

Материалы докладов XIV Общероссийской научно-практической конференции и выставки  
«Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации»

**ООО «Геомаркетинг»**

**ООО «Институт геотехники и инженерных изысканий в  
строительстве»**

**СРО Ассоциация «Инженерные изыскания в строительстве»**

**НП «Союз изыскателей»**

**ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ  
ИЗЫСКАНИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ  
В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**МАТЕРИАЛЫ ДОКЛАДОВ  
XIV ОБЩЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ  
ИЗЫСКАТЕЛЬСКИХ ОРГАНИЗАЦИЙ**

**11 – 14 декабря 2018 г.**

**МОСКВА  
2018**

**Юров Ф.Д., Гребенец В.И., Тополева А.Н.**

МГУ им. М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра криолитологии и гляциологии,  
г. Москва, fdiurov@gmail.com, vgreb@inbox.ru, ar.topol@mail.ru

## **ИНЖЕНЕРНО-ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ УСТОЙЧИВОСТИ ДАМБ – НАКОПИТЕЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ (НОРИЛЬСКИЙ РАЙОН)**

В районах промышленного освоения остро стоит вопрос размещения отходов производства, а в криолитозоне данная проблема имеет свою специфику, обусловленную наличием мерзлых грунтов и действием криогенных процессов. При складировании жидких промышленных отходов (шламов, «хвостов», пульпы золоотвалов, сильнозагрязненных вод очистки и т.п.) основную сложность представляют высокие температуры складированного материала, длительная продолжительность активных химических реакций, что, в целом, разрушает вечную мерзлоту, а также высокая агрессивность по отношению к материалу подземных конструкций. Для консервации жидких отходов и недопущения их попадания в окружающую среду в условиях криолитозоны обычно применяется создание прудов-накопителей, огражденных дамбами с мерзлым противифльтрационным ядром. Крупные подобные системы в криолитозоне располагаются в Норильском регионе, Валькумее, Куларе, Мирном, Лонгйире (Шпицберген) и других горнодобывающих районах. Однако, фиксирующиеся в последние десятилетия тренды к деградации мерзлоты, вызванные увеличением среднегодовых температур воздуха в северных регионах [6, 7], в совокупности с техногенными воздействиями обостряют проблему изоляции загрязнителей. Представляется важным отметить, что в этих накопителях зачастую «хранится» сырье для будущей переработки. так, например, в сотнях миллионов тонн шлако-шламо-хвостохранилищ в Норильском промрайоне (НПР) содержится до 20–40% железа (в знаменитой Курской аномалии разрабатываются и руды с содержанием железа 5–8%); безусловно, это уже извлеченное из недр сырье, вероятно, будет востребовано в будущем. В настоящее время заводы цветной металлургии в Норильском регионе ежегодно выбрасывают ТОЛЬКО в атмосферу около 2 млн. тонн диоксида серы [2, 5], безусловно, что пирометаллургия для извлечения из этих отходов железа сделает существование человека в регионе (за счет новых выбросов) практически невозможной. Эти «загрязнители» (запасы будущего...) пытались купить канадцы (знаменитый визит в г. Норильск в 1971-м г. Премьер-министра Канады Э. Трюдо совместно с Председателем Совмина СССР А.Н. Косыгиным), а позже, в 1990-е гг. – японские предприниматели. С 2004 г. на окраинной части (одного из самых крупных в мире) хвостохранилища № 1, нависающего над западной частью г. Норильска, частная компания начала

переработку «хвостов» для извлечения платины, палладия, золота, осмия, индия, иридия и других редкоземельных и драгоценных материалов.

Безусловно, что проблема надежного складирования отходов (высокотоксичных! но богатых различными ценными компонентами) в крупнейшем в мире центре по добыче и производству цветных металлов – НПП – является как актуальной как минимум по двум причинам: а) сохранение извлеченных из недр земли полезных ископаемых для будущей и более технологичной переработки; б) защита окружающей среды от негативного воздействия хлоридно-сульфатных рассолов, солей тяжелых металлов и т.п.

Наши исследования проводились в течение последних 40 лет и были сосредоточены на двух основных позициях: а) оценка инженерно-мерзлотных параметров территорий (площадок), где устраиваются подобные накопители; б) анализ устойчивости ограждающих дамб.

Складирование жидких отходов производства в прудах-накопителях широко распространено на территории НПП. Так, в окрестностях г. Норильск (на удалении 15–20 км от города) хвостохранилища занимают около 31 км<sup>2</sup>, шлакоотвалы – 2,2 км<sup>2</sup> и 5,1 км<sup>2</sup> – отстойники металлосодержащего сырья [2]. В законсервированном на настоящий момент хвостохранилище № 1 НПП за время его эксплуатации было накоплено 432 млн т хвостов, а эксплуатируемое в настоящее перспективе хвостохранилище № 2 «Лебяжье» рассчитано еще на 168 млн м<sup>3</sup> материала [5]. Характерно, что крупные хвостохранилища часто рассматриваются как места накопления стратегического сырья, которое планируется разрабатывать в будущем с использованием более совершенных технологий.

Все перечисленные объекты характеризуются чрезвычайно высоким содержанием различных опасных химических веществ. Например, отбор проб, проводившийся в 1985–1986 гг. из ограждающей дамбы хвостохранилища «Лебяжье» (намытой из пульпы, поступающей с медного завода), показал значительное превышение концентраций ионов металлов, а содержание сульфат-ионов составило более 15 500 мг/л, в то время как в тундре в 60 км от города концентрация сульфат-ионов составляла всего 220 мг/л [5]. Интересно, что содержание ионов легкорастворимых солей в антропогенных криопэгах центральной части г. Якутска, которые делают чрезвычайно сложной и практически нереализуемой защиту от деструкции материала подземных конструкций, составляет 5 000–8 000 мг/л [1]. Для предотвращения разноса химических загрязнителей предпринимались попытки формирования на накопителях почвенно-растительного покрова, но из-за сурового климата и высокой агрессивности среды данные попытки не имели успеха. Неудачными оказались и опыты по силикатизации или цементации поверхности на опытных площадках накопителей: искусственные покрытия (корки) разрушались морозобойным растрескиванием. Если рассматривать пруды-накопители с точки зрения влияния на мерзлые грунты, то наибольшую опасность представляет тепловое воздействие отходов производства, подающихся в места хранения при высоких температурах, что ведет к деградации мерзлых пород, в

том числе и противофильтрационных завес дамб «мерзлого типа» [4]. Этот эффект усиливается за счет повышения температур воздуха в результате техногенеза и потепления климата, в результате через тела дамб движутся воды, содержащие не только растворимые соли сульфатов, хлоридов и т.п., но и соли тяжелых металлов; все эти токсичные вещества «убивают» тундровые экосистемы и попадают в бассейны рек, в конечном итоге – в Мировой океан [3].

Наиболее рациональным решением для создания противофильтрационных завес дамб прудов-накопителей в условиях криолитозоны является создание мерзлых ядер внутри дамб при помощи парожидкостных охлаждающих устройств. На территории НПП такое решение применяется на ряде объектов, одним из которых является пруд-окислитель Талнахской обогатительной фабрики. Плотина пруда состоит из супесчано-суглинистых грунтов, промораживание которых осуществлялось естественным путем в зимнее время за счет соблюдения регламентов отсыпки: мощность слоя грунтов, которые укладывались с начала лета (до сентября) и «погребали» промерзший за зиму горизонт, не превышала расчетные значения потенциального промерзания уложенного слоя за последующую зиму. На наиболее опасном участке (а огромный пруд-накопитель занимает площадь 3 км x 1,5 км), где протекала небольшая речка, перекрытая дамбой, было предусмотрено создание специальной противофильтрационной завесы с помощью 14 парожидкостных (аммиачных) охлаждающих устройств, установленных с шагом 1,4–2,5 м. Ранее (после устройства ограждающей дамбы в 1982–1984 гг.) на глубине 3–5 м существовал горизонт фильтрации (температуры около 0° С по данным замеров в мае 1985 г.), но этот горизонт был ликвидирован после начала искусственного замораживания тела плотины, к 1987 г. температуры на этой глубине составляли уже  $-3 \div -3,5^{\circ}\text{C}$ . Замеры температуры в 2004 г. показали сохранение низкотемпературного мерзлого ядра в этом наиболее опасном участке гидротехнического сооружения. В настоящее время пруд – окислитель временно выведен из эксплуатации, однако он является необходимым звеном технологической цепочки (и важнейшим элементом в защите окружающей среды), в настоящее время завершается реконструкция ограждающих дамб.

Другим примером удачного использования мерзлых противофильтрационных дамб является плотина пруда-отстойника оборотной системы водоснабжения Надеждинского металлургического завода. Плотина сооружена из местного суглинистого материала, причем на глубине 3–5 м в теле дамбы было устроено дополнительное противофильтрационное ядро иного состава: 50% ядра составляют мерзлые комья среднего суглинка, а оставшиеся 50% – шлам из местного грунта, которым были заполнены пустоты. Для замораживания дамбы были использованы фреоновые СОУ в количестве 170 штук, установленные с шагом от 2 до 3 м и заглубленные на 12 м. Естественные температуры на уровне нулевых годовых колебаний для данной территории составляли  $-3^{\circ}\text{C}$  и выше, но после начала искусственного

замораживания температуры в теле дамбы опустились до  $-5 \div -8,2^{\circ}\text{C}$ . Такие показатели температур грунта в теле плотины при условии колебаний температуры воды в пруде-отстойнике от  $5^{\circ}$  до  $25^{\circ}\text{C}$  говорят о формировании надежной противифльтрационной завесы на данном объекте.

Но формирование противифльтрационных плотин с мерзлым ядром не всегда является действенным методом изоляции жидких отходов производства. Хвостохранилище № 2 («Лебяжье») сооружается на правом берегу р. Купец с 1977 г., эксплуатация в качестве пруда-накопителя началась в 1983 г. [5]. Объект расположен на естественном понижении рельефа (ранее здесь были озера, которые служили местами отдыха для перелетных птиц), огражденном дамбой, намывтой из «хвостов» (средне- мелкозернистый пылеватый песок) Талнахской и Норильской обогатительных фабрик. Основание дамбы представляет из себя пылеватые суглинистые грунты мощностью от 4 до 25 м и льдистостью 0,2–0,4 в верхних 7–10 м отложений. Суглинки перекрыты супесчаными грунтами мощностью 1–9 м и аналогичной льдистостью, а на поверхности расположен слой торфа мощностью 0,1–2 м. Естественные температуры грунтовой толщи перед началом строительства хвостохранилища колебались от  $-0,2^{\circ}$  до  $-3^{\circ}\text{C}$  на уровне нулевых годовых, а под руслами ручьев наблюдались мощные (до 25 м) талики, для ликвидации которых были установлены парожидкостные СОУ. В результате замораживания грунта полноценной противифльтрационной завесы под дамбой хвостохранилища сформировано не было, что связано с высокой степенью засоленности грунтовых вод (содержание ионов  $\text{SO}_4^{2-}$  составляет почти 15 700 мг/л,  $\text{Ca}^{2+}$  - 4430 мг/л), что привело к понижению температуры начала замерзания до  $-1,4^{\circ}\text{C}$  и неравномерному промораживанию грунта вокруг СОУ. Кроме того, неверно был выбран шаг установки охлаждающих устройств: расчеты показывают, что область промораживания составляет 1,25 м, а СОУ установлены с шагом 3 м, что, в совокупности с неравномерным промерзанием засоленного грунта, не дает сплошной противифльтрационной завесы.

«Хвосты», сбрасываемые в «Лебяжье» в виде пульпы, содержат большое количество твердых частиц, поэтому, чтобы хвостохранилище не переполнилось, необходимо производить ежегодное увеличение высоты дамбы на 1,5 м. Намывание материала происходит в короткий летний период с расчетом на промораживание новой части дамбы зимой. Но низкая температура замерзания пульпы, содержащей большое количество различных солей, и высокая температура сбрасываемого в пруд-накопитель жидкого материала препятствуют равномерному промерзанию плотины и формированию сплошной противифльтрационной завесы. В результате происходит фильтрация вод и химических загрязнителей за пределы хвостохранилища и попадание их в окружающую среду (рис.).



Рис. Участок тундрового ландшафта с уничтоженной растительностью вблизи дамбы  
хвостохранилища «Лебяжье» (фото А.Н. Тополевой, июль 2015 г.)

Исследование ряда прудов-накопителей на территории НПП показало, что сооружение грунтовых дамб с мерзлым противифльтрационным ядром в условиях криолитозоны является распространенным и, зачастую, действенным методом изоляции химически агрессивных жидких отходов производства. Но для корректной работы таких систем необходимо соблюдение ряда условий: грамотный выбор площадки для формирования пруда-накопителя (яркий пример неудачного расположения водоема – хвостохранилище «Лебяжье», мощность таликов в днище которого достигала 25 м), тщательный расчет шага расположения СОУ для формирования надежной низкотемпературной противифльтрационной завесы, учет засоления грунта и химического состава складываемого материала при расчетах для установки охлаждающих устройств (крайне высокое содержание растворимых солей в «хвостах» понижает температуру замерзания грунта в теле плотины хвостохранилища «Лебяжье» и не позволяет сформироваться надежному противифльтрационному ядру). Кроме того, при проектировании сооружений такого типа важно учитывать современные тренды к увеличению температур воздуха за счет изменений климата и техногенного воздействия, так как эти изменения приводят к деградации мерзлоты и снижению эффективности СОУ. Безусловно, должны быть тщательно изучены инженерно-геокриологические особенности площадок будущих накопителей, включая наличие крупных систем подземных льдов, которые могут подвергнуться процессу вытаявания при складировании отходов промышленных производств.

*Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ 18-05-60080 «Опасные нивально-гляциальные и криогенные процессы и их влияние на инфраструктуру в Арктике».*

### **Список литературы**

1. Анисимова Н.П. Криогидрогеохимические особенности мерзлой зоны. Новосибирск: Наука, 1981. 153 с.
2. Гребенец В.И. Исследование техногенного подтопления и засоления грунтов в Норильском промышленном районе // Криосфера Земли. 1998. Т. II. № 1. С. 44–47.
3. Гребенец В.И. Негативные последствия деградации мерзлоты // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2007. № 3. С. 18–21.
4. Гребенец В.И. Негативные изменения мерзлотно-экологической обстановки и геотехнической ситуации на урбанизированных территориях криолитозоны (на примере Норильского промышленного района) // Глобальные экологические процессы: сб. материалов Международной научной конференции. М.: Academia, 2012. С. 123–126.
5. Савченко В.А. Экологические проблемы Таймыра. М.: СИП РИА, 1998. 194 с.
6. IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Core writing team R.K. Pachauri, L.A. Meyer (eds.). Geneva: IPCC, 2014. 151 p.
7. Nelson F.E., Anisimov O.A., Shiklomanov N.I. Climate Change and Hazard Zonation in the Circum-Arctic Permafrost Regions // Natural Hazards. 2002. Vol. 26. Iss. 3. P. 203–225.