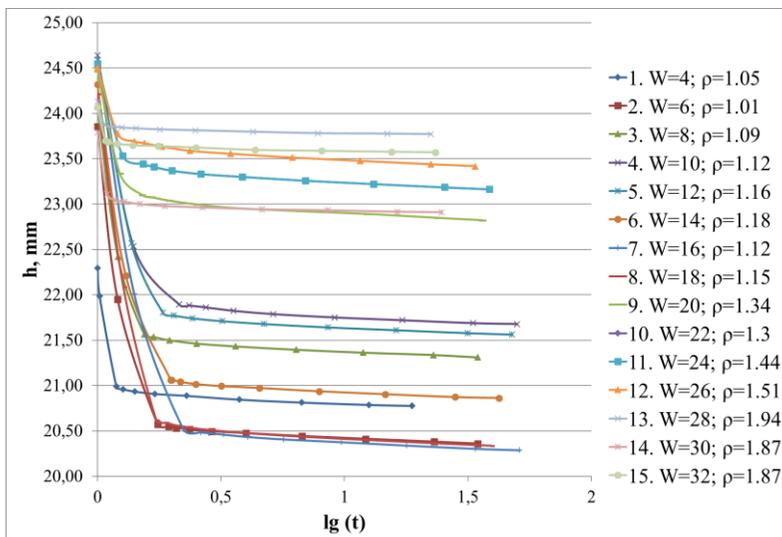


Рисунок 2. Консолидационные кривые образцов хвостов с заданной влажностью и плотностью

Для оценки различий одновременно между тремя, четырьмя и т.д. выборками был использован критерий Крускала-Уоллиса. Он позволяет установить, что уровень признака не изменяется при переходе от группы к группе.

Значение  $H_{эмн}$  определялось по формуле:

$$H_{эмн} = \left( \frac{12}{N \cdot (N + 1)} \cdot \frac{R_i^2}{n} \right) - 3(N + 1) \quad (1)$$

где  $N$  – общая сумма рангов;  
 $n$  – количество наблюдений в каждой группе;  
 $R$  – суммы рангов по каждой группе.

Сравнивалось полученное эмпирическое значение  $H_{эмн}=14,97$  с критическим  $H_{кр}$  при помощи таблицы критических значений критерия  $\chi^2$  для уровней статистической значимости  $p=0,05$  и  $p=0,01$ :

$$\chi_{кр}^2 = \begin{cases} 23,68 (p = 0,05) \\ 29,14 (p = 0,01) \end{cases}$$

В результате расчетов было установлено, что эмпирическое значение меньше критического  $H_{эмп} < H_{кр}$ , и, следовательно, подтверждено, что данные группы не различаются между собой.

Далее с помощью критерия Манна-Уитни оценивались различия между двумя выборками.

Значение  $U_{эмп}$  определялось по формуле:

$$U_{эмп} = n_1 \cdot n_2 + \frac{n_x \cdot (n_x + 1)}{2} - T_x \quad (2)$$

где  $n_1$  – количество испытуемых в выборке 1;  
 $n_2$  – количество испытуемых в выборке 2;  
 $T_x$  – большая из двух ранговых сумм;  
 $n_x$  – количество испытуемых в группе с большей суммой рангов.

Определялись критические значения критерия  $U$  Манна-Уитни для уровней статистической значимости  $p < 0,05$  и  $p < 0,01$

$$U_{кр} = \begin{cases} 0 (p = 0,05) \\ - (p = 0,01) \end{cases}$$

Аналогичные расчеты были проведены с другими парами групп.

Так как эмпирическое значение здесь выше критического  $U_{эмп} > U_{кр}$ , то из этого следует, что различия между данными парами групп статистически незначимы.

В результате сформулировано второе защищаемое положение.

**Защищаемое положение № 2. Формирование геотехнического массива происходит при оптимальном значении влажности 20%, а группы консолидационных характеристик намываемых грунтов, определенные при различных значениях влажности и плотности, однородны между собой, и различия между парами групп статистически незначимы.**

Параметры формирования геотехнического массива-хвостохранилища исследованы с помощью физико-математического моделирования. Комплекс модельных исследований включил в себя: физическое моделирование способов намыва хвостохранилища; исследование физико-механических свойств хвостов в режиме намыва и последующей консолидации; момент достижения намывными хвостами влажности в 20%.

Консолидационные характеристики хвостов по результатам испытаний были получены методом Казагранде.

Для расчета времени консолидации по изменению геометрических характеристик образцов было получено уравнение.

$$t = \frac{F(h_k + s)}{h_k C_v} = \frac{Fh_k + Fs}{h_k C_v} = \frac{Fh_k}{h_k C_v} + \frac{Fs}{h_k C_v} = \frac{F}{C_v} \left( 1 + \frac{s}{h_k} \right) = \frac{F}{C_v} \left( 1 + \frac{s}{h-s} \right) = \frac{F}{C_v} \left( \frac{h-s}{h-s} + \frac{s}{h-s} \right)$$

Отсюда получаем:

$$t = \frac{F}{C_v} \times \frac{h}{h-s} \quad (6)$$

где  $t$  - время консолидации, мин;  $F$  - площадь сечения образца, см<sup>2</sup>;  $C_v$  - коэффициент консолидации, см<sup>2</sup>/мин;  $h$  - начальная высота слоя, см;  $h_k$  - конечная высота слоя, см;  $s$  - перемещение, см

В результате для исследованных техногенных супесчаных грунтов были получены средние значения коэффициентов консолидации и значения времени консолидации по уравнению (6).

С целью обоснования гипотезы о возможности определения консолидационных характеристик для любых сочетаний влажности и плотности хвостов в указанных пределах было выполнено описание математической зависимости изучаемого параметра  $y$  от факторов по экспериментальным данным, с построением регрессионной модели вида  $y = F(x_1, x_2, \dots, x_k)$ . Для этого использовано уравнение регрессии в виде многочленов (полинома), расположенных по восходящим степеням изучаемого фактора и одновременно линейных ко всем коэффициентам:

$$y = f(x) = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_k x_k \quad (7)$$

где  $b_0, b_1, b_2, \dots, b_k$  - коэффициенты, подлежащие определению.

В итоге получено уравнение для определения времени консолидации при известных проектных величинах влажности и плотности:

$$t = -17,542 - 0,556 \cdot W + 25,141 \cdot \rho \quad (8)$$

Для количественной проверки гипотезы об адекватности регрессионной модели использовался  $F$ -критерий (критерий Фишера), который был рассчитан с помощью Microsoft Excel (пакет анализа данных).

В результате  $F$ -теста получена величина  $F_{расч.} = 90,61$  для времени консолидации хвостов при определенной влажности и плотности. Так как это значение больше табличного  $F_{табл.}(0,05; 2; 42) = 3,22$ , то можно утверждать, что регрессионная модель значима и может быть использована для предсказания значений зависимой переменной  $y$  при всех значениях независимых переменных  $x_1$  и  $x_2$  в пределах, наблюдавшихся при эксперименте значений последней.

Комплекс экспериментальных исследований и полученные результаты физических и прочностных свойств грунта подтвердили правомерность теоретических положений и позволили применить методику формирования

геотехнического массива с учетом консолидационных свойств грунтов к крупному производственному объекту - дамбе хвостохранилища «Лебяжье» ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель».

С целью определения параметров возведения накопителя отходов предприятия осуществлена постановка задачи в виде систем уравнений (3), (4):

$$\begin{cases} x_{11} + x_{12} + \dots + x_{1n} = a_1 \\ x_{21} + x_{22} + \dots + x_{2n} = a_2 \\ \dots \\ x_{31} + x_{32} + \dots + x_{3m} = a_m \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} x_{11} + x_{21} + \dots + x_{m1} = b_1 \\ x_{12} + x_{22} + \dots + x_{m2} = b_2 \\ \dots \\ x_{1n} + x_{2n} + \dots + x_{mn} = b_n \end{cases} \quad (4)$$

где  $a_i$  – объем хвостов из отдельных источников поступления;  $b_i$  – объем хвостов, уложенных (намытых) на отдельные участки – секторы намыва.

Учитывая требования экологической безопасности, подразумевающие складирование в хвостохранилище всего объема вырабатываемых отходов (хвостов)  $\sum_{i=1}^n a_i = \sum_{j=1}^m b_j$ , задача является закрытой или обычной моделью.

Целевой функцией задачи является время, и она представлена в виде:

$$T = \sum_{i=1}^n \frac{S_{1i} \cdot h_1}{q} + \sum_{k=1}^n \frac{S_{2k} \cdot h_2}{q} \rightarrow 195 \quad (5)$$

где  $i, k$  – количество секторов соответственно первого поля и второго поля;  $S_{1i}, S_{2k}$  – соответственно площадь  $i$ -го сектора I поля и площадь  $k$ -го сектора II поля накопителя отходов;  $h_1, h_2$  – соответственно высота намыва на I поле и на II поле;  $q$  – дневной объем поступающих на складирование отходов; 195 - продолжительность намыва на пляж хвостохранилища в днях, определяемая из климатических условий региона, т.к. в соответствии с нормативными документами намыв может осуществляться при температуре не ниже  $-5^\circ\text{C}$ .

На рисунке 3 представлена разбивка пляжа на секторы для определения объема намываемых хвостов.

Каждый сектор представляет собой участок пляжа геотехнического массива, ширина которого равна фронту намыва, а длина – расстояния между ограждающей дамбой и дамбой вторичного обвалования. Далее определялись площади секторов по результатам тахеометрической съемки объекта (Таблица 4).

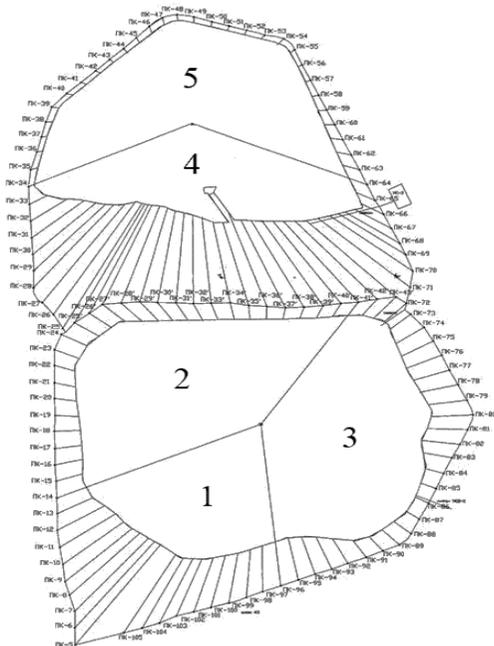


Рисунок 3. Разбивка пляжа на секторы

Процесс намыва хвостов в хвостохранилище может быть разделен на два этапа по времени: намыв и консолидация.

Намыв пляжа из хвостов производится перемещением участка намыва по ходу движения пульпы в распределительном пульповоде, проложенным по гребню ограждающей дамбы.

Таблица 4. Исходные параметры намыва

№ поля	№ сектора	Площадь участков $S_i$ , $m^2$	Принятая высота намыва $H_{пр}$ , м	Объем участков $V_i$ , $m^3$	Расстояние между пикетами, м	Принятая высота яруса намыва $H_{пр}$ , м	Принятое количество ярусов намыва $N_{яру}$ , шт	Объем намыва одного яруса $V_{яру}$ , $m^3$
I поле	1	634436,45	1	634436,45	1800	0,5	2	317218,23
	2	305490,65	1	305490,65	2700		2	152745,33
	3	426747,19	1	426747,19	2700		2	213373,59
II поле	4	728976,26	2	1457952,52	3200		4	364488,13
	5	689924,71	2	1379849,42	3000		4	344962,35

По исходным параметрам были рассчитаны время намыва полного яруса и время консолидации одного полного яруса (12 суток) по формуле (8) при достижении ими влажности 20% и плотности 1,65 г/см<sup>3</sup> (Таблица 5).

В этом случае при последовательном намыве секторов продолжительность намыва составит:

$$T=(H1+K1)*2+(H2+K2)*2+(H3+K3)*2+(H4+K4)*4+(H5+K5)*4 = \\ = (14+12)*2+(7+12)*2+(9+12)*2+(16+12)*4+(15+16)*4=368 \text{ дней,}$$

где  $H$  – намыв хвостов,  $K$  – консолидация хвостов, \*1-5 – номера секторов.

Данное значение не удовлетворяет условию в 195 дней.

Учитывая ограниченность сроков и большой объем намываемой твердой фракции необходимо воспользоваться сетевым планированием, являющимся эффективным методом оптимизации с обязательным учетом консолидационных характеристик, где также важнейшую играет роль время.

Таблица 5. Время намыва и консолидации хвостов

Диаметр выпусков $d$ , м	Площадь поперечного сечения выпусков, м <sup>2</sup>	Площадь поперечного сечения магистралей $d_m - \text{Ø1}$ м, м <sup>2</sup>	Объем хвостов за год $V$ , м <sup>3</sup>	Общий объем пульпы за сутки намыва, м <sup>3</sup>	Объем пульпы из 1 выпуска за сутки намыва, м <sup>3</sup>	Объем пульпы намываемой на участок за сутки $V_{\text{в-сут}}$ , м <sup>3</sup>	Время намыва одного полного яруса $t_{\text{р}}$ сут	Требуемая влажность $W$ , %	Требуемая плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Время консолидации одного полного яруса $t_{\text{с}}$ сут
0,1	0,00785	0,785	8408952,4	23972	239,72	23972	14	20	1,65	12
						23972	7			12
						23972	9			12
						23972	16			12
						23972	15			12

На основании полученных результатов был построен сетевой график намыва обеих полей хвостохранилища «Лебяжье» (Рисунок 4).

В результате построения и расчета сетевого графика было определено, что продолжительность критического пути составляет 189 дней, что меньше 195 дней. Это позволяет сделать вывод о том, что весь объем намываемых хвостов будет уложен в требуемые сроки.

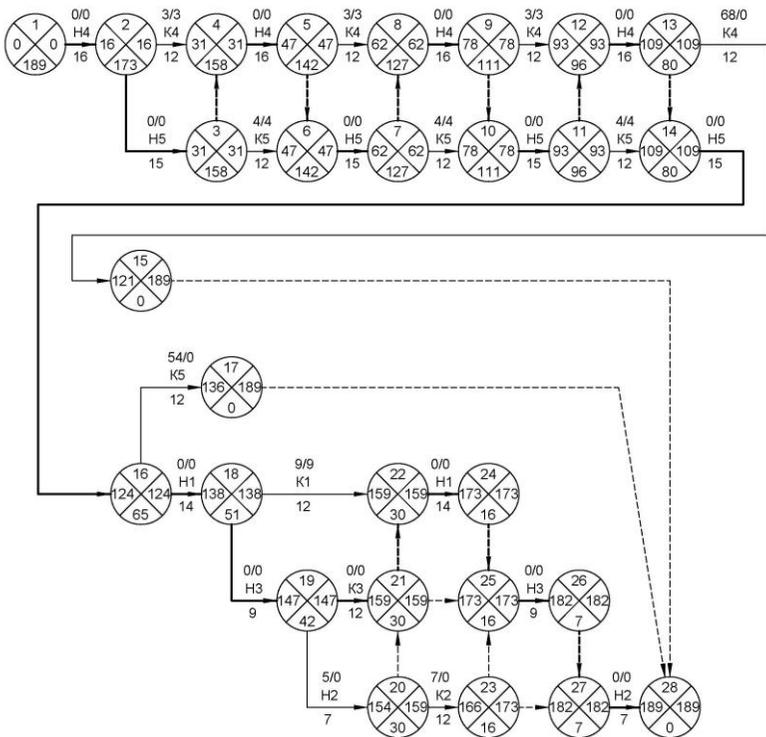


Рисунок 4. Сетевой график намыва хвостохранилища.

В результате сформулировано третье защищаемое положение.

**Защищаемое положение № 3. Намыв геотехнического массива при отрицательных температурах прекращается за период, равный времени консолидации намывтого слоя до наступления температуры  $-5^{\circ}\text{C}$ .**

### Заключение

В диссертации, представляющей собой научно-квалификационную работу, решена актуальная научно-техническая задача инженерно-геологического обоснования параметров намыва геотехнических массивов с учетом консолидационных характеристик техногенных грунтов (хвостов) методом сетевого планирования, что имеет важное народнохозяйственное значение и позволяет обеспечить устойчивость массива, уменьшить затраты на возведение и эксплуатацию такого рода объектов.

**Основные научные и практические результаты, выводы и рекомендации:**

1. Установлено, что специфика содержания хвостохранилищ на Крайнем Севере определяется сложными природно-климатическими условиями, что в свою очередь вызывает необходимость разработки оригинальных технологий их эксплуатации и методов исследований, обеспечивающих промышленную и экологическую безопасность накопителей и окружающей природной среды.

2. Установлены закономерности формирования физико-механических свойств хвостов в намывных массивах, основные виды микроструктур и типы контактов между структурными элементами, составлена классификация намывных грунтов, которая используется для прогноза технологической и экологической безопасности хвостохранилища

3. Доказано, что физическая модель процесса консолидации твердой фракции при намыве геотехнического массива в условиях криолитозоны регламентирует формирование массива при оптимальном значении влажности 20%.

4. Обосновано, что группы консолидационных характеристик намываемой твердой фракции, определенные при различных значениях влажности и плотности однородны между собой, а различия между парами групп статистически незначимы, что определяет технологический регламент формирования массива.

5. Доказано, что, намыв геотехнического массива при отрицательных температурах необходимо прекращать за период, равный времени консолидации до наступления температуры  $-5^{\circ}\text{C}$ .

6. Предлагаемая методика оптимизации параметров формирования намывных геотехнических массивов является основой уменьшения затрат на возведение и эксплуатацию данных объектов, что и было подтверждено по результатам исследований намыва ограждающей дамбы хвостохранилища «Лебяжье» ПАО ЗФ «ГМК «Норильский никель».

7. Установленные закономерности физико-механических свойств хвостов и методика формирования намывных геотехнических массивов могут быть использованы на горных предприятиях России и других стран, научно-исследовательскими и проектными организациями, а также в ВУЗах.

**Основное содержание диссертационной работы отражено в следующих публикациях:**

**В изданиях, входящих в международные базы цитирования Scopus:**

1. Лолаев А.Б., Хулелидзе К.К., Бутюгин В.В., Бадоев А.С. Сетевое планирование для оптимизации технологических параметров процесса намыва хвостохранилищ // Устойчивое развитие горных территорий – Том 9, №3 (33). – Владикавказ. – 2017. – С. 281 – 286.

2. Лолаев А.Б., Бадтиев А.Б., Бутюгин В.В., Бадоев А.С. Определение консолидационных характеристик хвостов намывных геотехнических

массивов // Устойчивое развитие горных территорий – Том 9, №4 (34). – Владикавказ – 2017. – С. 355 – 361.

3. Lolaev A.B., Oganesyanyan A.Kh., Badoev A.S. et al. Methodology of the estimated monitoring for the tailings dam stability // Proc. of 3-rd Intern. Conf. on Information Technology in Geo-Engineering (ICITG2019). Guimaraes, Portugal, 2019. – Pp. 644-653.

4. Lolaev A.B., Oganesyanyan A.Kh., Badoev A.S., Oganesyanyan E.Kh. Geotechnical modelling of technological parameters of the tailing dam alluvium // Proceedings of 4-th International Conference on “Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development” GEOTEC (Hanoi, Vietnam, 2019) – Pp. 1159-1165.

#### **В изданиях, рекомендованных ВАК, и приравненных к ним:**

5. Лолаев А.Б., Бадоев А.С., Оганесян Э.Х. Определение времени консолидации хвостов намывных хвостохранилищ // Успехи современной науки – № 1, Том 7. – Белгород. – 2017. – С. 153 – 158.

6. Лолаев А.Б., Бадоев А.С., Оганесян Э.Х. Применение сетевых графиков для оптимизации намыва хвостохранилищ // Успехи современной науки и образования – № 3, Том 6. – Белгород. – 2017. – С. 220 – 224.

7. Лолаев А.Б., Оганесян А.Х., Бадоев А.С., Оганесян Э.Х. К вопросу установления оптимальных технологических параметров ограждающей дамбы при формировании техногенных месторождений // Сборник научных работ преподавателей и аспирантов СКГМИ (ГТУ): Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – №6 (специальный выпуск 25). – М.: Изд-во Горная книга, 2018 – С. 50 – 58.

8. Лолаев А.Б., Оганесян А.Х., Бадоев А.С., Оганесян Э.Х. Сетевое планирование при оптимизации технологических параметров намыва хвостохранилищ в криолитозоне // Сборник научных работ преподавателей и аспирантов СКГМИ (ГТУ): Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – №6 (специальный выпуск 25). – М.: Изд-во Горная книга, 2018. – С. 125 – 133.

#### **Патенты:**

9. Лолаев А.Б., Оганесян А.Х., Бадоев А.С., Оганесян Э.Х. Способ возведения намывной ограждающей дамбы // Патент РФ №2654718. – 2017.

#### **В других изданиях:**

10. Хадонов З.М., Хадонова Т.К., Бадоев А.С. Управление материальными потоками в строительстве на основе логистического подхода // Сб. научных трудов СОО АН ВШ РФ. – Владикавказ, 2011. – С. 125 – 128.

11. Бадоев А.С., Хадонов З.М. Логистический подход в строительном производстве // Сб. материалов Республиканской научно-технической конференции СКГМИ (ГТУ) «Пути совершенствования качества

строительства промышленных и гражданских зданий и инженерных сооружений». – Изд-во «Терек». – Владикавказ, 2012. – С.32 – 36.

12. Akopov A.P., Tuskaeva Z.R., Badoev A.S. Logistic Approach to the Optimization of the Inwash Technology of the Cascade Tailing Dump Levee in Permafrost Region // Proceedings of 2-nd International Conference "Geotechnics for Sustainable Development", Hanoi, VIETNAM. 2013. Pp.773 – 777.

13. Лолаев А.Б., Акопов А.П., Бадоев А.С. Алгоритм решения задачи по определению параметров возведения намывных накопителей отходов горнодобывающей промышленности // Тезисы Всероссийской конференции «Геодинамика, вулканизм, сейсмичность и экзогенные геологические процессы природного и техногенного характера на Кавказе» – ВНЦ РАН – Владикавказ, 2014. – С.31 – 32.

14. Лолаев А.Б., Арутюнова А.В., Бадоев А.С. и др. Изучение физико-химических свойств лежалых хвостов методами выделения мономинеральных фракций // Материалы Всероссийской научной конференции «Геодинамика, вулканизм, сейсмичность и экзогенные геологические процессы природного и техногенного характера на Кавказе» – ВНЦ РАН. – Владикавказ, 2014. – С. 33 – 34.

15. Лолаев А.Б., Акопов А.П., Бадоев А.С. Алгоритм решения задачи по определению параметров возведения намывных накопителей отходов горнодобывающей промышленности // Материалы Всероссийской научной конференции «Геодинамика, вулканизм, сейсмичность и экзогенные геологические процессы природного и техногенного характера на Кавказе» – ВНЦ РАН. – Владикавказ, 2015. – С. 271 – 278.

16. Лолаев А.Б., Арутюнова А.В., Бадоев А.С. и др. Изучение физико-химических свойств лежалых хвостов методами выделения мономинеральных фракций // Материалы Всероссийской научной конференции "Геодинамика, вулканизм, сейсмичность и экзогенные геологические процессы природного и техногенного характера на Кавказе» – ВНЦ РАН. – Владикавказ, 2015. – С. 311 – 317.

17. Лолаев А.Б., Арутюнова А.В., Бадоев А.С., Дзедобоев С.О. Изучение физико-химических свойств лежалых хвостов Тырнаузского горно-металлургического комбината (Кабардино-Балкарская республика) методами выделения мономинеральных фракций // Труды СКГМИ (ГТУ) №22. – Владикавказ, 2015. – С. 64 – 71.

18. Dzeboev S.O., Lolaev A.B., Badoev A.S. et al. Determination of the Tails Consolidation Parameters of Alluvial Tailings Dump in Permafrost Region // Proc. of 1st Intern. Conf. on Natural hazards & Infrastructure Chania, GREECE, - 2016. (CD-Edition).

19. Лолаев А.Б., Бадоев А.С., Арутюнова А.В., Оганесян Э.Х. Определение времени консолидации хвостов намывных накопителей

отходов предприятий горно-металлургической промышленности // Сб. статей научно-технической конференции обучающихся и молодых ученых СКГМИ (ГТУ) "НТК-2016". – Владикавказ, 2016. – С. 33 – 36.

20. Лолаев А.Б., Акопов А.П., Бадоев А.С. Программа расчета технологических параметров намывных сооружений с использованием стандартного пакета Microsoft Office Excel на примере хвостохранилища «Лебязь» ЗФ ОАО ГМК «Норильский никель» // Сб. статей научно-технической конференции обучающихся и молодых ученых СКГМИ (ГТУ) "НТК-2016". – Владикавказ, 2016. – С. 31 – 33.

21. Lolaev A.B., Badoev A.S., Arutiunova A.V. et al. Definition of tailings consolidation parameters to optimize the inwash technology of the tailing dump levee // Proc. of XVIII Brazilian Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering "The Sustainable Future of Brazil goes through our Minas" COBRAMSEG 2016, Belo Horizonte, BRAZIL, 2016. (CD-Edition).

22. Lolaev A.B., Badoev A.S., Oganesyanyan A.Kh. Application of numerical methods for the optimization of the technological parameters of the tailing dam alluvium in permafrost region // Proc. of 2-nd Intern. Seminar "Numerical Analysis in Geotechnics" NAG2018, Ho Chi Minh, Vietnam, 2018. (CD-edition).

23. Лолаев А.Б., Бадоев А.С., Оганесян А.Х. Алгоритм формирования геотехнического массива с учетом времени консолидации и метода сетевого планирования // Сб. статей 1-ой Всероссийской научно-практической конференции «Современные научно-технические и социально-гуманитарные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации». – Владикавказ, 2019. – С. 16 – 21.

24. Лолаев А.Б., Бадоев А.С., Оганесян А.Х. и др. Технологическое решение устройства дамбы гидротехнического сооружения // Сб. статей 1-ой Всероссийской научно-практической конференции «Современные научно-технические и социально-гуманитарные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации». – Владикавказ, 2019. – С. 151 – 153.

25. Лолаев А.Б., Бадоев А.С., Арутюнова А.В., Айларова В.Г. Технологическое решение устройства дамбы гидротехнического сооружения // Сб. публикаций научного журнала «Chronos» по материалам XXXVI международной научно-практической конференции: «Вопросы современной науки: проблемы, тенденции и перспективы» (уровень стандарта, академ. уровень). – М.: Научный журнал «Chronos», 2019. – С. 47 – 51.

26. Лолаев А.Б., Бадоев А.С., Оганесян Э.Х., Кацанов А.З. Повышение устойчивости ограждающей дамбы хвостохранилища при ее эксплуатации // Сб. публикаций научного журнала «Chronos» по материалам XXXVI международной научно-практической конференции: «Вопросы современной науки: проблемы, тенденции и перспективы». – М.: Научный журнал «Chronos», 2019. – С. 47 – 61.