

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ  
ИНСТИТУТ ГОРНОГО ДЕЛА СЕВЕРА им. Н.В. ЧЕРСКОГО

А.С. Курилко, С.А. Ермаков, Ю.А. Хохолов,  
М.В. Каймонов, А.М. Бураков

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ  
В ГОРНОМ МАССИВЕ ПРИ ОТКРЫТОЙ РАЗРАБОТКЕ  
РОССЫПЕЙ КРИОЛИТОЗОНЫ**

Ответственный редактор  
доктор технических наук *А.В. Омеляненко*



НОВОСИБИРСК  
АКАДЕМИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО "ГЕО"  
2011

УДК 622.876:622.271 + 622.342(001)

ББК И-422:И22 + И26с

К931

**Курилко, А.С. Моделирование тепловых процессов в горном массиве при открытой разработке россыпей криолитозоны / А.С. Курилко, С.А. Ермаков, Ю.А. Хохолов, М.В. Каймонов, А.М. Бураков ; отв. ред. А.В. Омеляненко ; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т горного дела Севера им. Н.В. Черского. – Новосибирск : Академическое изд-во "Гео", 2011. – 139 с. – ISBN 978-5-904682-66-8.**

Рассмотрено состояние открытых горных работ на россыпных месторождениях Республики Саха (Якутия), представлены характеристики климатических и геокриологических условий некоторых районов республики, основные технологии разработки месторождений. Особое внимание уделено способам подготовки к выемке и последующей разработке многолетнемерзлых пород россыпных месторождений. Изложены результаты моделирования процесса разупрочнения многолетнемерзлых пород способами водно-тепловой мелиорации и естественной оттайки.

Предназначена для специалистов в области открытых горных работ по разработке россыпных месторождений Севера, а также для студентов и аспирантов горных вузов.

Рецензенты:

д-р техн. наук *Б.Н. Заровняев*,

канд. техн. наук *В.В. Киселёв*,

канд. техн. наук *С.В. Панишев*

---

---

## ВВЕДЕНИЕ

Две трети территории Российской Федерации, на которых разрабатывается большое количество месторождений полезных ископаемых, в том числе угля, алмазов, золота, заняты многолетнемерзлыми горными породами. Основой золотодобычи в РФ в настоящее время является открытая разработка россыпных месторождений. В Якутии, как и в целом по России, не менее половины всего золота добывается из россыпных месторождений.

Суровые климатические условия и многолетняя мерзлота оказывают существенное влияние на все технологические процессы разработки россыпных месторождений. Характерной особенностью россыпных месторождений золота, алмазов и благородных металлов в криолитозоне является резкое изменение прочности горных пород вследствие их промерзания или оттаивания. Влагонасыщенные дисперсные горные породы в мерзлом состоянии, сцементированные льдом, по прочностным характеристикам приближаются к скальным породам и могут выдерживать значительные нагрузки, но при положительных температурах их прочность резко падает.

Разработка россыпных месторождений полезных ископаемых, как правило, осуществляется сезонно. Широко используется естественная или принудительная оттайка многолетнемерзлых пород, буровзрывное и механическое рыхление. При открытой разработке крупных россыпных месторождений Якутии наиболее распространены дражный, экскаваторно-автотранспортный и комбинированный (роторно-конвейерный комплекс – драга) способы. Мелкие месторождения обрабатываются в основном бульдозерным и бульдозерно-гидравлическим способом. Обычно применяются схемы послойной выемки золото- и алмазосодержащих песков с выкладкой продуктов переработки за пределы контура или в выработанное пространство.

Для правильного выбора способа и технологии отработки россыпных месторождений полезных ископаемых, расположенных в криолитозоне, необходимо уметь прогнозировать температурное состояние массива горных пород при техногенном воздействии.

Анализ горно-технологических условий россыпных месторождений Якутии показывает необходимость и актуальность разработки новых технологических решений, включающих реконструкцию технологии добычи и транспорта; обоснование способов подготовки многолетнемерзлых горных пород к выемке, разупрочнения крепких и мерзлых пород. Технологические решения должны обеспечивать уменьшение экологической нагрузки на окружающую среду, создание благоприятных условий

для работы горно-добычного оборудования, увеличение продолжительности рабочего сезона, сохранность алмазов при их добыче, последующее восстановление нарушенных земель.

Наиболее перспективным направлением повышения эффективности открытых горных работ при разработке месторождений Севера в современных условиях представляется активное влияние на процесс изменения термомеханического состояния массива, т. е. разработка технологических мероприятий, обеспечивающих эффективное освоение месторождений в условиях криолитозоны и включающих в себя способы подготовки и разупрочнения многолетнемерзлых грунтов, предохранения горных пород от промерзания, приемы и параметры отработки забоя.

В монографии рассмотрены примеры математического моделирования тепловых процессов в горном массиве при отработке продуктивных пластов золота и алмазов, а также при строительстве дамб дражных полигонов, которые позволили предложить технологические решения, существенно снижающие затраты на добычу полезных ископаемых и снизить экологическую нагрузку на окружающую среду.

---

---

# 1 УСЛОВИЯ И ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ РОССЫПНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЯКУТИИ

## 1.1. ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ ГОРНЫХ РАБОТ

Суровые климатические условия Якутии способствуют почти повсеместному развитию толщи многолетнемерзлых пород.

Вся территория Якутии входит в зону многолетней мерзлоты, распространенной от поверхности на глубину от 100–150 м до 1500–1600 м, с относительно постоянной температурой пород в массиве (–3...–5 ÷ –10...–12 °С) и резким ее изменением в приконтактном поверхностном слое, достигающем температуры атмосферного воздуха –50...–60 °С [Фельдман и др., 1988].

Основными факторами возникновения и развития многолетнемерзлых пород являются продолжительные низкие температуры окружающего воздуха и малая толщина снежного покрова, так как основное количество осадков на территории Якутии (60–70 %) выпадает в теплое время года. Это подтверждается климатическими характеристиками Якутии в целом, и отдельных ее регионов. Так, среднегодовая температура в районе Якутска составляет –9,3 °С при колебаниях от –3,5 (средний максимум) до –14,3 (средний минимум). Из зафиксированного количества осадков в 238 мм более 160 мм, или 68 %, выпадает с мая по сентябрь. Те же показатели для Оймякона соответственно равны: среднегодовая температура –16 °С при колебаниях от –8,5 (средний максимум) до –22,7 (средний минимум). Из 215 мм осадков 154 мм, или более 70 %, выпадает в теплый период года. Для Верхоянска среднегодовая температура равна –14,7 °С при колебаниях от –7,3 (средний максимум) до –20,5 (средний минимум). Около 70 % осадков приходится на период с мая по сентябрь. Средняя величина снежного покрова в этих трех пунктах не превышает 50 см.

В целом среднегодовая температура воздуха закономерно понижается с увеличением широты местности.

Исследованиями В.В. Ржевского, А.Н. Зеленина, Н.А. Цытовича и многих других авторов установлено возрастание прочности грунтов различного гранулометрического состава с понижением температуры. Так, Н.А. Цытович определил увеличение прочности глинистых грунтов более чем в 8 раз при понижении температуры до –10 °С.

Гранулометрический состав песков россыпных месторождений имеет значительные различия по фракционному составу. Так, на месторождениях Адданского района доля фракции +100 мм может изменяться от

5 до 25 %, а доля мелких фракций – 5 мм – от 35 до более чем 70 %. На месторождениях Нерюнгринского района доля валунистой фракции изменяется от 5–10 % до 25 и даже до 45 %, а доля мелкой фракции доходит до тех же 70 %. Это определяет и различия в теплофизических и прочностных характеристиках. Такое разнообразие свойств требует применения математического моделирования для оценки происходящих в массиве тепловых процессов и прогноза термического состояния.

Распространение многолетнемерзлых горных пород на территории Якутии характеризуется постепенным возрастанием мощности и понижением температуры мерзлого слоя по мере изменения географической широты местности с юга на север. Так, на месторождениях, расположенных в южных районах республики (Алданском, Нерюнгринском), мерзлые породы присутствуют в виде сезонно-мерзлого слоя и небольших участков островной мерзлоты. В то же время на месторождениях, расположенных в центральных, восточных и северных районах (Оймяконский, Усть-Майский, Усть-Янский) многолетняя мерзлота имеет повсеместное распространение, причем ее мощность доходит до 600–800 м и более, а температура до –6...–8 °С и ниже. Разработка таких месторождений сильно затруднена вследствие низкой температуры почвы и ограниченных возможностей использования естественного теплового потока.

Наибольшая амплитуда изменения температуры пород наблюдается в пределах деятельного слоя, величина которого для большинства районов Якутии составляет 1,2–1,5 м и редко превышает 2–2,5 м [Фельдман и др., 1988].

Многолетнемерзлые горные породы в совокупности с низкими температурами воздуха оказывают существенное влияние на все технологические процессы разработки россыпных месторождений. Прочность мерзлых дисперсных горных пород на порядок выше их прочности в талом состоянии, поэтому существующие технологии разработки предусматривают предварительное разупрочнение пород различными способами оттайки (гидро-, паро-, электрооттайка и др.) либо рыхлением (бульдозер-рыхлитель или ББР) [Емельянов, 1976; Лешков, 1977; Потемкин, 1991], что существенно увеличивает затраты на освоение россыпных месторождений.

Массив многолетнемерзлых пород, как правило, не может разрабатываться без применения механического рыхления, либо в разработке может быть только предварительно разупрочненный слой. Производительность оборудования непосредственно зависит от мощности и температуры разупрочненного слоя. Возможная прочность и глубина этого слоя определяются характеристиками горных машин.

Нестационарность термомеханического состояния горных пород предопределяет необходимость применения технологических мероприятий, включающих в себя приемы и параметры отработки забоя, способы подготовки и разупрочнения мерзлых грунтов, предохранения пород от промерзания.

Обосновать эффективное сочетание технологических мероприятий возможно только путем моделирования теплового состояния массива. В связи с этим актуально решение тепловых задач, позволяющее обосновать технологические мероприятия, обеспечивающее наиболее существенное разупрочнение массива.

Многолетний опыт горных работ в условиях Якутии, где функционирует большое количество горнодобывающих предприятий, подтверждает важность учета природно-климатической составляющей при проектировании горно-добычных и обогащательных работ.

Ниже приведены характеристики природно-климатических и геокриологических условий россыпных месторождений, расположенных в различных административных районах Якутии.

## 1.2. ХАРАКТЕРИСТИКА КЛИМАТА ЯКУТИИ

### 1.2.1. Общие особенности

Зима в Якутии является самым продолжительным сезоном года. Среднегодовая температура воздуха составляет около  $-10^{\circ}\text{C}$ , на севере республики до  $-15^{\circ}\text{C}$  (табл. 1.1).

Период со среднесуточной температурой ниже  $0^{\circ}\text{C}$  длится 204–219 дней в юго-западных, центральных районах и 225–260 – на побережье арктических морей. Число дней с устойчивым снежным покровом составляет от 200–210 в Центральной Якутии до 250 в тундровой зоне. На островах и побережье морей снег лежит 260–280 дней. Суммы суточных отрицательных значений температуры воздуха за год могут достигать  $7000^{\circ}\text{C}$  и редко составляют менее  $5000^{\circ}\text{C}$  [Климат..., 1982].

Таблица 1.1

Среднемесячная и среднегодовая температура воздуха в Якутии

Наименование районов (полезные ископаемые)	Средняя температура наружного воздуха по месяцам, $^{\circ}\text{C}$								За год
	I	II	III	IV	IX	X	XI	XII	
Витим	-30,0	-25,5	-16,1	-4,0	6,2	-3,0	-19,0	-27,5	-5,6
Алданский (золото)	-27,8	-24,0	-16,1	-6,0	5,4	-6,1	-19,8	-26,3	-6,2
Мирнинский (алмазы)	-32,3	-26,0	-17,1	-6,1	4,9	-6,9	-22,9	-30,6	-7,6
Нюрбинский (алмазы)	-36,1	-30,4	-19,9	-7,4	5,2	-7,1	-25,1	-34,1	-8,8
Нерюнгри (уголь)	-36,6	-31,0	-20,2	-7,1	4,4	-7,7	-24,2	-34,2	-9,4
Якутск (уголь)	-43,2	-35,9	-22,2	-7,4	6,2	-7,9	-28,0	-39,8	-10,3
Жиганский (алмазы)	-40,5	-34,7	-23,7	-11,1	3,8	-9,8	-29,0	-38,1	-11,9
Усть-Майский (золото)	-44,9	-39,2	-26,9	-12,0	3,7	-12,4	-31,6	-41,9	-13,9
Оймяконский (золото)	-48,5	-42,2	-29,8	-12,0	3,1	-14,6	-36,1	-45,8	-15,3
Оймяконский (золото)	-50,0	-44,3	-31,9	-14,8	2,3	-15,2	-36,2	-47,4	-16,6
Депутатский (олово, золото)	-39,6	-35	-29,5	-17	-0,2	-12,2	-31,7	-36	-14,8

В зимний период держится безветренная погода с жестокими морозами, характерными инверсиями температуры воздуха, при которых приземные слои выхолаживаются до  $-50...-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а верхние имеют более высокую температуру. Так, в пос. Имтанджа, находящемся на склоне Верхоянского хребта на высоте 2350 м над уровнем моря, средняя температура января составляет  $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$ , в то время как недалеко от него, в Верхоянске, расположенном на высоте 137 м над уровнем моря, она достигает  $-49\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Устойчивая стратификация препятствует вертикальному обмену воздуха, способствует большей его неподвижности, что требует отдавать предпочтение технике и технологии с минимальными выбросами вредных веществ в атмосферу. При этом в городах, поселках и вдоль дорог с интенсивным движением образуются густые морозные туманы, утверждающиеся в течение нескольких месяцев. При потеплении обычно выпадают осадки, общее количество которых за зиму на равнинных участках не превышает 40–60 мм.

Оттепелей в Якутии не бывает. Из-за низкой влажности воздуха отложения атмосферного льда на наземных предметах и сооружениях, например, ЛЭП, выражены намного меньше, чем в европейской части России и на западе Сибири. Как и общее количество осадков, это явление ослабевает с запада на восток, но активизируется с увеличением абсолютной высоты местности.

Весна продолжается не более полутора месяцев, характеризуется быстрым таянием снега и небольшим усилением ветра. Заметно увеличивается количество осадков, чаще в виде снега, нередко возвраты холодов. Устойчивый переход температуры через  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  по многолетним данным в юго-западной части Якутии происходит 26–29 апреля, в центральных районах – 30 апреля–2 мая и на севере – в конце мая–начале июня. Весной и в начале лета отмечаются частые ночные заморозки.

Летом наибольшее прогревание воздуха наблюдается в конце июня–начале июля и достигает средних суточных значений  $+19...+21\text{ }^{\circ}\text{C}$  в Центральной Якутии и  $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$  на севере. Длительность периода с устойчивым переходом температуры в сторону положительных средних суточных значений в Центральной Якутии составляет 163–154 дня, а на севере 130–112 дней. Средняя температура выше  $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$  удерживается в центральных районах в течение 98–100 дней. На побережье морей средняя температура воздуха выше  $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$  бывает крайне редко. Суммы температуры воздуха выше  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$  в юго-западных и центральных районах Якутии составляют 1600–1800  $^{\circ}\text{C}$ . Летом выпадает основное количество осадков, но в Центральной Якутии чаще удерживается малооблачная погода.

Осень, как и весна, короткая, начинается резким похолоданием в конце августа–начале сентября и заканчивается образованием устойчивого снежного покрова 10–15 октября в центральных и южных районах и 26 сентября–1 октября в северных. В центральных районах в это время происходит общее резкое выхолаживание.



Таблица 1.2

## Среднемесячные температуры, 1986 г.

Месяцы	Депутатский	Айхал	Якутск	Алдан	Нерюнгри
I	-39,6	-32,1	-41,0	-29,7	-33,3
II	-35,0	-26,0	-34,4	-21,2	-26,5
III	-29,5	-23,3	-20,5	-14,3	-16,4
IV	-17,0	-13,3	-8,7	-6,1	-5,5
V	-2,9	-1,9	4,8	3,8	4,4
VI	10,7	10,4	16,9	14,4	14,3
VII	9,8	15,9	19,9	18,6	17,6
VIII	8,1	10,7	16,4	14,0	13,8
IX	-0,2	1,6	6,3	5,9	5,6
X	-12,2	-7,7	-6,6	-5,2	-
XI	-31,7	-23,3	-29,3	-18,7	-
XII	-36,0	-29,6	-39,1	-24,2	-26,2
Средняя за год	-14,6	-9,9	-9,4	-5,2	-6,4

Среднемесячные и среднегодовые температуры по некоторым пунктам Якутии приведены в табл. 1.2.

### 1.2.2. Анабарский район

Климат района суровый, резко континентальный, характеризующийся большими колебаниями среднемесячных и среднесуточных температур, повышенным атмосферным давлением и незначительным количеством осадков. Среднегодовая температура  $-14^{\circ}\text{C}$ . Средняя температура самых холодных месяцев (декабрь–январь)  $-30^{\circ}\text{C}$ , а самых теплых (июль–август) –  $+11...+15^{\circ}\text{C}$ . Максимальные значения температуры летом  $+35$ , зимой  $-60...-65^{\circ}\text{C}$ .

Среднегодовая скорость ветра для района равна  $3-5$  м/с, с колебаниями от  $1$  до  $4$  м/с. В течение лета преобладают ветры юго-западного и северо-восточного направлений, зимой – северо-западного. В зимний период насчитывается до  $50$  дней с метелями. Для лесотундры характерна сезонная смена направлений воздушных течений. Зимой здесь преобладают ветры юго-восточных, северо-западных направлений, летом – восточных.

Годовое количество осадков колеблется от  $120$  до  $250$  мм. Большая их часть выпадает с апреля по октябрь. Мощность снегового покрова обычно не превышает  $0,5$  м, но на некоторых участках достигает  $1-2$  м.

Весна короткая и дружная. В течение первой половины июня вся территория освобождается от снега. Лето короткое ( $2-2,5$  мес.). В конце августа начинаются заморозки. Постоянный снежный покров устанавливается в первой половине октября. В начале мая начинается полярный

день и заканчивается в начале августа. Общая протяженность его составляет 85 сут. Полярная ночь длится с середины ноября до конца января, продолжительность ее около 65 сут.

### 1.2.3. Оймяконский район

Климат района резко континентальный, с продолжительной суровой зимой и коротким, но теплым летом. Среднесуточная температура в июле достигает +25...+30 °С. Средняя годовая температура –15 °С. Продолжительность холодного периода со среднемесячной отрицательной температурой – 7 мес. (с октября по май). Самый холодный месяц – январь, с минимальной температурой –55...–65 °С, а самый теплый – июль, с температурой +30...+35 °С.

Осадки в течение года выпадают неравномерно. Наибольшее количество приходится на теплый период года (март и апрель). Годовое количество осадков составляет 200–300 мм. Снежный покров устанавливается в конце сентября–начале октября, сходит в середине мая, его глубина редко превышает 0,4 м.

Ветры преимущественно северо-восточного направления, наблюдаются в апреле, мае и октябре. Зимой преобладает штиль при температуре воздуха 40–60 градусов ниже нуля.

### 1.2.4. Усть-Янский район

Климат характеризуется резкой континентальностью. Абсолютная амплитуда температур составляет 70–85 °С при среднегодовой темпера-

Таблица 1.3

Климатическая характеристика, 1986–1989 гг.

Месяцы	Температура, °С*	Влажность, %	Скорость ветра, м/с	Штилевые дни, %	Осадки, мм	Снежный покров, см
I	–39,6; –43,5; –54,7	68	1,9(12)	29	2,7	23
II	–35,0; –39,3; –49,7;	69	2,0(12)	27	3,3	24
III	–29,5; –35,7; –49,0	63	2,3(18)	22	2,7	22
IV	–17,0; –25,2; –36,6	67	2,4(13)	16	0,8	21
V	–2,9; –7,1; –15,6;	68	3,8(14)	4	9,1	5
VI	10,7; –5,1; –5,7	63	3,8(18)	5	31,2	1
VII	9,8; 5,1; –1,2	67	3,7(18)	5	34,4	–
VIII	6,2; 1,6; –1,4	73	3,0(14)	6	21,0	–
IX	–0,2; –3,4; –17,6	79	3,8(14)	14	36,3	–
X	–12,2; –17,2; –35,1	76	3,9(17)	12	16,6	14
XI	–31,7; –36,3; –47,3	76	2,2(11)	18	15,6	23
XII	–36,0; –39,9; –47,5	75	1,8(11)	27	5,6	27

\* Средняя, средняя максимальная, абсолютный минимум; в скобках – максимальная зарегистрированная скорость ветра.

туре порядка 14–16 °С. Отрицательная среднесуточная температура составляет 260–280 дней в году. Количество атмосферных осадков – 250–270 мм. Район находится в области избыточного увлажнения: отношение испаряемости к осадкам менее 0,45. Климатическая характеристика района приведена в табл. 1.3.

Зимний период продолжается около 8 мес. и отличается значительными отрицательными температурами (до –50...–55 °С). Например, в 1983 г. количество дней с температурой –40 °С и ниже составило 36 дней, в том числе ниже –45 °С – 10 дней. В весенне-летний период погода крайне неустойчивая, среднесуточные температуры достигают +10 °С, но подвержены резким колебаниям, связанным с внедрением арктических холодных масс воздуха. Количество осадков в этот период – до 200 мм.

Снежный покров ложится во второй половине сентября. Высота его колеблется от 0,5 м в междуречьях до 2,0 м в долинах рек при плотности снега 0,3–0,4 г/см<sup>3</sup>. Последнее объясняется постоянными ветрами (скорость 2–3 м/с).

#### **1.2.5. Алданский район**

Климат резко континентальный, с продолжительной морозной зимой и умеренно теплым дождливым летом.

По данным метеостанции г. Алдан максимальная суммарная солнечная радиация при средних условиях облачности наблюдается в июне – 20,45 МДж/м<sup>2</sup> в сутки, или 614 МДж/м<sup>2</sup> в месяц, а минимальная в декабре – 1,33 МДж/м<sup>2</sup> в сутки, или 41 МДж/м<sup>2</sup> в месяц. Среднегодовая температура воздуха отрицательная и колеблется от –8 до –10,3 °С.

Самый холодный месяц январь, средняя месячная температура соответственно –27,1 °С и –35,2 °С. Абсолютный температурный минимум зафиксирован на уровне –51 °С (1927 г.) и –60 °С (1936 г.). Самый теплый месяц – июль со среднемесячной температурой 16,6 °С и 17,1 °С. Абсолютный температурный максимум зафиксирован на уровне 35 °С в г. Алдан (август 1969 г.) и 38 °С (июль 1970 г.).

Для района характерны температурные инверсии, приводящие к существенному отличию температур на участках с различным расположением по высоте (долины, возвышенности), особенно в зимнее время.

Продолжительность периода со среднесуточными отрицательными температурами воздуха составляет 210–216 дней с 30 сентября–3 октября до 30 апреля–3 мая. Продолжительность безморозного периода в среднем по району равна 100–105 дням. Первые заморозки наступают 17–25 августа, последние бывают 8–17 апреля. Начало устойчивого промерзания почвы колеблется от 4 до 12 октября, а оттаивание на глубину 10 см – от 3 до 6 мая и на глубину 30 см – от 11 до 16 мая. Среднемесячная температура поверхности почвы в течение года в целом близка к температуре воздуха.

Климатические данные по метеостанции Томмот даны в табл. 1.4.

## Среднемесячная и среднегодовая температура воздуха

Месяц												Год
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
-35,5	-31,6	-20,0	-5,8	5,4	13,7	17,2	13,5	5,5	-6,7	-24,4	-33,9	-8,6

Среднее количество осадков по району составляет 644 мм/год по данным Алданской и 432 мм/год – Томмотской метеостанции. В теплый период (апрель–октябрь) выпадает осадков соответственно 514 и 431 мм/год, в холодный период (ноябрь–март) – 130 и 91 мм/год. Максимальное фактически зарегистрированное суточное количество осадков равно 73 мм (1943). Среднегодовое количество осадков уменьшается с юга на север от 435 до 234 мм. В основном осадки выпадают в виде дождя в период с мая по октябрь, что составляет 70–80 % от общего их объема. Количество дней с осадками более 0,1 мм составляет 170–200 дней.

Снеговой покров появляется в г. Алдан во второй декаде сентября, а в г. Томмот – в первой декаде октября. В течение зимы часто наблюдаются сильные снегопады с ветрами, преимущественно юго-западного направления. Устойчивый снежный покров устанавливается 12–14 октября, сходит в конце апреля–начале мая и составляет в среднем 229 дней. В аномальные холодные годы сход снежного покрова происходит во второй–третьей декаде мая. При наибольшей декадной высоте плотность снега на открытых местах достигает 230 кг/м<sup>3</sup>; максимальное значение – на уровне 270–300 кг/м<sup>3</sup>, в конце апреля–начале мая. Мощность снежного покрова изменяется с севера на юг от 30–39 до 52–56 см.

Испарение с открытой водной поверхности в среднем за год равно 290 мм при среднем максимальном месячном испарении в июле, равном 90 мм. По результатам фактических наблюдений по метеостанции Томмота зафиксированы максимальные значения годового – 364 мм (1962 г.) и месячного испарения – 122 мм (июнь 1962 г.). Среднегодовая относительная влажность воздуха колеблется в пределах 67–74 %. Наименьшие ее значения 53–71 % приходятся на апрель–июль, а наибольшие 73–80 % – на октябрь–январь, наблюдаются резкие (в 2–3 раза) изменения влажности в течение короткого периода времени.

Климатические особенности района не способствуют образованию гололеда, который в редкие годы приходится на переходный период от осени к зиме. Число дней с гололедом за год в среднем составляет 0,1–0,3. Более часто в холодный период появляется изморозь, особенно кристаллическая, образующаяся при температуре от –15 °С и ниже при влажности воздуха менее 80 %. В пасмурную, влажную и менее морозную погоду образуется зернистая изморозь. Число дней с изморозью колеблется от 2 до 33 дней, в том числе по метеостанции Томмот – 33 дня.

Таблица 1.5

## Среднегодовое и среднемесячное количество дней с туманом

Месяц												За год
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
14	13	2	0,4	2	8	13	17	12	2	4	15	102

Средняя годовая скорость ветра в Алдане составляет 2,6 м/с, в Томмоте – 1,1 м/с. Весной и летом отмечается некоторое увеличение скорости ветра. Средняя скорость ветра 6,0 м/с, превышение вероятности повторяемости которой для данного региона составляет 5 %. Среднегодовая скорость ветра равна 2,4 м/с. Преобладают ветры юго-западных румбов.

Направление и скорость ветра на прилегающей территории зависит от расчлененности рельефа и абсолютных его отметок. В южной горной части рельефа направление ветра зависит от направления долин рек Алдана и Амги. В районе станции Томмот ветер дует в основном южных и западных румбах.

Количество безветренных дней в году колеблется от 20 до 71 %, в том числе по метеостанции Томмот – 20 %. Количество дней с туманами за год изменяется от 10 до 102. Средняя продолжительность тумана в день меняется от 3 до 8 часов. Наибольшая продолжительность туманов наблюдается в июле–сентябре, а в населенных пунктах – в зимние месяцы (табл. 1.5).

Метели и поземки происходят на данной территории при скорости ветра 6–9 м/с и более, т. е. превышают среднегодовую скорость, которая наблюдается при температуре воздуха –20 °С и ниже. Число дней с метелями и поземками составляет 20–25 в год. Распределяются они в зимний период довольно равномерно.

Грозы бывают 12–16 дней в году, продолжительностью в среднем 2 часа в день. В отдельных случаях продолжительность гроз достигает 6–13 часов. Наибольшее количество дней с грозой падает на июль–август.

Град выпадает крайне редко. Продолжительность его выпадения, как правило, не превышает 5 минут, в сумме на год приходится 0,6–0,9 дня с градом.

### 1.2.6. Нерюнгринский район

Климат района резко континентальный, характеризуется продолжительной (до 7 мес.) холодной зимой и коротким летом. Среднегодовая температура воздуха – 11 °С с колебаниями от –61 °С (декабрь–январь) до +30 °С (июль). Количество осадков составляет 200–560 мм/год, из них 80 % приходится на летний период. Высота снежного покрова – 0,6–0,8 м, на залесенных участках и в долинах ручьев – до 1,0–1,2 м. Преобладающее направление ветров северо-западное в зимний период времени и северо-восточное – в летний период.

Годовая амплитуда колебаний температуры воздуха в пос. Чульман составляет 95 °С (от +34 до –61 °С). Среднемесячная температура января –36,6, июля – +15,9 °С. Среднегодовая температура – –7,8 °С. Годовая сумма осадков составляет 450–600 мм, причем основное количество выпадает с мая по сентябрь. Заморозки возможны во все летние месяцы. Продолжительность безморозного периода составляет всего 48 дней.

Время схода снежного покрова различное и зависит от местоположения. Раньше оттаивают южные склоны и водоразделы, на 10–15 дней позже – склоны северных экспозиций и долины. Климатические показатели изменяются по мере повышения высоты местности (увеличивается количество осадков и падает температура воздуха). Например, в сходных условиях Чарской котловины на расстоянии 50 км количество осадков изменяется от 364 мм (п. Чара на 798 м абс. высоты) до 767 мм (п. Удокан на 1570 м), что составляет 57 мм на 100 м.

### **1.3. РАСПРОСТРАНЕНИЕ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД**

#### **1.3.1. Оймяконский район**

Район входит в область сплошного распространения криолитозоны, локально нарушенной подрусловыми таликами крупных водотоков. Мощность ее превышает 350 м. Благоприятным условием для формирования толщи многолетнемерзлых пород является низкая среднегодовая температура, равная –15 °С. Мощность деятельного слоя составляет 0,8–5,2 м, максимальная оттайка пород отмечается в конце августа–начале сентября. По аналогии с другими районами предполагается, что мощность многолетнемерзлых пород превышает 300 м. Пояс годовых нулевых амплитуд залегает на 15–20 м от поверхности земли и характеризуется температурой порядка –5...–6 °С. Геотермический градиент в зоне отсутствия влияния рельефа составляет 2,5 °С/100 м. Глубина сезонного протаивания отложений в зависимости от их состава изменяется от 0,2–1,0 м (почвенно-растительный слой и илесто-песчаные отложения) до 5,2 м (гравийно-галечные отложения в русловых и прилегающих к ней частях долин рек).

#### **1.3.2. Усть-Майский район**

Многолетняя мерзлота распространена повсеместно, исключая отдельные участки таликов, приуроченных к русловой части долины. Температура мерзлых грунтов на глубине до 10 м колеблется от –4 до –6 °С. Глубина сезонного оттаивания непостоянная и зависит от экспозиции склонов, наличия мохового и растительного покровов. На склонах северной экспозиции она достигает 0,2–0,3 м, в долинах, покрытых мхом, оттаивания грунтов почти не происходит, максимально за сезон оттаивает 0,3 м. На обнаженных склонах глубина протаивания колеблется от 0,8 до 1,2 м. Илистые породы оттаивают очень медленно, а песчано-галечные отложения в течение лета протаивают на глубину 3,0–3,5 м.

### 1.3.3. Нерюнгринский район

Низкие отрицательные температуры в течение продолжительной зимы способствуют сохранению мерзлых толщ. Несмотря на среднегодовую температуру воздуха  $-9,4^{\circ}\text{C}$ , многолетняя мерзлота не имеет сплошного распространения. Многолетнемерзлые породы повсеместно распространены на территории окружающих впадину горных хребтах. В пределах Чульманской впадины мерзлые толщи занимают 50–60 % территории, а мощность их лишь на отдельных участках превышает 100 м [Фотиев, 1965]. С криогенными явлениями связано образование грунтовых и наледных льдов, которые отмечаются на низких заболоченных террасах р. Чульман, Унгры, Горбылах [Некрасов и др., 1978].

В целом мощность ММП по району превышает 100 м. Слой сезонно-талых пород на водоразделах и склонах представлен щебнисто-дресвяными и глыбовыми образованиями с песчаным, супесчаным и суглинистым заполнителем. Глубина сезонного оттаивания изменяется от 0,5 до 2,5 м.

Максимальное сезонное оттаивание 3–5 м отмечается на водоразделах и верхних частях склонов, где среднегодовая температура мерзлых пород близка к  $0^{\circ}\text{C}$  и невысокая влажность – 15–20 %.

## 1.4. СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД И ИХ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ

### 1.4.1. Температура и прочность горных пород

По имеющимся данным и результатам исследований ИГДС, изменение прочностных свойств мерзлых пород начинается с  $-1,5...-1,7^{\circ}\text{C}$ . В диапазоне  $-1,5...-7,0^{\circ}\text{C}$  прочность пород возрастает в 2–3 раза с замедлением темпов роста при температурах  $-7,0...-30^{\circ}\text{C}$ .

Общеизвестно, что с понижением температуры пород, начиная с фазового перехода ( $-1,0...-2,0^{\circ}\text{C}$ ), резко возрастают удельные сопротивления пород усилиям сжатия–растяжения, что естественно вызывает увеличение значения  $K_{FO}$ . Это свидетельствует из работ В.Н. Тайбашева, Ю.И. Беякова и др. [Беяков, 1977, 1987; Мазуров, 1983; Тайбашев, 1963].

Наиболее часто встречающиеся горные породы месторождений Якутии по характеру изменения прочности следует разделить на две основные группы "А" и "Б".

Группа "А" характеризуется тем, что при снижении температуры от  $-1,5$  до  $-6...-7^{\circ}\text{C}$  сопротивление копанию растет в 2–3 раза и достигает 1,5–2,5 МПа. Дальнейшее снижение температуры до  $-30^{\circ}\text{C}$  вызывает незначительный рост  $K_{FO}$  (примерно 25 %), а снижение температуры более  $-30^{\circ}\text{C}$  у некоторых пород приводит даже к снижению  $K_{FO}$ . Гипотетически такое явление наблюдается благодаря повышению хрупкости, высокой пористости, наличию значительного количества молекулярной влаги и т. д.

Группа "Б" пород характерна тем, что ее деформативные свойства (сопротивление разрушению) растут до  $-7^{\circ}\text{C}$ . Так же, как и в группе "А", дальнейшее понижение температуры значительно не изменяет темпов

роста прочностных свойств. К этим породам относятся плотные водонасыщенные глины, глинистые пески, породы с низкой пористостью и низким содержанием молекулярной влаги.

Исследованиями влияния температуры и влажности на прочностные показатели горных пород занимались В.В. Ржевский, А.Н. Зеленин, Н.А. Цытович, М.И. Сумгин, И.Н. Вотяков, И.К. Растегаев, С.Р. Месчан, С.С. Музгин, Ю.И. Беляков, Г.М. Веселов, С.С. Вялов, Л.С. Бурштейн, А.Н. Курочкин, М.Н. Гольдштейн, З.А. Нерсесова, В.А. Давыдов, В.В. Суриков, Г.Р. Глозман [Вялов, 2000; Зеленин, 1968; Ржевский, Новик, 1978; Цытович, 1973; Месчан, 1978; Осипов, 1979].

Наиболее полно свойства различных категорий пород при изменении температуры и влажности представлены в работе Л.Л. Хазанета, П.В. Остапенко, Г.М. Моисеенко [Хазанет и др., 1984] со ссылкой на исследования А.Н. Зеленина, В.Д. Телушкина, В.А. Винокурова, В.А. Ряхина. Здесь делается вывод, что увеличение влажности пород выше полного водонасыщения ведет к разобщению частиц замерзшей водой, в результате чего сопротивляемость разрушению пород в значительной степени будет определяться прочностью льда. Прочность мерзлых глинистых пород при растяжении вначале повышается с увеличением влажности, а затем понижается, достигая при сильном переувлажнении прочности льда. Прочность мерзлых песчаных пород при растяжении с повышением влажности не имеет максимума и непрерывно возрастает, приближаясь к прочности льда.

Данные по свойствам вечномерзлых грунтов Чукотки, Таймыра и Якутии приводит И.К. Растегаев [Растегаев, 1986]. Ввиду того, что влажность вечномерзлых грунтов равна или больше полной влагоемкости, их прочность в области отрицательных температур значительно выше по сравнению с сезонно-мерзлыми грунтами.

Как установил Ю.И. Беляков [Беляков, 1962, 1972], наибольшее возрастание прочности и удельного сопротивления копанию мерзлого слоя при  $h_{пр} = 1,5-2$  м происходит у влажных глинистых грунтов I-IV категорий (в 4-5 раз), в значительно меньшей степени (в 2,5-3,5 раза) – у очень плотных песчано-глинистых грунтов (аргиллитов, алевролитов) и незначительно (на 25-75 %) – у трещиноватых скальных грунтов, имеющих небольшую влажность (табл. 1.6).

Таблица 1.6

**Изменение прочности пород в зависимости от температуры промерзания  
Ирша-Бородинского угольного месторождения\***

Вскрышные породы	-2 °С	-5 °С	-10 °С	-15 °С	-20 °С	-25 °С	-40 °С
	Прочность, МПа						
Супеси	3,2	5,5	8,8	12	15	17	21
Суглинки	2	4,5	7	10	12	—	—
Песчаники слабые	5	8	13	15,5	17,5	20	23,5

\* По данным УкрНИИпроекта.



Таблица 1.7

## Длительная прочность мерзлых грунтов

Тип грунта	Температура, °С	Весовая влажность (W), %	$\sigma_{дл}$ , кг/см <sup>2</sup>
Глина ленточная	-0,4	40	3,9
		47	4,4
	-2,0	60	6,1
		40	8,3
		47	14,4
		60	13,9
	-5,0	40	14,5
		47	17,8
Супесь покровная	-0,4	60	16,6
		20	6,1
		25	7,2
	-2,0	30	8,3
		20	11,0
		25	12,8
	-5,0	30	13,9
		20	17,2
Суглинок покровный	-0,4	25	19,0
		30	20,0
		20	4,4
	-2,0	25	6,7
		40	9,4
		20	13,3
	-5,0	25	13,9
		40	11,7
Песок мелкозернистый	-0,4	20	16,5
		25	17,8
	-2,0	40	15,0
		15	10,0
		25	10,6
	-5,0	15	16,1
		25	17,2
			15
		25	31,0

Для условий Якутии наиболее полно физико-механические свойства мерзлых и оттаивающих грунтов изучены Н.А. Цытовичем [1973, 1983] (табл. 1.7). В частности, он рассматривает изменение длительной прочности многолетнемерзлых грунтов в зависимости от влажности и температуры. Основным влияющим фактором при этом признается содержание незамерзшей воды. Расчетные значения прочности показали хорошую сходимость с экспериментальными данными. Отклонение не превысило 10–15 %.

Пределы длительной прочности  $\sigma_{дл}$  (кг/см<sup>2</sup>) для многолетнемерзлых грунтов Якутии представлены в табл. 1.8.

Таблица 1.8

**Прочность многолетнемерзлых грунтов Якутии**

Тип грунта	0,2–0,5 °С	1–1,5 °С	2–2,5 °С	3–4 °С	5–6 °С
	Пределы деятельной прочности				
Песок	8–11	11–16	16–20	20–30	30–40
Супесь	5–8	8–11	11–16	16–20	20–30
Суглинок	4–6	6–8	8–11	11–16	16–20

Таблица 1.9

**Прочность грунтов при изменении температуры**

Породы	Температура, °С	Влажность, %	$\sigma_{сж}$ , МПа
Песок	–1	17,2	6,6
	–6	16,3	9,9
	–12	17,0	9,0
	–20	15,7	15,0
Глина	–0,3	43,0	0,6
	–1,5	47,7	1,6
	–4,9	49,5	3,1
	–10,1	46,6	5,0

Таблица 1.10

**Прочность грунтов при изменении влажности**

Породы	Температура, °С	Влажность, %	Коэффициент насыщения	$\sigma_{сж}$ , МПа
Песок	–12	6,3	0,3	6,6
	–12	10	0,48	9,9
	–12	16,3	0,78	13,3
	–12	17,9	0,85	13,5
Глина	–12	4,3	0,3	2,0
	–12	12,5	0,8	4,8
	–12	16,5	1	5,0
	–12	29,3	1	3,2
	–12	34,6	1	2,8

Значительный интерес представляют данные Н.А. Цытовича по изменению прочности мерзлых грунтов на сжатие при изменении температуры (табл. 1.9) и влажности (табл. 1.10).

Сведения по прочности грунтов на сжатие различного гранулометрического состава в зависимости от температуры приводит В.А. Давыдов [Давыдов, Бондарева, 1989] (табл. 1.11).

При анализе вышеизложенного материала обращают на себя внимание некоторые особенности изменения прочностных свойств песчано-глинистых пород в зависимости от температуры и влажности.

Таблица 1.11

**Прочность грунтов различного состава**

Наименование грунта и гранулометрический состав	Температура, °С	Влажность, %	$\sigma_{сж}$ , кг/см <sup>2</sup>
Песок кварцевый (фракция 1,0–0,25 мм – 100 %)	–1	17,3	62
	–9	16,4	118
	–20	15,7	152
Супесчаный грунт (фракция 1,0–0,05 мм – 68 %, 0,005 мм – 8 %)	–0,3	21,2	12
	–5,2	20,8	40
	–9,5	25,8	58
Глинистый грунт (фракция 0,01–0,005 – 50 %, 0,0005 мм – 36 %)	–0,3	43	6
	–4,9	49,5	31
	–10,1	46,6	50

Так, породы Ирша-Бородинского месторождения при понижении температуры от –2 до –20 °С увеличивают свою прочность соответственно: супеси – в 4,7 раза, суглинки – в 6 раз, слабые песчаники – в 3,1 раза.

Длительные силы сопротивления мерзлых грунтов в своем изменении выделяются следующим:

1) песок мелкозернистый при постоянной влажности 15 и 25 %, с понижением температуры увеличивает свою прочность равномерно;

2) супесь покровная при постоянной влажности 20, 25, 30 % и понижении температуры от –0,4 до –5,0 °С также равномерно увеличивает прочность;

3) суглинок покровный, можно отметить большее повышение прочности для пределов влажности до 25 %, далее идет уменьшение темпов роста прочности;

4) глина ленточная, отмечается наибольшее повышение прочности до уровня влажности в 47 %.

По данным Н.А. Цытовича, изменение прочности мерзлых пород при понижении температуры происходит равномерно. Песок при температуре –6...–12 °С сохраняет свою прочность. Глина упрочняется равномерно. Однако при постоянной температуре –12 °С и изменении влажности увеличение прочности происходит вплоть до полного водонасыщения, что для глины соответствует 16,5 %.

Согласно результатам, полученным А.Н. Зелениным [Зеленин, 1968], прочность мерзлых песчаных пород при растяжении с повышением влажности не имеет максимума и непрерывно возрастает, приближаясь к прочности льда. Прочность супеси имеет максимум при влажности, равной 18–19 %, суглинка – 24–25 %, глины – 31–32 %.

Принимая во внимание, что наибольшее влияние на прочность сезонно-мерзлых песчано-глинистых грунтов оказывают содержание незамерзшей воды и полная влагоемкость, а показатели прочности в значительной мере определяются самим составом пород, можно сделать вывод, что различие наибольших показателей прочности в одних и тех же кате-

горячих пород определяется разбросом их гранулометрического состава. Так, содержание глинистых частиц (0,002 мм) в супеси может быть от 3 до 10 %, в суглинке от 10 до 30 %, в глине – от 30 до 60 % и более.

Этот вывод подтверждается и результатами выполненных исследований по оценке влияния гранулометрического состава на прочностные характеристики мерзлых дисперсных пород. Так, в результате проведенных А.Н. Зелениным и Н.Г. Трупаком исследований [Зеленин, 1968; Трупак, 1974] установлено, что повышение содержания песчаных частиц в мерзлых дисперсных грунтах увеличивает их сопротивление разрыву, и в зависимости от температуры  $\sigma_p$  песка и супеси превышает  $\sigma_p$  глины в 1,5–2,5 раза.

В работах М.Н. Гольдштейна [1971] и Г.А. Шлойдо [Шлойдо и др., 1979], исследовавших зависимость сопротивления разрыву от гранулометрического состава дисперсных пород, получен обратный результат увеличения сопротивления разрыву с увеличением содержания глинистых частиц.

#### 1.4.2. Исследование прочности песчано-гравийных горных пород

Для выяснения характера деформирования и разрушения смерзшихся крупнодисперсных горных пород различного состава в ИГДС СО РАН проведены испытания на одноосное сжатие замороженных образцов из речного песка, щебня двух фракций 5–10 и 10–20 мм, их смесей при различной влажности и плотности упаковки частиц геоматериала и льда – основного компонента мерзлого грунта [Курилко, Каймонов, 2004]. Цель проводимых исследований состояла в том, чтобы определить зависимость прочностных характеристик смерзшихся крупнодисперсных горных пород от влажности, гранулометрического состава, плотности упаковки частиц геоматериала и степени засоления.

В этих исследованиях постоянными были приняты: способ изготовления образцов, их размеры и геометрическая форма, температура замораживания, скорость приложения нагрузки, граничные условия, а переменными – гранулометрический состав, влажность, плотность упаковки частиц горной породы, а также искусственное засоление образцов растворами различной концентрации.

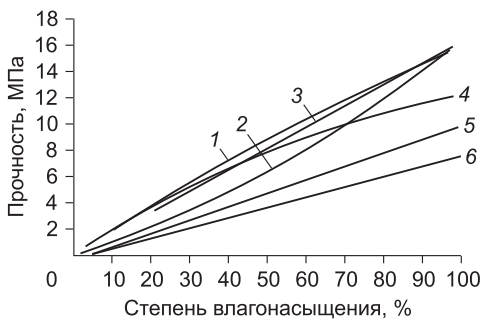


Рис. 1.1. Зависимость прочности мерзлых образцов пород различного гранулометрического состава от степени влагонасыщения:

1 – уплотненный песок; 2 – рыхлый песок; 3 – смесь: 39 % песка и 61 % щебня; 4 – смесь: 14 % песка и 86 % щебня; 5 – щебень фракции 5–10 мм; 6 – щебень фракции 10–20 мм.

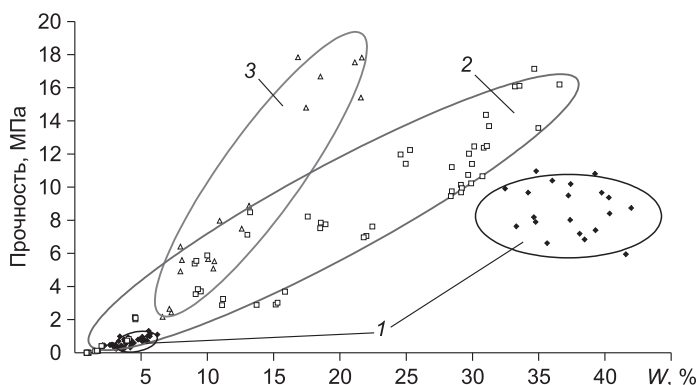


Рис. 1.2. Изменение прочности смерзшихся дисперсных горных пород различного гранулометрического состава от объемного влагосодержания:

1 – щебень фракции 5–20 мм; 2 – песок речной; 3 – смесь: песок речной 38 %, щебень 62 %.

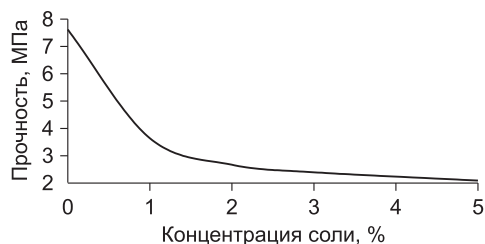
Из приведенных результатов (рис. 1.1–1.3) видно, что прочность образцов возрастает с увеличением влажности и уменьшением размера зерен испытываемых горных пород. Прочность песка при полном влагонасыщении составляет 16 МПа, прочность щебня фракции 5–10 мм – 10 МПа, фракции 10–20 мм – 7,5 МПа. При этом прочность образцов из чистого льда, приготовленного аналогичным методом, не превышала 8 МПа.

Прочность образцов из смеси песка и щебня, содержащая 40 % и более песка при одинаковой степени влагосодержания, имеет прочность, близкую к прочности образцов мерзлого песка. С уменьшением содержания песка в смеси прочность образцов при полном влагонасыщении снижается.

Так смесь, состоящая из 14 % песка и 86 % щебня, имеет прочность 12 МПа. Это среднее значение между прочностью песка и щебня. При влагонасыщенности менее 50 % прочность образцов из этой смеси становится близкой к прочности образцов из песка.

Прочность уплотненных песков выше прочности рыхлых (см. рис. 1.1), причем разность уменьшается по мере увеличения влажности песка. Разница в плотности уплотненных и рыхлых образцов при увеличении влажности также уменьшается. Образцы при полном влагонасыщении имеют близкие значения плотности и, соответственно, прочностные характеристики их также близки.

Рис. 1.3. Изменение предела прочности на одноосное сжатие образцов из щебня 10–20 мм, обработанных растворами различной концентрации.



Щебень фракции 0,5–1,0 см смерзается при минимальной влажности 2,7 % (0,47 МПа); фракции 1,0–2,0 см соответственно 2,2 % (0,472 МПа) (см. рис. 1.2). Речной песок смерзается уже при минимальной влажности 0,89 % (0,01 МПа).

Полученные значения критической влажности смерзания достаточно хорошо согласуются с теоретическими значениями для хаотической упаковки равных шаров [Ломтадзе, 1984], полученными при исследовании смерзания сыпучих материалов. Прочность на одноосное сжатие смерзшегося модельного материала при одинаковых значениях влажности увеличивалась ( $\approx 10\%$ ) при уплотнении образцов на лабораторной виброплощадке.

На наш взгляд, это объясняется увеличением числа контактов между частицами в образце. С увеличением влажности модельного материала прочность образцов при испытании на одноосное сжатие увеличивалась линейно и составляла для щебня фракции 0,5–1,0 см 0,4 МПа при влажности  $\approx 3\%$  и 11 МПа при влажности  $\approx 36\%$ . Для щебня фракции 1,0–2,0 см – 0,4 МПа при влажности  $\approx 2,5\%$  и 8 МПа при влажности  $\approx 37\%$ . Для речного песка – 0,01 МПа при влажности  $\approx 1\%$ , 0,4 МПа при влажности  $\approx 2\%$  и 17 МПа при влажности  $\approx 35\%$ .

Как известно [Вялов, 2000; Суриков, 1978], обработанные солями различной концентрации грунты замерзают при более низких температурах, и долгое время находятся в пластическом состоянии, хорошо поддаются уплотнению механическими способами, не примерзают к поверхности транспортных средств и рабочих органов землеройных машин.

Испытания при одноосном сжатии замороженных образцов, обработанных раствором 1–5%-й соляной кислоты, показывают, что засоление приводит к значительному снижению предела прочности. Так, при концентрации раствора 1 %, отрицательной температуре  $-20\text{ }^\circ\text{C}$  и полном влагонасыщении предел прочности на одноосное сжатие образцов из щебня фракции 10–20 мм снизился почти вдвое (см. рис. 1.3).

При дальнейшем увеличении концентрации соли прочность замороженных образцов продолжала понижаться, но уже не так резко, и при концентрации раствора 5 % составила треть от предела прочности на одноосное сжатие замороженных образцов, не обработанных рассолами.

В то же время, при концентрации раствора 1 %, отрицательной температуре  $-20\text{ }^\circ\text{C}$  и минимальном влагонасыщении ( $\approx 2\text{--}3\%$ ) прочность замороженных образцов не превышала 0,2 МПа, а при дальнейшем увеличении концентрации раствора смерзание не происходило (образцы после выдерживания в морозильной камере более 24 часов продолжали оставаться в сыпучем состоянии). Аналогичная картина характерна и для образцов из щебня фракции 5–10 мм и речного песка.

Результаты исследований позволяют сделать следующие выводы. Присутствие солей даже в незначительном количестве (1–2%-й раствор) резко снижает прочность замороженных горных пород (в два раза и более) и увеличивает порог критической влажности.

Выявленные закономерности позволяют качественно и количественно прогнозировать прочность мерзлых дисперсных геоматериалов в зависимости от их грансостава, плотности упаковки, влажности и степени засоления.

## **1.5. РАЗРАБОТКА РОССЫПНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЯКУТИИ**

### **1.5.1. Краткая характеристика применяемых технологий**

При открытой разработке крупных россыпных месторождений Якутии наиболее распространенными являются дражный, с подготовкой полигонов бульдозерами либо шагающими экскаваторами, экскаваторно-автотранспортный способ, в том числе комбинированный (роторно-конвейерный комплекс – драга) с промывкой песков на сезонных и стационарных обогатительных фабриках (установках). Мелкие месторождения обрабатываются бульдозерным и бульдозерно-гидравлическим способом с промывкой песков на промприборах. Как правило, применяются схемы послойной выемки золото- и алмазонасыщенных песков с выкладкой продуктов переработки за пределы контура запасов или в выработанное пространство.

По результатам анализа<sup>1</sup> группы россыпных месторождений Республики Саха (Якутия) установлено, что 58 % из них разрабатываются открытым раздельным бульдозерным способом, 38 % месторождений – открытым раздельным комбинированным способом. Сущность способа заключается в комбинации бульдозерного и экскаваторно-автотранспортного способов. Используются следующие комплексы оборудования: бульдозер – отвал (промприбор), экскаватор (погрузчик) – автосамосвал – отвал (промприбор), бульдозер – экскаватор (погрузчик) – автосамосвал – отвал (промприбор).

Небольшая доля месторождений (4 %) разрабатывается дражным способом. Россыпи вскрываются шагающими экскаваторами или автомобильно-экскаваторными комплексами, добычные работы осуществляют драги. В качестве исключения необходимо выделить комбинированный способ разработки террасовой части россыпи р. Бол. Куранах (Алданский район), который включает в себя раздельную выемку торфов и песков по поточной технологии.

Вскрышные работы выполняются с применением различных способов разупрочнения (буровзрывной, механическое рыхление, послойная оттайка, гидрооттайка, гидроразмыв и т. д.). Преобладание того или иного способа зависит от свойств пород, рельефа местности и мощности напоров, а также вида применяемой техники.

На более чем 80 % подвергнутых анализу месторождений подготовка горных пород к выемке осуществляется без применения БВР, т. е. только механическим рыхлением. На остальных месторождениях наряду с механическим рыхлением используется буровзрывной способ.

---

<sup>1</sup> Анализ выполнил инженер лаборатории ОГР ИГДС СО РАН А.В. Потехин.

Интенсивность погашения запасов по способам различна и зависит от криогенного состояния россыпи. Многолетнемерзлые породы отрабатываются после естественной или принудительной оттайки, с буровзрывным или механическим рыхлением тяжелыми бульдозерами. При этом весь цикл горных и обогатительных работ трудно- или среднеуправляемый.

Разработка россыпных месторождений в условиях Якутии, как правило, осуществляется сезонно. При этом продолжительность промывочного сезона в разных районах отличается на 30 и более суток и составляет от 100 до 210 сут. Это обусловлено, в первую очередь, жесткими климатическими условиями, а также использованием малоприспособленного к этим условиям горно-добычного и транспортного оборудования [Ермаков и др., 2004].

Анализ продолжительности промывочного сезона по административным районам Республики Саха (Якутия), результаты которого приведены ниже, показал значительный разброс данных:

- Анабарский улус – 93–120 сут.;
- Булунский улус – до 110 сут.;
- Верхоянский улус – около 100 сут.;
- Оймяконский улус – 77–120 сут.;
- Нижнеколымский улус – 44 – 74 сут.;
- Момский улус – 90–110 сут.;
- Ленский улус – 107 сут.;
- Усть-Майский улус – 90–110 сут.;
- Алданский улус – 90–137 сут.;
- Нерюнгринский улус – 110–130 сут.

Большая обводненность месторождений вынуждает горные предприятия прибегать к глубокому водопонижению, применяя послойную отработку готовых к выемке запасов, что усугубляет проблему размещения в выработанном пространстве карьеров хвостов промывки песков, вскрышных пород и приводит к увеличению площадей нарушенных земель.

**Бульдозерный способ** применяется обычно на отработке россыпей с небольшими геометрическими параметрами и запасами песков до 1–2 млн м<sup>3</sup>. Длительность сезона работы бульдозеров 280–300 сут. Производительность на добыче одного комплекса бульдозер – транспорт – обогатительная установка в условиях Севера колеблется от 70 до 380 тыс. м<sup>3</sup> в год.

В табл. 1.12 приведены данные производительности бульдозеров в условиях россыпного месторождения Южной Якутии [Бауск, Вычужин, 2005].

**Экскаваторно-автотранспортный способ** используется как на вскрышных, так и на добычных работах. Отличается высокой мобильностью и слабой зависимостью от геометрических параметров россыпи. Наибольший эффект достигается при ведении круглогодичных вскрышных работ. На добыче песков его эффективность, как правило, ограничена производительностью обогатительных установок. Годовая производи-



Таблица 1.12

**Производительность бульдозеров в условиях Южной Якутии**

Вид работ	T-130*	T-170	T-330	ДЭТ-250	T-500	T-130	T-170
	При транспортировке песков		При транспортировке торфов			При уборке галезфельных отвалов	
Ширина отвала, м	3,35	3,92	4,7	4,5	5,2	3,35	3,92
Путь копания, м	6	6	7	7	7	6	6
Путь транспортирования, м	150	150	75	75	75	40	40
Теоретическая производительность, м <sup>3</sup> /ч	35,55	50,46	182,4	168,2	233,6	106,3	149,4
Техническая производительность, м <sup>3</sup> /ч	30,76	43,66	157,9	145,6	202,1	92,01	129,2
Эксплуатац. производительность, м <sup>3</sup> /см	200,8	285,0	1030	950,2	1319	600,7	843,7

\* Марка бульдозера.

тельность карьера может быть достаточно высокой, но жестко связанной с водообеспечением и подготовкой талых песков. Последнее обстоятельство требует применения дополнительных средств и значительных трудовых и материальных затрат.

Экскаваторно-автомобильные комплексы обеспечивают подачу на промывку 200–350 тыс. м<sup>3</sup> песков, а драги промывают объем 800–900 тыс. м<sup>3</sup>/год [Потемкин, 1995].

**Бульдозерно-гидравлический способ** аналогичен бульдозерному и отличается лишь тем, что применяется на обводненных полигонах.

**Поточная технология** на базе роторно-конвейерных комплексов внедрена на россыпи р. Бол. Куранах.

**Применяемое оборудование.** При производстве вскрышных и добычных работ на россыпных месторождениях республики наибольшее распространение получили тяжелые бульдозеры зарубежных фирм: Komatsu (D-375A, D-355A), Caterpillar (D-9H, D-9L, D-10R, D-10T) и Фиат-Аллис (F-31, F-41). Наряду с зарубежными широко применяются отечественные тяжелые бульдозеры, такие как: Т-50.01, Т-35.01, Т-25.01, ДЭТ-250, Т-500.

На планировочных и прочих вспомогательных работах, а также при подаче песков на промприбор используются бульдозеры легкого и среднего классов Komatsu D-275A, Т-15.01, Т-11.01, Т-170, Т-130.

На бестранспортной вскрыше торфов используются шагающие экскаваторы ЭШ-10/70 и ЭШ-6/45.

В качестве выемочного оборудования применяются экскаваторы (ЭКГ-4,6, ЭКГ-5А, ЭКГ-8И, САТ-325В) и погрузчики (Komatsu WA-500, Komatsu WA-600, Dressta NSW-534, САТ-992, САТ-988, САТ RS-570, САТ RS-750 LC, L-34, К-702).

Для транспортировки вскрышных пород в отвал и песков на обогатительную фабрику или к промприбору используются автосамосвалы БелАЗ-7540, БелАЗ-7547, БелАЗ-548, МАЗ-5516, КрАЗ-256.

При бурении скважин на рыхлении многолетнемерзлых пород используются станки 5СБШ-200, СБШ-250, БТС-150, УРБ-2А-2Д.

При промывке и обогащении песков применяются промприборы ГГМ-3, ПКБШ-100, ПГШ-II-30, ПГШ-II-50, ПГШ-II-75, ПКС-I-700, 10ГРУЛ-8 с КОУ-1200, МПД-6.

### 1.5.2. Основные схемы вскрышных и добычных работ на золото- и алмазоносных россыпях

1. Вскрышные работы проводятся в основном в зимне-весенний период. Рыхление мерзлых торфов большой глубины залегания (более 3 м) производится буровзрывными работами с применением станков 5СБШ-200-36, СБШ-250, БТС-150, УРБ-2А-2Д и др. На участках с небольшой мощностью торфов применяется механическое рыхление мерзлых пород бульдозерно-рыхлительными агрегатами D-355А, D-375, D-455, D-9Н, ДЗ-141ХЛ, Т-35.1 и др.

Погрузка вскрышных пород осуществляется экскаваторами ЭКГ-4, 5, 6, САТ-325В, колесными погрузчиками различных марок (САТ-992, САТ 988, RS-570 и др.) в автосамосвалы БелАЗ-7540, КраЗ, КамАЗ. Широко применяются погрузчики RS-570 фирмы "Катерпиллар" с ковшем емкостью 8 м<sup>3</sup> из-за их высокой маневренности, способности самостоятельно зачищать и планировать подъезд для автосамосвалов.

2. Добычные работы при разработке золотоносных месторождений производятся в основном бульдозерами Т-170 с использованием естественной оттайки песков. Основным условием производительной работы бульдозеров в этом случае является наличие достаточного фронта работ, т. е. объема талых пород.

На алмазоносных россыпях добычные работы с использованием бульдозеров, погрузчиков и автосамосвалов проводятся в основном в два этапа, в зимне-весенний и летний периоды. В зимне-весенний период осуществляется выемка мерзлых песков мощностью до 2,5 м с применением механического или буровзрывного способа рыхления с "выкучива-

Таблица 1.13

#### Оборудование, используемое на вскрышных и добычных работах на россыпных месторождениях Анабарского ГОКа, АК "АЛРОСА"

Оборудование	Режим работы	Сменная производительность, м <sup>3</sup> /см
Экскаватор САТ-325	100 × 2 × 12	1134
Погрузчик RS-570	100 × 2 × 12	2258
САТ-988 (склад)	100 × 2 × 12	1004
Рыхлитель на базе бульдозера D-355А	100 × 2 × 12	1115
Бульдозер D-355А		
зачистка	280 × 2 × 12	1806
подача		1071
Автосамосвалы БелАЗ 7540 (L <sub>max</sub> трансп = 9,0 км)	280 × 2 × 12	70
Бульдозер Т-15	280 × 2 × 12	800

нием" во временный отвал (навал), с последующей погрузкой и вывозкой на рудный склад для дальнейшей их промывки в теплый период.

В летний период добыча песков осуществляется бульдозерами на оттайку с использованием солнечной радиации. Суточная естественная оттайка песков в среднем для северных районов составляет 7–10 см. В связи с этим приходится также производить предварительное механическое рыхление песков на полигоне с использованием тяжелых бульдозеро-рыхлителей для более интенсивной их оттайки. Суточная производительность на единицу в среднем составляет 1000–1200 м<sup>3</sup> (табл. 1.13).

### **1.5.3. Способы разупрочнения многолетнемерзлых горных пород**

Для россыпных месторождений криолитозоны актуальна проблема предварительного разупрочнения многолетнемерзлых пород перед выемкой.

В условиях многолетнемерзлых пород в любом случае необходимо осуществлять предварительную оттайку песков перед обогащением. В настоящее время процесс подготовки песков осуществляется стадийно, с предварительным рыхлением, выкучиванием, складированием, последующей оттайкой, что в условиях ограниченной продолжительности теплого периода не позволяет произвести полную оттайку песков перед подачей на обогащение. Это приводит к дополнительным потерям полезного компонента.

Подготовка многолетнемерзлых пород россыпных месторождений к выемке (разупрочнение или рыхление) – один из наиболее важных технологических процессов, при этом наиболее трудоемкий и входит в общий комплекс открытых горных работ.

В настоящее время на открытой разработке россыпей подготовка пород к выемке осуществляется путем оттаивания мерзлых пород с использованием естественных тепловых факторов (солнечная радиация, тепловая и водно-тепловая мелиорация) и механического рыхления (применение бульдозерно-рыхлительных агрегатов и буровзрывных работ).

Самым дорогостоящим способом является буровзрывное рыхление, самым дешевым – естественное послойное оттаивание. Ниже приведены примерные сравнительные стоимости разработки мерзлых пород с использованием различных способов разупрочнения в относительных величинах по отношению к стоимости разработки по мере естественной оттайки [Потемкин, 1995а]:

- разработка с естественной оттайкой – 1;
- фильтрационно-дренажная оттайка – 1,2–2;
- игловая гидрооттайка – 1,6–2;
- механическое рыхление – 1,5–1,8;
- буровзрывное рыхление – 2,5–3.

На практике основными способами разупрочнения в настоящее время являются буровзрывное рыхление с использованием скважинных зарядов и механическое, с использованием мощных бульдозерно-рыхли-

тельных агрегатов. Широкое применение получила послойная разработка с использованием естественной оттайки. При этом могут применяться и другие способы разупрочнения. В последнее время показана необходимость комплексного использования различных способов подготовки мерзлых пород [Потемкин, 1995б], выбор которых зависит от свойств и состояния массива, а также времени года.

Искусственная оттайка как способ подготовки мерзлых пород к выемке используется редко из-за дороговизны и сложности применения. Только для дражной разработки единственно приемлемым способом разупрочнения является гидравлическая оттайка (игловая гидрооттайка, оттайка паром и подогретой водой) для обеспечения подачи на обогащение песков в талом состоянии.

На настоящее время накоплен достаточно большой опыт применения различных способов разупрочнения и предохранения от промерзания сезонно- и многолетнемерзлых пород россыпных месторождений.

**Буровзрывное рыхление мерзлых пород** применяется в основном только на вскрышных и горно-подготовительных работах. На добычных работах буровзрывное рыхление применимо в отдельных случаях: при достаточно большой мощности песков и расположении их в русловой части водотоков. Разработка песков осуществляется главным образом в зимне-весенний период с транспортировкой на промсклад (отвал) и последующей промывкой летом по мере оттайки. На алмазоносных россыпях буровзрывное рыхление на добычных работах применяется в исключительных случаях (расположение блоков в русле водоисточника), так как взрывные работы приводят к нарушению целостности кристаллов алмазов.

**Механическое рыхление бульдозерно-рыхлительными агрегатами** достаточно широко применяется при разработке крепких (мерзлых, глинистых, цементированных) и рыхлых пород с использованием специальных мощных бульдозерно-рыхлительных агрегатов с навесными рыхлителями, имеющими обычно 1–3 зуба (стойки).

Основные исследования по определению параметров и производительности механического рыхления многолетнемерзлых пород выполнены институтом ВНИИ-1, г. Магадан [Сулин, 1974]. Получены экспериментальные данные по рыхлению пород различного состава, установлено, что наибольшая производительность бульдозерно-рыхлительных агрегатов достигается при рыхлении мерзлой корки (до 1000 м<sup>3</sup>/ч для наиболее мощных машин). При рыхлении массива многолетнемерзлых пород их производительность снижается в 10–12 раз и более [Потемкин, 1995б].

На основе многолетнего опыта разработки россыпей, а также исследований свойств пород по критерию скорости распространения акустических волн, произведена оценка производительности бульдозерно-рыхлительных агрегатов на разработке многолетнемерзлых пород, составлена классификация пород по производительности рыхления (табл. 1.14) [Обидин, Дюрягин, 1987].

Таблица 1.14

**Техническая производительность рыхлительных агрегатов  
тягового класса 35 тс при рыхлении многолетнемерзлых горных пород**

Характеристика разрабатываемой горной породы	Температура, °С	Влажность (льдонасыщенность), %	Технич. произв. агрегата, м <sup>3</sup> /ч
Илисто-глинистые отложения с включениями гальки и щебня	-6...-8	до 25	143,2
Илисто-глинистые отложения	-4...-6	до 25	154,3
То же, с включением щебня до 20 %	-10...-12	до 25	112,5
То же, с включением гальки и щебня до 10 %	0...-2	до 25	274,8
То же, с включением гальки и щебня до 20 %	-1...-3	до 40	262,4
То же, с прослойками и линзами льда	-4...-6	до 40	189,8
Илисто-глинистые отложения	-12...-14	до 40	139,6
То же, с включением гальки и щебня до 20 %	-12...-14	до 30	88,4
То же, с прослойками и линзами льда	0...-2	до 50	306,6
Илисто-глинистые отложения	-8...-10	до 40	178,2
Галечно-щебнистые отложения с супесчаным заполнителем	0...-2	до 20	246,0
Гравийно-галечниковые отложения с песчаным заполнителем	0...-2	до 15	254,7
То же	-4...-6	до 20	97,2
Галечно-щебенистые отложения с супесчано-суглинистым заполнителем	-5...-7	до 20	34,1
То же	-2...-4	до 20	97,1
То же	-2...-4	до 20	108,3
Гравийно-галечниковые отложения с супесчано-суглинистым заполнителем	-1...-3	до 15	147,4
То же	0...-2	до 25	244,0
То же	0...-2	до 20	252,8
То же, с супесчаным заполнителем, с включением валунов средних размеров до 30 %	-1...-3	до 20	155,1
То же, с супесчаным заполнителем, с включением валунов до 20 %	0...-2	до 20	247,6
То же	-3...-5	до 25	96,8
То же, с песчаным заполнителем, с включением валунов средних и крупных размеров до 30 %	-2...-4	до 10	122,1
То же, с супесчано-суглинистым заполнителем, с включением средних валунов до 30 %	-4...-6	до 20	48,7

Из приведенных данных видно, что при определенных условиях, и особенно при низких температурах пород, наблюдается резкое снижение производительности рыхления.

В табл. 1.15 представлены нормы выработки и нормы времени на рыхление мерзлого массива при температуре наружного воздуха  $t = -40$  °С [Единые нормы..., 1991]. Рыхление мерзлой корки пород мощ-

**Нормы выработки и нормы времени  
на рыхление мерзлого массива бульдозером-рыхлителем Д-355А**

Расстояние рыхления (длина заезда), м	Нормы выработки, м <sup>3</sup>		Нормы времени на 100 м <sup>3</sup> , маш. час.	
	мерзлые породы	вялая мерзлота	мерзлые породы	вялая мерзлота
До 30–35	104,0	153,0	0,967	0,656
36–45	110,0	176,0	0,911	0,569
46–60	121,0	194,0	0,826	0,517
61–80	132,0	210,0	0,763	0,477
81–100	140,0	224,0	0,716	0,448

Примечание. При количестве рыхлительных стоек 1 и глубине рыхления 0,42–0,5 м.

ностью более 1,0 м нормируется как рыхление мерзлого массива. Рыхление мерзлых песков в период промывочного сезона нормируется как вялая мерзлота.

**Водно-тепловая мелиорация.** Вследствие высокой энергоемкости разрушения мерзлых пород механическим рыхлением применение способов подготовки пород к выемке, использующих естественное атмосферное тепло, является более предпочтительным.

Наиболее часто применяется способ водно-тепловой мелиорации, заключающийся в затоплении участка перед наступлением холодов, с уборкой льда (или воды) в начале теплого периода. При этом толщина слоя воды должна быть равна или больше толщины льда.

Наряду с сезонным применением водно-тепловой мелиорации представляют интерес естественные процессы аналогичного типа, возникающие, например, на водотоках с малыми расходными характеристиками при зимнем промерзании, весенней оттайке и практически полном уходе воды в летний период. Именно в таких местах (в долинах ручьев и мелких рек) часто располагаются россыпные месторождения золота. Следовательно, фактор естественного разупрочнения пород таких месторождений может иметь практическое значение при выборе оборудования и способа разработки.

#### 1.5.4. Естественная оттайка многолетнемерзлых пород

Оттаивание мерзлых пород под действием естественного тепла (солнечной радиации) – наиболее простой и дешевый способ разупрочнения многолетнемерзлых пород [Павлов, Оловин, 1979; Потемкин, 1991]. В сочетании с послыйной разработкой (с систематическим удалением оттаявшего слоя) он широко применяется при открытой разработке многолетнемерзлых россыпных месторождений. В общем объеме вскрышных и добычных работ он составляет более 60 %, а при разработке – промывке

песков – практически все 100 %. Под воздействием солнечного тепла оттаивают мерзлые породы любого состава, хотя скорость оттайки в зависимости от конкретных условий может меняться от 5 до 12–16 см/сут.

По опытным наблюдениям, суммарная глубина оттаивания и средняя скорость ее в сутки составили:

– при ежедневном снятии талого слоя – 10,62 и 10,4 см соответственно;

– при снятии талого слоя 1 раз в 3 сут. – 6,24 и 6,1 см;

– при снятии талого слоя 1 раз в 5 сут. – 5,31 и 5,2 см.

На основании опытных данных по северо-востоку России принимаются следующие скорости оттаивания песков (торфов) при льдистости 5–20 % и при ежедневном снятии талого слоя (табл. 1.16).

Управление процессом оттаивания осуществляется путем регулирования условий теплообмена на поверхности пород. Комплекс соответствующих мероприятий по интенсификации естественного оттаивания принято называть поверхностной тепловой мелиорацией.

Таблица 1.16

**Скорости оттаивания песков (торфов)**

Период оттаивания	Скорость оттаивания (см) в течение		
	дня	ночи	суток
	Среднее оттаивание		
Май	6,4	0,5	6,9
Июнь	10,8	4,1	14,9
Июль	11,9	5,1	17,0
Август	9,2	1,4	10,6
Сентябрь	3,4	0,05	3,5
В среднем за сезон	8,3	2,2	10,5
	Максимальное оттаивание		
Май	7,0	2,5	9,5
Июнь	16,0	8,0	24,0
Июль	16,0	8,0	24,0
Август	17,6	5,0	22,5
Сентябрь	7,5	0	7,5
В среднем за сезон	12,8	4,7	17,5
	Минимальное оттаивание		
Май	2,5	0,0	2,5
Июнь	7,0	2,0	9,0
Июль	5,5	0,0	5,5
Август	5,0	0,2	5,2
Сентябрь	0,7	0,0	0,7
В среднем за сезон	4,2	0,4	4,6

Типы сезонного оттаивания многолетнемерзлых пород разделяются по среднегодовой температуре, годовой амплитуде температурных колебаний (под растительным и снежным покровами), литологическим особенностям и суммарной льдистости отложений [Потемкин, 1995б].

Наиболее тесная связь прослеживается между мощностью слоя сезонного оттаивания и литологическими особенностями пород. Так, переувлажненный торф (льдистость 600–800 кг/м<sup>3</sup>) оттаивает на глубину 0,2–0,4 м, льдонасыщенные суглинки – на глубину 0,7–0,8 м, а гравийно-галечные породы с суммарной льдистостью около 1/3 полной влагоемкости – на глубину 3–3,5 м. Наличие растительности (особенно мохового покрова) значительно уменьшает глубину естественного оттаивания пород. На участках, где развиты влажные сфагновые мхи, граница сезонного оттаивания обычно не опускается ниже мохового слоя. Зависимость мощности слоя сезонного оттаивания от экспозиции склонов хорошо прослеживается на поросших редким кустарником или вовсе лишенных растительности участках. На южных склонах участков глубина оттаивания пород в 2–2,5 раза больше, чем на северных. Моховой покров почти полностью нивелирует эти различия [Потемкин, 1995б].

При разработке многолетнемерзлых россыпей естественное оттаивание обеспечивает выполнение основного объема земляных работ. Естественное оттаивание может осуществляться с накоплением талого слоя. После того как оттайка прекратится, для разработки оттаявшего слоя используется землеройная техника. Интенсивность такой оттайки значительно меньше, но при благоприятных условиях к концу теплого периода мощность талого слоя может достигать 3–4 м. Основным недостатком способа является зависимость от погодных условий.

Талый слой накапливают на участках, эксплуатация которых намечается в последующие годы, и в случае когда мощность наносов меньше мощности сезонного оттаивания. Часто мощность россыпи близка к максимальной мощности оттаивания. Тогда до начала летнего сезона проводят мероприятия поверхностной тепловой мелиорации. Простейшим из этих мероприятий является механическая уборка снежного покрова (что обеспечивает оттаивание галечников в течение мая на 0,7–0,8 м) или зачернение его поверхности угольной крошкой, сажей и шлаком с гравием. Оптимальный расход угольной крошки – около 300 г/м<sup>2</sup>. Благодаря зачернению поверхности снежного покрова, его отражательная способность снижается в три раза, и оттаивание снега ускоряется на 3–4 недели. Влияние снежного покрова на естественное оттаивание различно. Следует иметь в виду, что ранняя уборка снега способствует переохлаждению верхних слоев горных пород. В зимнее время снег, являясь хорошим теплоизолятором, препятствует охлаждению пород. Весной он, обладая высокой отражательной способностью, не дает солнечной радиации проникнуть на поверхность пород и задерживает их оттаивание. Так, в центральных районах р. Колымы снег целесообразно убирать во второй половине апреля [Потемкин, 1995б].



Другими мероприятиями для повышения интенсивности естественной оттайки мерзлых пород могут быть такие, как придание мерзлой породе зернистой структуры за счет неглубокого механического рыхления, покрытие оттаиваемых участков пленочным материалом.

Скорость оттаивания заметно увеличивается после удаления растительности, кустарников, мха, почвенно-растительного слоя, гумусированных супесей и мелкозернистых песков. Почти во всех долинах Северо-востока распространены гравийно-галечные породы, перекрытые слоем мелкозернистой оторфованной супеси мощностью 0,5–1 м с моховым покровом толщиной 10–15 см. В естественных условиях глубина оттаивания едва достигает поверхности гравийно-галечных пород. В случае предварительной уборки почвенно-растительного слоя и мелкозема гравийно-галечные породы успевают за лето оттаять на глубину 2–3 м [Потемкин, 1995б].

Идеальное использование тепла солнечной радиации и атмосферного воздуха имело бы место при непрерывном удалении талого слоя с поверхности полигона. Следует отметить, что проблема увеличения скорости послойной разработки наиболее остро стоит для россыпей, наносы которых представлены льдонасыщенными илами значительной мощности. Послойная бульдозерная выемка этих пород малоэффективна, так как в процессе оттаивания они приобретают текуче-пластичную консистенцию и расползаются при разработке их бульдозерами.

---

---

## 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ АКТИВНОГО ВЛИЯНИЯ НА ИЗМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД

### 2.1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА С МАССИВОМ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

На россыпных месторождениях криолитозоны, ввиду постоянно изменяющегося термомеханического состояния массива, многие технологические вопросы весьма сложно решить экспериментальным путем, вследствие чего для этого была применена разработанная математическая модель.

Она используется для расчета теплового режима массива многолетнемерзлых горных пород россыпных месторождений криолитозоны при различных исходных данных теплофизических свойств пород, а также при использовании дополнительных технологических мероприятий (снятие напочвенного покрова, водно-тепловая мелиорация и др.) Отдельные особенности расчетов в конкретных условиях месторождений описаны в соответствующих параграфах текста.

Модель учитывает теплофизические характеристики грунтов, температуру и влажность пород, неоднородное строение массива (слоистость) пород, изменение температуры наружного воздуха, скорость ветра, высоту снежного покрова, тепловой поток от солнечной радиации, термическое сопротивление теплоизоляции, а также особенности технологии отработки песков дражных полигонов, возведения дамб и плотин способом послонного намораживания, количество проливаемой воды и т. д.

Процесс распространения тепла в массиве горных пород с учетом фазовых переходов влаги описывается следующим уравнением [Тихонов, Самарский, 1977]:

$$\begin{aligned} [C(T) + L_1 \cdot W \cdot \rho \cdot \delta(T - T^*)] \frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right], \\ C(T) &= \begin{cases} c_1 \rho_1, & T < T^*, \\ c_2 \rho_2, & T > T^*, \end{cases} \quad \lambda(T) = \begin{cases} \lambda_1, & T < T^*, \\ \lambda_2, & T > T^*, \end{cases} \\ &0 \leq x \leq H, \quad t > 0, \end{aligned} \quad (2.1)$$

где  $T$  – температура породы, °C;  $T^*$  – температура фазовых переходов влаги в породе, °C;  $t$ ,  $x$  – временная ( $c$ ) и пространственная координаты (м);

$L_1$  – скрытая теплота плавления (замерзания) льда (воды), Дж/кг;  $W$  – влажность породы, доли единицы;  $\rho$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $c_1, \rho_1, \lambda_1$  ( $c_2, \rho_2, \lambda_2$ ) – удельная теплоемкость (Дж/(кг·К)), плотность (кг/м<sup>3</sup>) и коэффициент теплопроводности (Вт/(м·К)) соответственно для мерзлых (талых) пород;  $\delta(T - T^*)$  – функция Дирака.

Фазовые переходы влаги в породе учитываются с помощью  $\delta$ -функции Дирака.

Для решения одномерной задачи промерзания–протаивания в постановке вида (2.1) используем численные методы сквозного счета со сглаживанием коэффициентов [Самарский, Моисеенко, 1965; Самарский, Николаев, 1978; Тетельбаум, 1990, 1992]. Как известно, существует множество вариантов аппроксимации эффективной теплоемкости, но широкое применение получили методы, в которых влияние  $\delta$ -функции Дирака распространяется только на две смежные точки пространственной сетки и вариант, когда эффективная теплоемкость непрерывна в точках  $T^* - \Delta T$  и  $T^* + \Delta T$ .

Для численного решения двумерной задачи применим общеизвестный метод сглаживания [Самарский, Моисеенко, 1965]:  $\delta$ -функция Дирака приближенно заменяется  $\delta$ -образной функцией  $\delta(T - T^*, \Delta T)$ , отличной от нуля на интервале  $(T^* - \Delta T, T^* + \Delta T)$  и удовлетворяющей условию нормировки:

$$\int_{T^* - \Delta T}^{T^* + \Delta T} \delta(T - T^*, \Delta T) dT = 1. \quad (2.2)$$

Вводится эффективная теплоемкость:

$$\tilde{C}(T) = C(T) + L_1 W \rho \delta(T - T^*, \Delta T). \quad (2.3)$$

Интегрируя данное уравнение в пределах  $(T^* - \Delta T, T^* + \Delta T)$ , получаем следующее условие постоянства энтальпии на интервале сглаживания:

$$\int_{T^* - \Delta T}^{T^* + \Delta T} \tilde{C}(T) dT = L_1 W \rho + (c_1 \rho_1 + c_2 \rho_2) \cdot \Delta T. \quad (2.4)$$

Эффективную теплоемкость выбираем таким образом, чтобы выполнялось условие (2.4) и запишем в следующем виде [Кудрин, Махоткин, 1970]:

$$\tilde{C}(T) = \begin{cases} c_1 \rho_1, & T \leq T^* - \Delta T; \\ \frac{c_1 \rho_1 + c_2 \rho_2}{2} + \frac{c_1 \rho_1 - c_2 \rho_2}{2 \Delta T} (T - T^*) + \\ + \frac{L_1 \cdot W \cdot \rho}{\Delta T} \left( 1 - \frac{|T - T^*|}{\Delta T} \right), & |T - T^*| < \Delta T; \\ c_2 \rho_2, & T \geq T^* + \Delta T. \end{cases} \quad (2.5)$$

Разрывность коэффициента теплопроводности устраняется путем соединения точек  $(\lambda_1, T^* - \Delta T)$  и  $(\lambda_2, T^* + \Delta T)$  прямой линией:

$$\tilde{\lambda}(T) = \begin{cases} \lambda_1, T \leq T^* - \Delta T; \\ \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2} + \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2\Delta T}(T - T^*), |T - T^*| < \Delta T; \\ \lambda_2, T \geq T^* + \Delta T. \end{cases} \quad (2.6)$$

Таким образом, уравнение (2.1) при численной реализации заменяется на уравнение:

$$\tilde{C}(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \tilde{\lambda}(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right], \quad 0 \leq x \leq H, \quad t > 0. \quad (2.7)$$

В начальный момент времени задается распределение температур:

$$T(x, 0) = T_0, \quad 0 \leq x \leq H. \quad (2.8)$$

На дневной поверхности задается граничное условие III рода:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha(T - T_a(t)) - Q_R + L_2 E, \quad x = 0, \quad t > 0, \quad (2.9)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплообмена воздуха с грунтом, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $Q_R$  – тепловой поток от солнечной радиации, Вт/м<sup>2</sup>;  $L_2$  – удельная теплота испарения воды, Вт·с/кг;  $E$  – интенсивность испарения, равная плотности диффузионного потока влаги в атмосферу, кг/(м<sup>2</sup>·с).

Годовой ход среднемесячной температуры воздуха  $T_a$  может быть аппроксимирован гармонической функцией, например косинусоидой [Павлов, 1980]:

$$T_a(t) = A_a \cdot \cos[2 \cdot \pi \cdot t/t_0 + \varepsilon] + T_{0,a}, \quad t > 0, \quad (2.10)$$

где  $A_a$  – годовая амплитуда колебаний температуры воздуха, °С;  $T_{0,a}$  – средняя годовая температура воздуха, °С;  $t$  – время;  $t_0$  – период колебаний ( $t_0 = 1$  год);  $\varepsilon$  – начальная фаза колебаний.

На глубине массива горных пород, превышающей глубину затухания колебаний температуры, температура принимается равной естественной температуре пород:

$$T(H, t) = T_e, \quad t > 0. \quad (2.11)$$

Коэффициент теплообмена  $\alpha$  атмосферного воздуха с поверхностью массива горных пород в зимний период зависит от толщины снежного покрова [Куртнер, Чудновский, 1969] и определяется по формуле:

$$\alpha = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_0} + \frac{\delta_s}{\lambda_s}}, \quad (2.12)$$

где  $\delta_s, \lambda_s$  – толщина (м) и коэффициент теплопроводности снега (Вт/(м·К));  $\alpha_0$  – эмпирический коэффициент конвективного теплообмена (Вт/(м<sup>2</sup>·К)) рассчитываемый по формуле [Куртнер, Чудновский, 1969]:

$$\alpha_0 = \begin{cases} 6,16 + 4,19 \cdot v, & 0 < v \leq 5; \\ 7,56 \cdot v^{0,78}, & 5 < v \leq 30; \end{cases} \quad (2.13)$$

где  $v$  – скорость ветра, м/с.

Для расчета  $\alpha$  необходимы данные по месяцам о коэффициенте теплопроводности ( $\lambda_s$ ) и высоте ( $\delta_s$ ) снежного покрова. На основе большого объема экспериментальных материалов в работе [Павлов, 1980] получены следующие осредненные зависимости для нахождения расчетных значений  $\lambda_s$ :

$$\lambda_s = \begin{cases} 1,165 \cdot \rho_s, & T_s > -10^\circ\text{C}; \\ 1,035 \cdot \rho_s, & -10^\circ\text{C} \geq T_s \geq -20^\circ\text{C}; \\ 0,907 \cdot \rho_s, & T_s < -20^\circ\text{C}; \end{cases} \quad (2.14)$$

где  $T_s, \rho_s$  – соответственно температура и плотность снежного покрова, г/см<sup>3</sup>.

Расчет плотности снега производится по формуле Э.Г. Коломыца [Гаврильев, 2004]:

$$\rho_s = 0,182 + 0,18 \cdot \delta_s. \quad (2.15)$$

Необходимо отметить, что плотность снега не является постоянной величиной и быстро меняется в период весеннего таяния: от 0,35 г/см<sup>3</sup> в начале, 0,45 г/см<sup>3</sup> в середине и 0,6 г/см<sup>3</sup> в конце снеготаяния.

Тепловой поток от солнечной радиации  $Q_R$  рассчитывается по формуле [Перльштейн, 1979]:

$$Q_R = Q_c (1 - A) + I_a - \delta_{gr} \sigma_{gr} (T_{sur} + 273)^4, \quad (2.16)$$

где  $Q_c$  – суммарная коротковолновая радиация, Вт/м<sup>2</sup>;  $A$  – альbedo поверхности (ее отражательная способность);  $I_a$  – длинноволновое излучение атмосферы, Вт/м<sup>2</sup>;  $\delta_{gr}$  – коэффициент серости поверхности (относительная излучательная способность или степень черноты, для большей части природных поверхностей близкая к 0,9);  $\sigma_{gr} = 5,76 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $T_{sur}$  – температура на поверхности массива горных пород, °С.

Для решения задачи теплообмена массива горных пород с атмосферным воздухом воспользуемся методом конечных разностей, а именно численными методами сквозного счета со сглаживанием коэффициентов [Будак и др., 1965; Самарский, Моисеенко, 1965; Самарский, 1983, 2003].

Рассмотрим алгоритм численной реализации описанной выше системы уравнений (2.5)–(2.11). Для ее решения введем равномерную сетку по времени:

$$\omega_\tau = \{t_j = j \cdot \tau, \quad j=0,1,2, \dots; \quad \tau > 0\}. \quad (2.17)$$

На отрезке  $0 \leq x \leq H$  введем равномерную сетку с шагом  $h$ :

$$\bar{\omega}_x = \{x_i = i \cdot h, \quad h = H/N, \quad i = \overline{0, N}\}. \quad (2.18)$$

Применяется чисто неявная схема, которая обладает свойством безусловной равномерной сходимости [Самарский, 1983]. Система разностных уравнений решается методом простой итерации с применением метода прогонки. Уравнение теплопроводности и граничные условия аппроксимируем чисто неявной схемой.

Пользуясь интегро-интерполяционным методом [Самарский, 1983], можно получить следующую схему для уравнения (2.7):

$$C(T_i, x_i) \frac{T_i - \check{T}_i}{\tau} = a_{i+\frac{1}{2}} \frac{T_{i+1} - T_i}{h^2} - a_{i-\frac{1}{2}} \frac{T_i - T_{i-1}}{h^2}, \quad i = \overline{1, N-1}, \quad (2.19)$$

$$a_{i+\frac{1}{2}} = \frac{2\lambda(T_i, x_i)\lambda(T_{i+1}, x_{i+1})}{\lambda(T_i, x_i) + \lambda(T_{i+1}, x_{i+1})}. \quad (2.20)$$

Здесь  $T_i = T_i^{j+1}$ ;  $\check{T}_i = T_i^j$ .

Аппроксимируем граничное условие (2.9):

$$C(T_0, x_0) \frac{T_0 - \check{T}_0}{\tau} = \frac{1}{h} \left( a_{\frac{1}{2}} \frac{T_1 - T_0}{h} - \alpha(T_0 - T_2) \right), \quad (2.21)$$

граничное условие (2.11):

$$T_N = T_e. \quad (2.22)$$

Разностная схема (2.19)–(2.22) аппроксимирует уравнения (2.7), (2.9), (2.11), имея погрешность [Самарский, 1983]  $O(\tau + h^2)$  и обладает свойствами абсолютной устойчивости, монотонности и консервативности.

Разностная схема (2.19)–(2.22) нелинейна относительно  $T_i$ , так как коэффициенты  $a_{i \pm 1/2}$  зависят от  $T_i$  и для нахождения ее значений на каждом временном шаге  $\tau$  необходимо организовать итерационный процесс, который строится следующим образом [Самарский, 1983, 2003]. В качестве нулевого приближения  $T_i^0$  берется значение  $T_i$  с известного предыдущего слоя и  $s$ -е приближение находится по схеме:

$$C(T_i^s, x_i) \frac{T_i^{s+1} - \check{T}_i^s}{\tau} = a_{i+\frac{1}{2}}^s \frac{T_{i+1}^{s+1} - T_i^{s+1}}{h^2} - a_{i-\frac{1}{2}}^s \frac{T_i^{s+1} - T_{i-1}^{s+1}}{h^2}, \quad i = \overline{1, N-1}, \quad (2.23)$$

$$a_{i+\frac{1}{2}}^s = \frac{2\lambda(T_i^s, x_i)\lambda(T_{i+1}^s, x_{i+1})}{\lambda(T_i^s, x_i) + \lambda(T_{i+1}^s, x_{i+1})}, \quad (2.24)$$

$$C(T_0^s, x_0) \frac{T_0^{s+1} - \check{T}_0}{\tau} = \frac{1}{h} \left( a_2^s \frac{T_1^{s+1} - T_0^{s+1}}{h} - \alpha(T_0^{s+1} - T_2) \right), \quad (2.25)$$

$$T_N^{s+1} = T_e, \quad (2.26)$$

которая линейна относительно  $T_i^{s+1}$ . На каждом итерационном шаге значения  $T_i^{s+1}$  находятся из системы (2.23)–(2.26) методом прогонки.

Процесс итераций проводится до тех пор, пока не выполнится условие:

$$\max_i |T_i^{s+1} - T_i^s| \leq \varepsilon, \quad (2.27)$$

где  $\varepsilon$  – наперед заданная точность вычислений.

## 2.2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ НА ПРИМЕРЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ НЕРСКОЕ

### 2.2.1. Характеристика месторождения

Месторождение Нерское расположено в 20 км от поселка Усть-Нера – административного центра Оймяконского улуса, в нижнем течении долины р. Нера.

Климат района месторождения Нерское резко континентальный, с продолжительной суровой зимой и коротким, но теплым летом. Среднесуточная температура в июле достигает +25–30 °С, в январе–декабре до –68 °С. Количество атмосферных осадков невелико и составляет 200–220 мм.

В плане россыпь лентообразная. Отношение длины россыпи к ее ширине составляет примерно 6:1. Промышленная россыпь протягивается непрерывно на протяжении 5 км. Ширина россыпи в нижней части максимальная 1040 м, далее к центральной части уменьшается до 880–960 м, затем опять расширяется до 1040 м и в верхней части уменьшается до 160 м.

Почвенно-растительный слой имеет мощность 0,2 м, в русловой части долины отсутствует. Мощность аллювия в россыпи колеблется от 6,5–9,5 м, в единичных случаях снижается до 5,5 м или повышается до 11–14 м. Мощность торфов изменяется от 4,85 до 14,2 м, составляя в среднем 7,82 м (по россыпи, не затронутой разработкой).

Мощность пласта песков по россыпи колеблется от 0,20 до 1,60 м, составляя в среднем 0,72 м (по неотработанной части россыпи). Преобладают выработки с мощностью пласта 0,25–0,80 м (70,8 %).

Среднее содержание золота по отдельным выработкам, входящим в промышленный контур, колеблется от 0,39 до 8,54 г/м<sup>3</sup>, составляя в среднем 1,42 г/м<sup>3</sup> (по неотработанной части россыпи).

Значительная эффективность естественного теплоизолятора (напочвенного мохово-торфяного покрова) позволяет предположить, что при его снятии произойдут наиболее существенные изменения теплового режима.

Выполненное моделирование (п. 2.2.2) температурного режима пород россыпи Нерская при предварительном снятии напочвенного покрова (НП) показало, что в естественном состоянии величина оттайки составляет 0,5 м, а после удаления напочвенного покрова – 1,55 м.

Даже с учетом повышения температуры в слоях, непосредственно прилегающих к талой зоне, возможная глубина разупрочнения недостаточна.

Другой возможный вариант – способ водно-тепловой мелиорации, заключающийся в затоплении участка перед наступлением холодов, с уборкой льда (или воды) в начале теплого периода. При этом толщина слоя воды должна быть равна или больше толщины льда.

Для оценки эффективности применения в данных условиях способа водно-тепловой мелиорации выполнено моделирование теплового режима россыпи при заливке слоями воды различной глубины и при разных структурах массива (п. 2.2.3).

### 2.2.2. Температурный режим ММП при предварительном снятии напочвенного покрова

Результаты моделирования теплового состояния массива ММП месторождения Нерское, выполненного с использованием математической

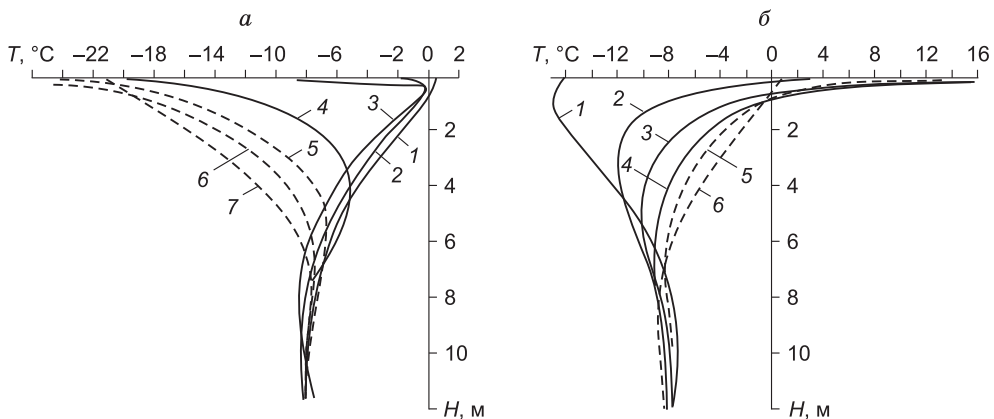


Рис. 2.1. Динамика температурного поля в массиве ММП (мох + торфа + песок) по месяцам:

а: 1 – сентябрь, 2 – октябрь, 3 – ноябрь, 4 – декабрь, 5 – январь, 6 – февраль, 7 – март; б: 1 – апрель, 2 – май, 3 – июнь, 4 – июль, 5 – август, 6 – сентябрь.



модели (п. 2.1), приведены на рис. 2.1–2.4. Из них видно, что при наличии НП за период положительных температур воздуха оттайка ММП достигает всего 0,5 м (см. рис. 2.4). Колебания температуры грунта происходят до глубины 6 м, далее она постоянна и составляет около  $-8,5^{\circ}\text{C}$ . При снятии НП (мха) температура в массиве за пределами слоя сезонных колебаний повышается до  $-4,5^{\circ}\text{C}$  и глубина полной оттайки увеличивается до 1,55 м. Величина разупрочненного слоя недостаточна для эффективной работы технологического оборудования в данных условиях [Федотченко и др., 1987].

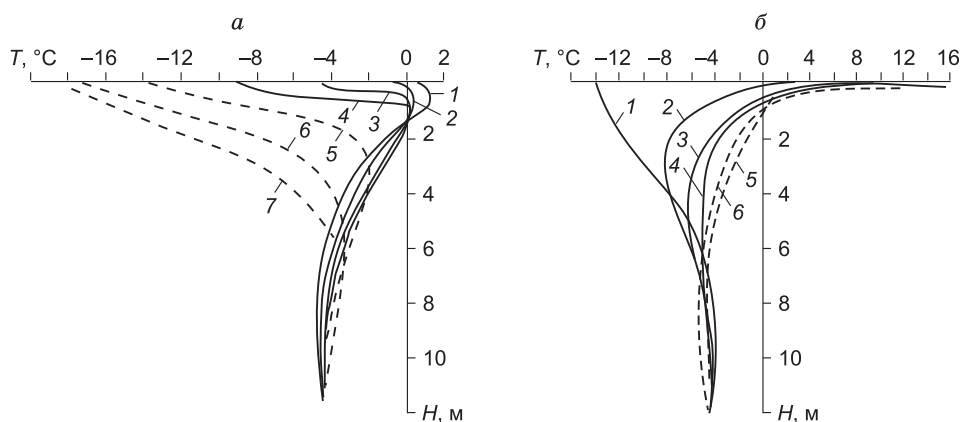


Рис. 2.2. Динамика температурного поля в массиве ММП (торфа + пески) по месяцам.

Усл. обозн. см. на рис. 2.1.

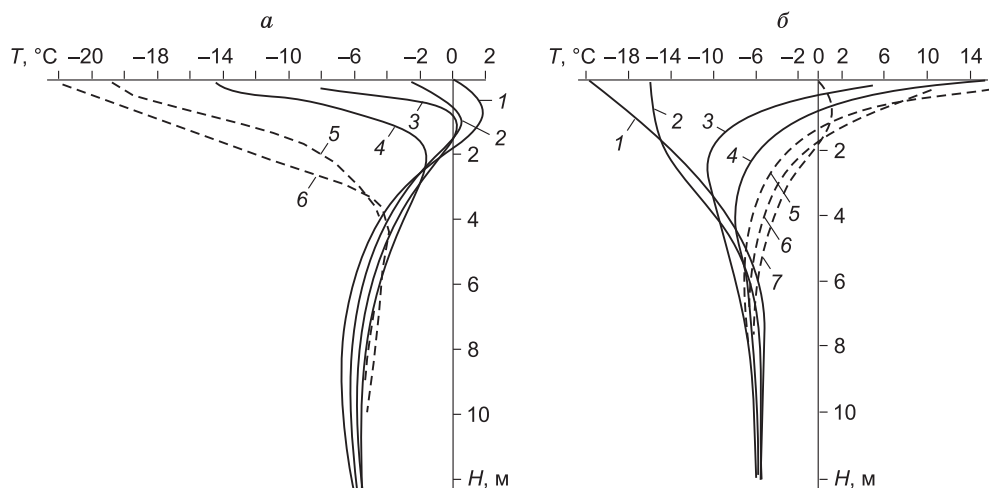


Рис. 2.3. Динамика температурного поля в массиве ММП (пески):

*а:* 1 – сентябрь, 2 – октябрь, 3 – ноябрь, 4 – декабрь, 5 – январь, 6 – февраль; *б:* 1 – март, 2 – апрель, 3 – май, 4 – июнь, 5 – июль, 6 – август, 7 – сентябрь.

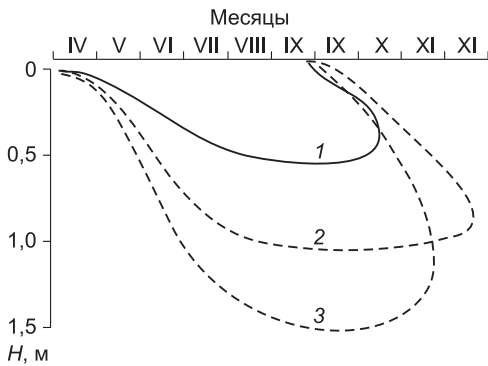


Рис. 2.4. Образование талых зон в ММП.

1 – мох + торфа + пески; 2 – торфа + пески; 3 – пески. В сентябре (IX) и ноябре (XI) принято по две расчетные точки, что связано с появлением и изменением снежного покрова.

### 2.2.3. Температурный режим ММП при водно-тепловой мелиорации

При расчете было принято, что данная структура с водяным слоем существовала достаточно большое количество лет, примерно 15–20. "Уборка" слоя льда производилась после его оттайки.

Основными составляющими структуры массива приняты породы, наиболее распространенные на россыпных месторождениях данного района и условно названные "торфа" и "пески". Мохово-торфяной слой (НП) предварительно убирался. Толщина слоя воды принималась равной 0,4; 0,8 и 1,2 м, что соответствует действительным глубинам водотока. Таким образом, к расчету были приняты следующие комбинации составляющих структуры массива:

- торфа + пески + вода 0,4 м;
- торфа + пески + вода 0,8 м;
- торфа + пески + вода 1,2 м;
- пески + вода 0,4 м;
- пески + вода 0,8 м;
- пески + вода 1,2 м.

Счет проводился по программе, реализующей одномерную имитационную математическую модель техногенного термокарста, вызванного удалением НП с одновременным (в общем случае) обводнением территории [Фельдман, 1984; Фельдман и др., 1992; Шендер и др., 1990]. Климатические условия приняты неизменными из года в год. В конце зимы "снимается" НП, и оголенный грунт "заливается" слоем воды заданной (в том числе равной нулю) глубины  $h_{в.нач.}$  и с нулевой начальной температурой. Это начальные условия второго этапа – воспроизведения собственно термокарстового процесса. Далее (в общем случае) скачкообразно изменяются величины  $h_{СН}^{max}$  соответственно изменению условий теплообмена на дневной поверхности в связи с появлением водоема.

Глубина сезонного протаивания льдонасыщенных слоев с каждым годом возрастает. Слои подвергаются просадке, а находящаяся в них влага отжимается на поверхность, увеличивая тем самым водный слой. В за-

висимости от конкретных климатических, гидрологических и мерзлотных условий сезонное протаивание либо стабилизируется, но с более высокой среднегодовой температурой вечномерзлых горизонтов, либо переходит в многолетнее. Модель предполагает, что льдонасыщенные горизонты лежат заведомо ниже подошвы деятельного слоя, т. е. в естественных условиях осадка грунта не происходит.

Часть сетки, соответствующая собственно грунту, постоянна, т. е. координаты ее узлов, число  $n_{\text{мат}_2}$  и размеры блоков неизменны. При каждой осадке определенный участок среды сжимается, а физические точки его и всех нижележащих горизонтов вместе со своими температурами поднимаются. Для отражения в численной схеме такой механической деформации грунта введена сетка, жестко связанная не с пространством, а с заполняющим его веществом. Перед каждым очередным подсчетом осадки сетка совпадает с отведенной грунту частью постоянной сетки. В результате же осадки все узлы виртуальной сетки, лежащие ниже отметки  $I_g$ , перемещаются вверх на расстояние подъема соответствующих точек грунта. Поле, оставаясь неизменным в ее узлах, оказывается деформированным в пространстве по сравнению с исходным. Затем оно "проецируется" на постоянную сетку, т. е. в каждом узле последней температура рассчитывается линейной интерполяцией температур тех узлов виртуальной сетки, между которыми он находится. В узлах постоянной сетки, лежащих ниже последнего узла виртуальной сетки, температура принимается такой же, как и в нем.

Отепляющее действие реки зимой, практическое отсутствие охлаждающего ее влияния летом (вследствие отвода) и полное отсутствие охлаждающего влияния НП приводят уже на втором году к переходу сезонного протаивания в многолетнее и возникновению непромерзающей прослойки грунта. Граница многолетнего протаивания с каждым годом захватывает все более глубокие горизонты, среднегодовая температура на подошве слоя сезонного промерзания растет, асимптотически приближаясь к  $4,0\text{ }^\circ\text{C}$ , а глубина этого слоя уменьшается (за зиму промерзает слой воды и небольшой слой лежащего под ним грунта).

В результате обработки расчетных данных по указанным вариантам структур массива россыпи получены следующие результаты:

1. Торфа + пески + вода (0,4 м). Температура повысилась с начальных  $-8,0$  до  $-2,2\text{ }^\circ\text{C}$  на глубине 12 м (рис. 2.5, а). Максимальная величина талого слоя 1,56 м. В поверхностном слое наблюдались низкие (до  $-8...-10\text{ }^\circ\text{C}$ ) отрицательные температуры.

2. Торфа + пески + вода (0,8 м). Температура повысилась по всей глубине до  $+2,4\text{ }^\circ\text{C}$  (см. рис. 2.5, б). Промерзание с учетом слоя льда составляло максимально 1,55 м. Наиболее низкие температуры в поверхностном слое доходили до  $-2...-3\text{ }^\circ\text{C}$ .

3. Торфа + пески + вода (1,2 м). Положительные температуры по всей области разреза, за исключением промерзания слоя воды.

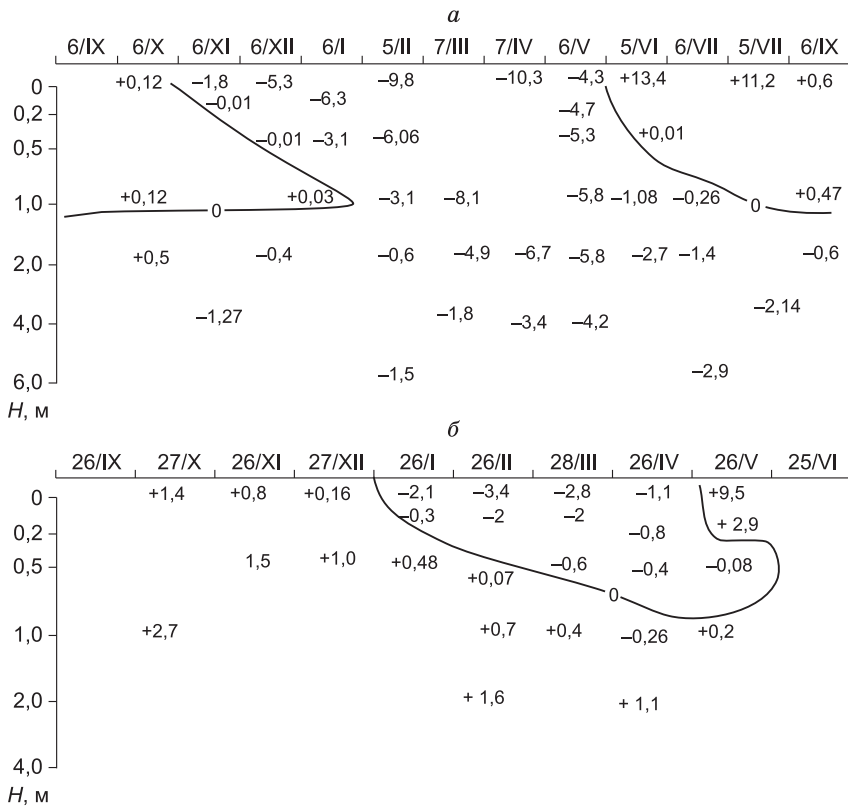


Рис. 2.5. Температурное поле ( $^{\circ}\text{C}$ ) в массиве "торфа + пески".

*a* – при слое воды 0,4 м; *б* – 0,8 м.

4. Пески + вода (0,4 м). Повышение температуры до  $-4,5^{\circ}\text{C}$  по сравнению с начальной  $-8,0^{\circ}\text{C}$  (рис. 2.6, *a*). Талый слой не превышает 1,5 м, массив пород в основном низкотемпературный. Значительно распространены области с температурой, равной или ниже  $-4,5^{\circ}\text{C}$ .

5. Пески + вода (0,8 м). Температура массива повысилась до  $+1,3^{\circ}\text{C}$  (см. рис. 2.6, *б*). Промерзание при наиболее низких температурах воздуха, с учетом толщины слоя льда, доходит до 2,25 м. Продвижение фронта температуры  $-4,5^{\circ}\text{C}$  ограничено практически слоем льда и не превышает 1,1 м.

6. Пески + вода (1,2 м). Положительные температуры, за исключением промерзания слоя воды.

Анализ данных по установившимся тепловым режимам описанных типов разрезов показывает, что при достаточно длительном периоде применения способа значительное повышение температуры достигается при слое воды не менее 0,8 м. Несколько большее повышение температуры при таком же слое воды отмечено при структурном строении разреза

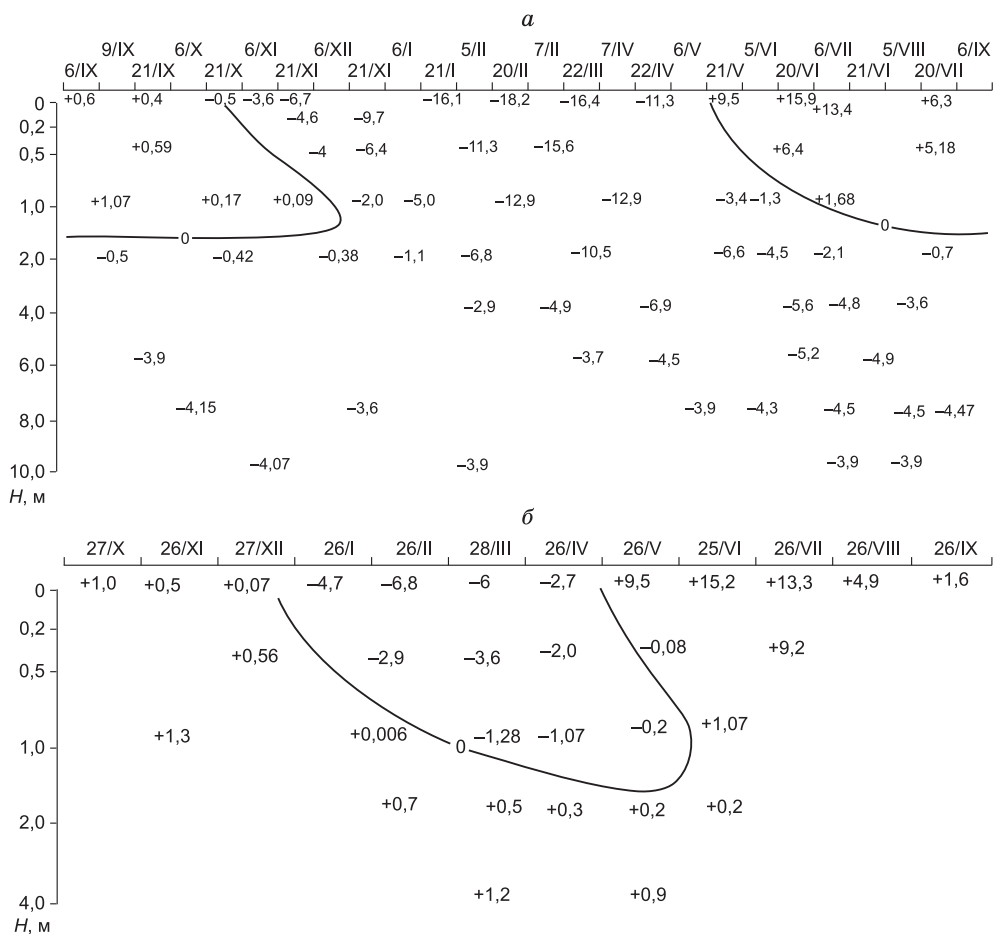


Рис. 2.6. Температурное поле (°C) в массиве "пески":  
а, б – см. на рис. 2.5.

торфа + пески. В условиях же применения водной заливки 1,2 м положительные температуры наблюдались по всей глубине массива. Это позволяет заключить, что процесс водно-тепловой мелиорации на участках водотоков с глубиной 0,8 м и более (для условий данного района) приводит к образованию в массиве участков пород с положительными температурами, пригодных для разработки традиционным оборудованием (бульдозерным или бульдозерно-гидравлическим способом).

Описанные выше параметры состояния массива получены для условий достаточно длительного расчетного периода – до 20 лет. Для практического применения описанных моделей существует необходимость определения переходных характеристик, представляющих картину распределения температурных полей, возникающих в массиве за меньшие промежутки времени.

Таблица 2.1

**Изменение температуры пород при переходном процессе**

Год	Температурные изотермы на конец расчетного года, °С					Год	Температурные изотермы на конец расчетного года, °С				
	0	-1,5	-2,5	-3,5	-4,5		0	-1,5	-2,5	-3,5	-4,5
1	1,0	2,9	3,3	3,9	4,5	12	3,4	10,1	13,9	–	–
2	1,3	4,2	5,5	6,9	8,3	13	3,5	10,5	14,5	–	–
3	1,6	4,9	6,6	8,2	10,0	14	3,7	10,8	15,0	–	–
4	1,9	6,7	8,1	10,3	12,6	15	3,8	11,2	15,5	–	–
5	2,1	6,7	9,1	11,5	14,5	16	4,0	11,5	16,0	–	–
6	2,3	7,3	9,8	12,7	15,9	17	4,1	11,9	16,7	–	–
7	2,5	7,9	10,7	13,8	17,3	18	4,2	12,2	17,0	–	–
8	2,7	8,4	11,4	14,7	–	19	4,4	12,5	–	–	–
9	2,8	8,8	12,1	15,7	–	20	4,5	12,9	–	–	–
10	3,1	9,3	12,7	16,6	–	21	4,6	13,1	–	–	–
11	3,2	9,7	13,3	17,4	–	22	4,8	13,5	–	–	–

Примечание. Прочерк означает выход изотермы из расчетной области (20 м).

Для расчета был выбран вариант торфа + пески + вода (1,2 м) как наиболее эффективный по разупрочняющему действию.

Использование теплоизолирующего покрытия (вода или другие вещества) позволяет изменить температуру массива до положительной, что существенно снижает затраты энергии на разработку пород. Это подтверждается сопоставлением характеристик переходных процессов без применения и с применением водной заливки, которое показало, что в результате переходного процесса по типу напочвенный покров + торфа + пески – повышение температуры пород было незначительным, в пределах 1,0–1,5 °С.

Температурные изотермы и их изменение в течение 20 лет для структуры торфа + пески + вода (1,2 м), определенные расчетным путем, представлены в табл. 2.1.

На основании приведенных результатов можно сделать заключение, что в долинах природных водотоков, где происходит естественный процесс водно-тепловой оттайки, возможно образование участков пород с положительными либо с повышенными температурами, что зависит от толщины водяного слоя, длительности и стабильности процесса.

### **2.3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В УСЛОВИЯХ РОССЫПИ РЕКИ БОЛ. КУРАНАХ**

#### **2.3.1. Характеристика россыпи**

Погребенная россыпь приурочена к долине р. Бол. Куранах и имеет протяженность 21 км при ширине от 200 до 1500 м (средняя 650 м).

В плане форма россыпи извилистая. Максимальная ширина (1500 м) и глубина (65 м) приурочены к верхней части россыпи, затем, по направлению к устью, ширина уменьшается до 200–300 м при глубине 20 м; уклон поверхности изменяется от 0,014 в верховье до 0,004 ниже устья руч. Сосновый. Большая часть россыпи обводнена и находится в талом состоянии.

Почти на всем протяжении р. Бол. Куранах протекает в дражных отвалах; ширина колеблется от 5–10 м в верховье до 20–40 м в нижнем течении.

Многолетнемерзлые породы отмечены в небольшом количестве (5–8 %) и только в верхней части месторождения, преимущественно в приобтовых частях долины, в виде отдельных линз мощностью 3,8–37,3 м, залегающих на глубине от 3,0 до 30,5 м; температура пород в них колеблется в пределах от 0,2 до  $-1,0$  °С.

Средняя мощность торфов составляет 7,6 м (при колебаниях от 1,9 до 28,0 м), песков 26,5 м (3,3–51,7 м). Плотик сложен разрушенными и трещиноватыми известковистыми породами, неровный, с отдельными западинами.

Илисто-глинистая фракция песков (0,1 мм) составляет 31,8–48,0 %, песковая фракция ( $-1,0+0,1$  мм) – 5,0–21,0 % и содержание частиц крупнее 1,0 мм находится в пределах 44,5–52,7 % при очевидном преобладании гравийной размерности и незначительном количестве (2,1 %) валунов.

В целом по месторождению преобладают породы с содержанием глины от 16 до 67 %, причем вниз по течению реки намечается увеличение глинистости пород. Содержание глинистого материала в галечниковых суглинках – 20–25 %, гравелистых суглинках – 15–25, гравелистых песках – 10–15, глинистых суглинках – 40 %. Среднее содержание глины в древних отложениях на верхнем участке погребенной россыпи р. Бол. Куранах составило 42,4 %.

### **2.3.2. Инженерные методы расчета глубины оттаивания мерзлого массива**

Основными параметрами, определяющими интенсивность теплообмена мерзлого массива с омывающим его воздушным потоком являются: коэффициент конвективного теплообмена ( $\alpha_t$ ), температура атмосферного воздуха ( $t_0$ ) и пород ( $T$ ). Коэффициент  $\alpha_t$  зависит не только от строения и свойств контактного слоя, но и от скорости ветра, влажности воздуха, разности температур  $T_{сл}$  и  $\Theta_в$ . Значение коэффициента  $\alpha_t$  для континентальных районов Магаданской области и Якутии в период естественного оттаивания обычно изменяется в пределах 11–17 Вт/м<sup>2</sup> [Емельянов и др., 1978].

В естественных условиях имеют место большие потери тепла на отражение, излучение, конвективный теплообмен с воздухом и испарение. Тепловой поток в породе составляет лишь 2–3 % от суммарной коротко-

волновой радиации. Таким образом, природное распределение основных энергетических источников не благоприятствует формированию больших глубин оттаивания. Между тем в суровых климатических условиях Якутии и Магаданской области на 1 м<sup>2</sup> горизонтальной поверхности с апреля по сентябрь поступает около 750 Мкал коротковолновой лучистой энергии. При отсутствии теплопотерь этой энергии хватило бы для оттаивания мерзлых пород льдистостью 250–300 кг/м<sup>3</sup> на глубину около 30 м [Емельянов и др., 1978].

Расчет динамики температурных полей с фазовыми переходами представляет собой одну из сложных задач математической физики. Первые известные ее решения были получены Ляме и Клапейроном (1831 г.), Заальшютцем (1861 г.) и Стефаном (1889 г.), по имени которого названы сейчас сама задача и условие на границе раздела фаз [Емельянов и др., 1978]. Эти решения относятся к однородной по всем свойствам породе, постоянной по глубине начальной температуре и постоянной во времени температуре поверхности. В практике встречаются более сложные сочетания краевых условий, для которых аналитические решения не найдены. Широкое распространение получили приближенные инженерные методы расчета скорости оттаивания, основанные на принципе непрерывной смены стационарных состояний. Сущность этого принципа можно вкратце сформулировать следующими словами: так как большая часть тепла расходуется на фазовые переходы, то при постоянной или медленно меняющейся температуре поверхности температурное поле оттаивающих пород можно считать квазистационарным. На этом принципе построен вывод формул М.М. Крылова, В.С. Лукьянова, Х.Р. Хакимова, К.Ф. Войтковского, В.Т. Балобаева, А.В. Павлова и др. [Емельянов и др., 1978].

Для определения глубины оттаивания рекомендуется пользоваться формулой [Емельянов и др., 1978]:

$$h_o = \sqrt{\frac{2\lambda T_{cp} t_o}{Q_o} + h_{o.n.}^2}, \text{ м}, \quad (2.28)$$

где  $t_o$  – время оттаивания, ч;  $T_{cp}$  – средняя за рассматриваемый промежуток времени  $t_o$  температура поверхности, °С;  $h_{o.n.}$  – глубина оттаивания в начальный момент, м;  $Q_o$  – затраты тепла на оттаивание 1 м<sup>3</sup> мерзлой породы, ккал/м<sup>3</sup>;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности пород, ккал/м·ч·°С.

Глубина  $H$  оттаивания пород при ежедневном удалении талого слоя определяется по формуле [Агейкин и др., 1982]:

$$H = h_T T, \text{ см}, \quad (2.29)$$

где  $h_T$  – средняя суточная глубина оттаивания пород, см;  $T$  – продолжительность оттаивания, сут.



Глубина  $H'$  оттаивания песчано-галечных отложений без удаления талого слоя определяется по формуле [Агейкин и др., 1982]:

$$H' = a_T \sqrt{T}, \text{ см}, \quad (2.30)$$

где  $a_T$  – постоянная величина, зависящая от ряда теплотехнических факторов (для пород, имеющих льдистость 10 %,  $a_T = 10-12$ ).

Глубину  $H$  оттаивания пород можно определить также по формуле [Клименко, Сулин, 1967]:

$$H = \frac{T}{a_1 + b_1 T}, \text{ см}, \quad (2.31)$$

где  $a_1$  и  $b_1$  – эмпирические константы (для пород, представленных гравийно-галечным материалом с песчаным заполнителем  $a_1 = 0,066$  и  $b_1 = 0,036$ ; для льдонасыщенных пород высокой влажности  $a_1 = 0,036$  и  $b_1 = 0,047$ ; для валунистых пород с глинистым заполнителем  $a_1 = 0,128$  и  $b_1 = 0,045$ ).

В пределах от 1 до 10 сут. эта формула дает достаточно точные для практики результаты и может быть использована при планировании объема бульдозерной выемки пород.

Суточная глубина  $h_c$  оттаивания пород может быть вычислена по формуле Стефана [Временные инструкции..., 1959]:

$$h_c = \sqrt{\frac{K\lambda t T W_\lambda}{80q}}, \text{ м/сут.}, \quad (2.32)$$

где  $K \approx 1$  (для галечно-гравелистых пород);  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности пород ( $\lambda = 0,7-0,8$ ; для льдистых пород  $\lambda = 0,8-1,2$ ), ккал/м·ч·°С;  $t$  – среднесуточная температура наружного воздуха, °С;  $T$  – продолжительность оттаивания, ч;  $W_\lambda$  – содержание льда в породе (ориентировочно)  $W_\lambda = 0,7-0,8$ , для льдистых пород  $W_\lambda = 0,8-1,2$ , кг/м<sup>3</sup>.

### 2.3.3. Расчет теплового состояния массива при послойном снятии оттаявшего слоя

Известно, что интенсивность оттайки определяется характеристикой пород (льдистостью, глинистостью, коэффициентом фильтрации), температурой воздуха, периодичностью удаления талого слоя, температурой мерзлых пород в массиве [Папернов, 1969].

С целью исследования влияния указанных факторов на эффективность естественной оттайки выполнен численный эксперимент по моделированию теплового режима массива пород при снятии оттаявшего слоя через заданные интервалы в 1, 3 и 5 сут.

Температура воздуха задана согласно фактическим данным, полученным на россыпи р. Бол. Куранах (Якутия). Расчетные параметры слоя мерзлых пород, образовавшегося в массиве россыпи в результате воздействия низких среднегодовых температур и при минимальном снежном покрове, характеризовались толщиной в 8,4 м с температурой от  $-6,2$  до  $-11,4$  °С.

За методическую основу принята математическая модель, описанная в п. 2.1, с дополнительными алгоритмами, введение которых продиктовано спецификой моделирования в конкретных условиях месторождения.

1. Для воспроизведения послойного снятия и удаления оттаявшего грунта к расчетной области, в общем случае многослойной, сверху добавляется фиктивный слой с очень высоким значением коэффициента теплопроводности (сотни Вт/(м·К)), низкими величинами  $C_M, C_T^u Q_\Phi = 0$  (почти идеальный проводник тепла). По завершении каждого шага моделирования и отыскания координаты  $z_{\Phi,1}$  верхнего фронта протаивания мощность этого слоя автоматически устанавливается равной  $z_{\Phi,1}$ , а мощности всех нижележащих слоев изменяются по такому алгоритму:

$$h_K = \max \left( 0, h_{k, \text{исх}} - \max \left( 0, z_{\Phi,1} - \sum_{l=1}^{k-1} h_{l, \text{исх}} \right) \right),$$

где  $h_{k, \text{исх}}$  – первоначальная мощность  $k$ -го (не считая фиктивного) слоя. Полученное на конец шага температурное поле сохраняется, и выполняются соответствующие переприсвоения значений теплофизических свойств блокам сетки КРС. Для блока, принадлежащего более чем одному физическому слою, значения всех его свойств образуются как средневзвешенные значения аналогичных свойств вмещающих его слоев, причем вместо  $\lambda_M$  и  $\lambda_T$  во избежание больших погрешностей вычисление средних взвешенных выполняется для обратных величин  $1/\lambda_M$  и  $1/\lambda_T$ , так как именно они аддитивны относительно такой процедуры.

2. Для обеспечения высокой точности счета необходима достаточно точная локализация фазовой границы  $z_{\Phi,1}$  по завершении каждого шага решения ЗС. Общепринятые методики такой локализации основаны на той или иной интерполяции температур в тех соседних ( $i$ -м и  $(i+1)$ -м) узлах сетки, где они противоположны по знаку относительно  $t_\Phi$ . Точнее и проще методика, применяющая другие соотношения:

$$q_i = \lambda_{i, \text{расч}} t_i / (z_{\Phi,i} - x_i); \quad q_i = \lambda_{i+1, \text{расч}} t_{i+1} / (z_{\Phi,i} - x_{i+1}),$$

где  $x_i$  – координата  $i$ -го узла;  $\lambda_{i, \text{расч}}$  – расчетное (с учетом сглаживания) значение коэффициента теплопроводности  $i$ -го блока;  $q_i = |\tilde{q}_i (h_i + h_{i+1}) + \tilde{q}_{i+1} (h_i + h_{i-1})| / (h_{i-1} + 2h_i + h_{i+1})$  – тепловой поток, приведенный к узлу;  $\tilde{q}_i$  – поток от  $(i-1)$ -го к  $i$ -му узлу, получаемый непосредственно из потоковой прогонки;  $h_i$  – длина  $i$ -го блока. После того как ЭВМ, просматривая подряд все узлы и анализируя знаки температур в них, обнаружит очередную требуемую пару  $i$  и  $(i+1)$ ,  $z_{\Phi,1}$  вычисляется по следующей формуле (учитывающей возможное несоответствие полей температур  $t_i$  и потоков  $q_i$ , вследствие погрешностей КРС):

$$z_{\Phi,1} = 0,5 \left[ \begin{aligned} & \min(x_{i+1}, \lambda_{i, \text{расч}} t_i / (\text{sgn}(q_i) \cdot \max(|q_i|, q_{\text{порог}})) + x_i) + \\ & + \max(x_i, \lambda_{i+1, \text{расч}} t_{i+1} / (\text{sgn}(q_{i+1}) \cdot \max(|q_{i+1}|, q_{\text{порог}})) + x_{i+1}) \end{aligned} \right].$$

Здесь  $q_{\text{порог}}$  – порог, предотвращающий деление на недопустимо малую величину. Методика (2.28)–(2.29), строго говоря, действительна только для внутренних узлов ( $i = 2, 3, \dots, n_{уз}$ ;  $n_{уз}$  – общее число узлов), но ее легко распространить на случай обнаружения фронта, находящегося между дневной поверхностью и 1-м узлом.

### 2.3.4. Анализ результатов расчета

Для анализа данных моделирования использованы установленные значения суточной оттайки при различных периодах накопления талого слоя и температура мерзлого слоя. Среднесуточная температура воздуха за расчетный период повысилась с 0,54 до 18,3 °С.

**Период в 1 сут.** Величина оттайки изменяется от 1,5 до 28,6 см, в основном 8,8–20,6 см.

**Период в 3 сут.** Величина оттайки изменяется от 2,5 до 13,3 см с довольно равномерным распределением значений в этом диапазоне.

**Период в 5 сут.** Величина оттайки изменяется от 2,6 до 11,7 см, что примерно на одном уровне с интервалом в 3 сут.

При сравнении полученных результатов видно, что суточные величины оттайки будут наибольшими при периоде в 1 сут. Для периодов в 3 и 5 сут. суточная оттайка примерно одинакова (рис. 2.7).

Практикой работы, в том числе наблюдениями на россыпи р. Бол. Куранах, установлено, что суточная естественная оттайка обычно не превышает 0,1–0,15 м, а наибольшее влияние на ее темпы оказывает периодичность удаления талого слоя, который в процессе его накопления становится теплоизолятором и препятствует дальнейшей оттайке.

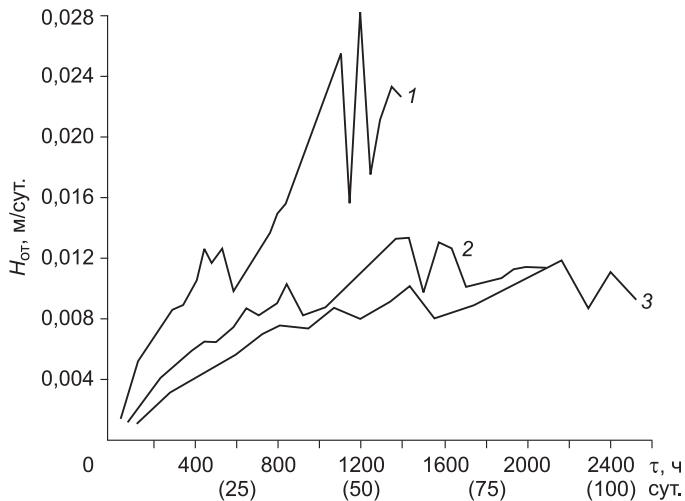


Рис. 2.7. Изменение величины суточной оттайки при различных интервалах снятия оттаявшего слоя:

1 – период в 1 сут.; 2 – период в 2 сут.; 3 – период в 5 сут.

При этом увеличение периода накопления талого слоя до 2 сут. уменьшает оттайку до 70 % от исходной; до 3 сут. – до 50 %; до 5 сут. – до 35 %. Расчетные данные дают следующие результаты: 1 сут. – 100 %, 3 сут. – 47 %, 5 сут. – 38 %, что сопоставимо с данными наблюдений.

Расчетное время полной оттайки мерзлого слоя (8,5 м) составило от 2 до 3,6 мес. в зависимости от периода накопления талого слоя.

Температура в глубине массива (4,5–5 м) при быстрой оттайке на поверхности изменялась довольно медленно. Так, через месяц она повысилась до  $-6,2$  °С, через 1,5 мес. – до  $-3,5$  °С. Полная оттайка (0 °С) достигнута через 2 мес. Температура на дневной поверхности массива при интервале зачистки в 1 сут. изменялась от  $-0,01$  до  $-1,19$  °С. Выявлена ее связь с величиной суточной оттайки при коэффициенте корреляции 0,5 (рис. 2.8, а).

При интервале зачистки в 3 сут. температура на дневной поверхности колебалась от  $-0,0$  до  $-0,76$  °С. Выявлена зависимость температуры и суточной оттайки при коэффициенте корреляции 0,64 (см. рис. 2.8, б).

При интервале зачистки в 5 сут. температура на дневной поверхности изменялась от  $-0,01$  до  $-0,57$  °С. Выявлена зависимость температуры и суточной оттайки при коэффициенте корреляции 0,68 (см. рис. 2.8, в).

Таким образом, установлена достаточно устойчивая корреляционная зависимость между интенсивностью оттайки и отрицательной температурой породы на контакте с положительной температурой воздуха.

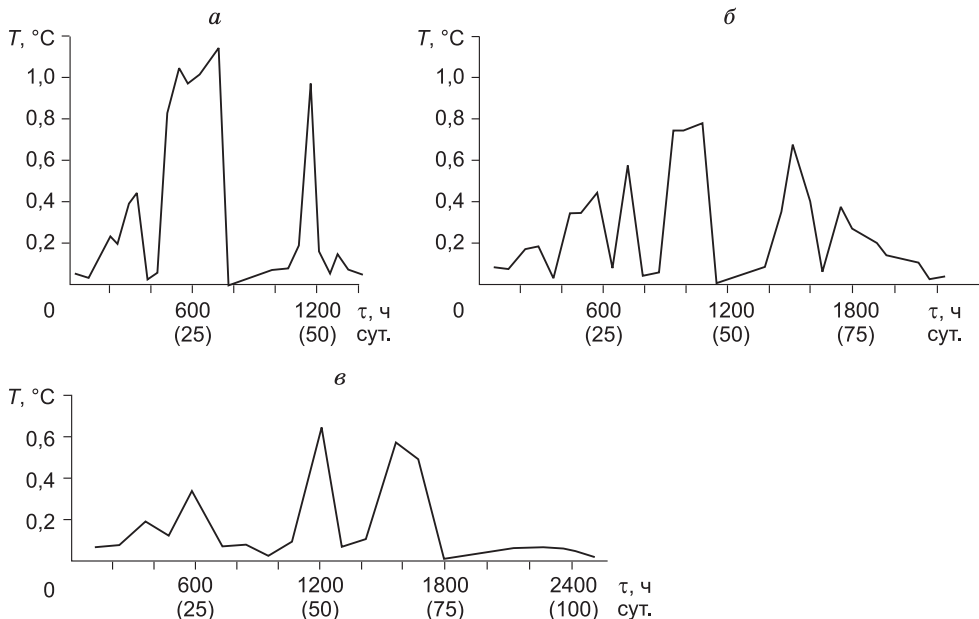


Рис. 2.8. Температура мерзлого массива на контакте с воздухом при зачистке талого слоя:

а – через 1 сут.; б – через 3 сут.; в – через 5 сут.

## 2.4. ДАННЫЕ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ЕСТЕСТВЕННОЙ ОТТАЙКИ В УСЛОВИЯХ РОССЫПЕЙ КОЛЫМЫ

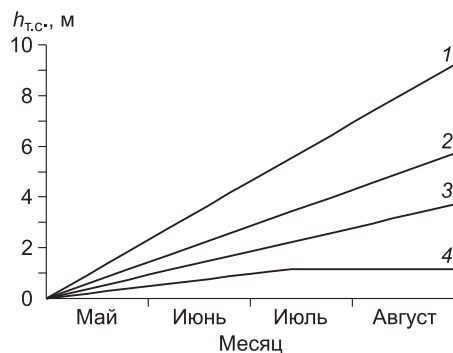
Послойное оттаивание применяется в случаях, когда требуется ускорить оттаивание вскрышных пород и отработать по таликам участки россыпи на максимальную глубину. Большое влияние на скорость оттаивания оказывает талый слой, возникающий на поверхности мерзлых приповерхностных пород по мере их оттаивания. Например, скорость оттаивания мерзлой толщи полигонов, на которых оттаявшие слои породы удаляются ежедневно, в среднем за теплый сезон составляет приблизительно 10 см/сут., при удалении талых слоев породы один раз в трое суток – 6 см/сут., соответственно, через пять суток в среднем 4 см/сут. Наблюдениями установлено, что при образовании на поверхности мерзлых пород талого слоя мощностью 10 см начинает преобладать отрицательный турбулентный теплообмен, направленный от почвы в атмосферу, поэтому срезку талого слоя мощностью 8–10 см следует считать оптимальным режимом [Кошлаков, 1955, 1958]. На валунистых участках россыпи породы должны быть оттаяны на глубину не менее двух третей диаметра крупных включений. Анализ работы приисков показывает, что средняя глубина сезонной выемки зависит от частоты снятия талых пород и мощности слоя, а производительность бульдозера – от толщины снимаемого слоя, площади и трудоемкости разрабатываемых пород.

Естественное оттаивание с применением периодического снятия оттаявшего слоя пород является более эффективным. Оно применяется во всех случаях, когда требуется ускорить оттаивание пород на максимальную мощность. Изменение глубины оттаивания по месяцам при удалении талого слоя в разные сроки и без удаления его показаны на рис. 2.9 [Кошлаков, 1955]. На участках, где ежесуточно удаляется талый слой, величина суточного оттаивания составляет 10,4 см, а в солнечные теплые дни она достигает 20 см и более. Общая глубина оттаивания за сезон достигает 10 м. На участках, где талый слой не удаляется, величина суточного оттаивания составляет 1,4 см (в 7,5 раза меньше), а общая глубина оттаивания не превышает 1,4 м.

Данные [Кошлаков, 1958], характеризующие глубину оттаивания в разное время суток при ежесуточном

Рис. 2.9. График изменения глубины  $h_{т.с.}$  естественного оттаивания пород в мае, июне, июле и августе.

1 – при ежесуточном удалении талого слоя; 2 – при удалении талого слоя через 3 сут.; 3 – то же через 5 сут.; 4 – без удаления талого слоя.



Средние значения суточной оттайки (по: [Кошлаков, 1958])

Период	Среднее оттаивание (см) в течение			Максимальное оттаивание (см) в течение			Минимальное оттаивание (см) в течение		
	дня	ночи	суток	дня	ночи	суток	дня	ночи	суток
Май (II половина)	6,4	0,5	6,9	7,0	2,5	9,5	2,5	0,0	2,5
Июнь	10,8	4,1	14,9	16,0	8,0	24,0	7,0	2,0	9,0
Июль	11,9	5,1	17,0	16,0	8,0	24,0	5,5	0,0	5,5
Август	9,2	1,4	10,6	17,6	5,0	22,5	5,0	0,2	5,2
Сентябрь	3,4	0,05	3,5	7,5	0,0	7,5	0,7	0,0	0,7

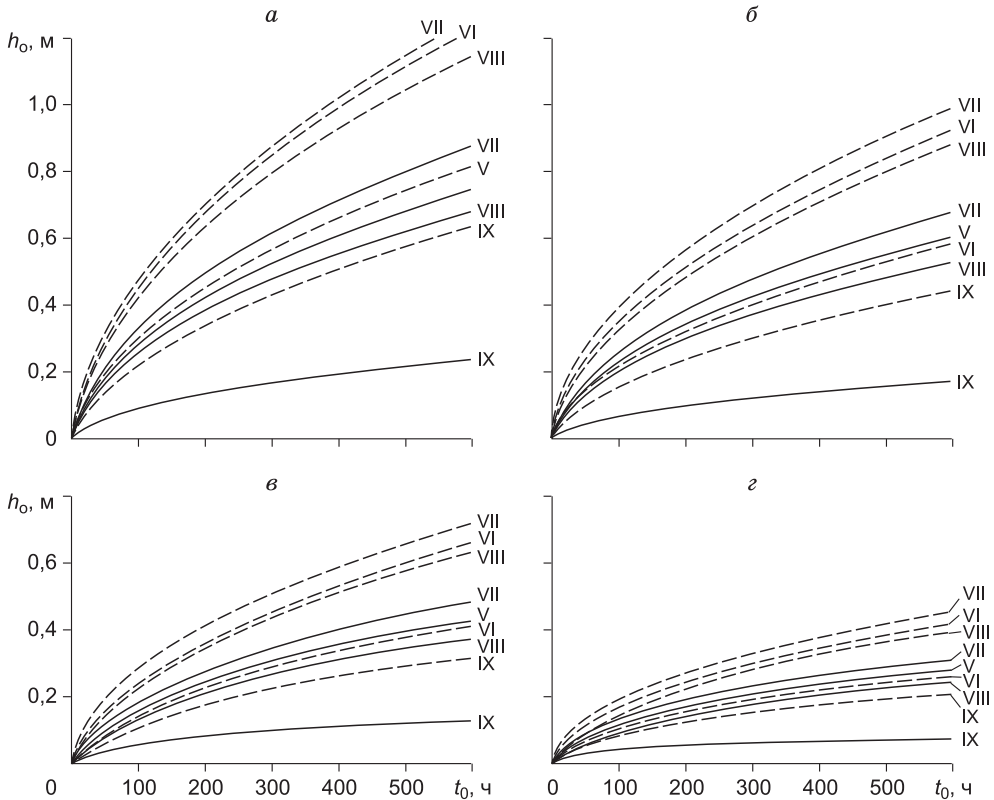


Рис. 2.10. График зависимости мощности  $h_0$  оттаиваемого слоя от продолжительности  $t_0$  оттаивания на побережье Чукотского моря (сплошные кривые) и в верховьях р. Колымы (пунктир).

*a* – для гравия и гальки льдистостью  $125 \text{ кг/м}^3$ ; *б* – для гравия и гальки льдистостью  $250 \text{ кг/м}^3$ ; *в* – для супеси щебенистой льдистостью  $400 \text{ кг/м}^3$ ; *г* – для суглинка оторфованного льдистостью  $600 \text{ кг/м}^3$ .

удалении талого слоя применительно к условиям россыпей Центральной Колымы при влажности пород аллювиальных отложений 10–15 %, приведены в табл. 2.2.

Как видно из табл. 2.2, глубина оттаивания за ночное время в среднем составляет 25–27 % суточной глубины оттаивания. В мае и сентябре оттаивания в ночное время почти не наблюдается. Это объясняется резким уменьшением теплового потока в верхние слои почвы. В августе глубина суточного оттаивания на 25–30 % меньше, чем в июне–июле, однако она обеспечивает нормальную организацию вскрышных работ.

Послойное естественное оттаивание позволяет успешно разрабатывать в течение сезона мерзлые породы на глубину 6–8 м. Однако, несмотря на накопленный опыт, естественное солнечное оттаивание требует дальнейшего его совершенствования. Исследованиями [Климовский, Готовцев, 1994] установлено, что эффективная работа бульдозеров возможна при толщине талого слоя не менее 0,1 м.

Зная мерзлотно-геологические характеристики полигонов, можно с помощью теплофизических расчетов обосновать оптимальный режим послойного оттаивания, обеспечивающий наиболее эффективное в данных условиях использование землеройной техники.

Для облегчения проектирования вскрышных работ в условиях северо-востока возможно пользоваться графиком (рис. 2.10).

Таким образом, результаты моделирования позволяют в конкретный период времени определить температурный режим и соответственно прочностные характеристики пород горного массива, а, следовательно, более обоснованно принимать технологические решения по его разработке.

---

---

## **3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ НА РОССЫПНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ “ГОРНОЕ”**

### **3.1. ХАРАКТЕРИСТИКА УСЛОВИЙ МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

Россыпное месторождение алмазов “Горное” расположено в Мало-ботуобинском горном районе Западно-Якутской алмазонасной провинции, на левобережье р. Мал. Ботуобия, правого притока р. Вилюй, в районе сопряжения ее долины с долиной р. Ирелях.

Границами месторождения являются: на юге – контур промышленных запасов алмазов Иреляхской россыпи, на востоке и западе – тыловые швы, соответственно II и IV террас р. Мал. Ботуобия.

Административно территория входит в состав Мирнинского района Республики Саха (Якутия) с центром управления – г. Мирный.

Город Мирный и прилегающие к нему объекты имеют хорошо развитую инфраструктуру энергообеспечения, связи и ремонтного обслуживания.

Наиболее крупными реками района являются Мал. Ботуобия и Ирелях. Питание речной системы осуществляется за счет осадков и сезонной оттайки. Гражданское и техническое водоснабжение г. Мирный обеспечивается водохранилищем, расположенным на р. Ирелях.

Климат района резко континентальный с продолжительной (6–7 мес.) суровой зимой (температура доходит до  $-63^{\circ}\text{C}$ ). Среднегодовая температура воздуха составляет  $-7,8^{\circ}\text{C}$ , среднемесячная температура летом колеблется около  $+16^{\circ}\text{C}$ . В отдельные дни температура воздуха достигает  $+35^{\circ}\text{C}$ . Переход среднесуточных температур от положительных к отрицательным и обратно происходит чаще всего 1 октября и 2 мая. Атмосферное давление колеблется от 705 до 755 мм рт. ст. Безморозный период длится от 70 до 90 дней.

Среднегодовое количество осадков составляет 280–520 мм, снежный покров устанавливается в октябре и сходит в мае месяце, толщина его достигает 0,8–1,0 м.

Месторождение расположено в зоне развития сплошной многолетней мерзлоты, мощность которой достигает 325–390 м. Летняя оттайка незначительна (0,5–3,0 м) и зависит от экспозиции склонов.

Сезонное оттаивание в зависимости от литологического состава пород различно и составляет в августе–сентябре 0,6–2,0 м. По данным кратковременных наблюдений в июне–июле среднесуточная величина естественного оттаивания в илистых грунтах 3–4 см, в песчаных грунтах – 7–8 см.



Таблица 3.1

Климатические показатели Мирнинского района Республики Саха (Якутия)

Показатель	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Средняя месячная температура воздуха, °С	-31,6	-28,3	-17,3	-6,9	3,8	13,6	16,9	13,4	4,9	-7,0	-23,9	-30,8	-7,8
Амплитуда колебаний температуры по месяцам, °С	8	9,2	12	10,9	10,3	12,3	12,2	11,4	9,5	7,2	7,3	7,2	
Парциальное давление водяного пара, Па	50	60	130	220	420	800	1130	1000	620	310	100	50	400
Относительная влажность воздуха, %	75	75	67	57	52	54	60	66	70	76	78	76	67
Среднее месячное количество осадков, мм	15	13	9	17	30	43	56	49	35	31	22	18	338

Распределение температур в году крайне неравномерно. Амплитуда колебаний средних месячных величин составляет 48,5 °С при амплитуде абсолютных температур 93,7 °С. Наибольшие средние суточные амплитуды температуры воздуха отмечены в марте месяце (18–19 °С), в летний период они составляют 15–16 °С и в зимний около 10 °С. Максимальные суточные амплитуды температуры воздуха могут достигать 30 °С. Расчетная температура самой холодной пятидневки минус 47,2 °С.

Средняя продолжительность периода с положительными температурами воздуха (средними за сутки) равна 152 дням, но отрицательные температуры могут наблюдаться в любой летний месяц.

Влажность воздуха наибольших значений достигает летом в июле, наименьших – зимой. На ее распределение оказывает влияние характер местности и рельеф, в частности, летом с высотой абсолютная влажность понижается, зимой – несколько возрастает. В годовом ходе относительной влажности имеется два максимума: один – зимой, другой – осенью.

Суточный ход влажности воздуха наиболее резко выражен летом, причем максимум наблюдается в 4–5 часов утра, минимум – в 14–16 часов дня. Амплитуда колебаний относительной влажности составляет от 30–40 % летом до 1–4 % зимой. Величины относительной и абсолютной влажности и среднее месячное количество осадков приведены в табл. 3.1.

Появление снежного покрова для г. Мирный обычно 3 октября, а образование – 9 октября. Разрушение снежного покрова 2 мая, а сход – 8 мая.

Зимой распределение давления способствует развитию южных, юго-западных и западных ветров (октябрь–март), летом (май–август) направление ветров сменяется на противоположное. В переходные сезоны (апрель, сентябрь) зимнее распределение ветра сочетается с летним.

В годовом ходе скорости ветра максимумы наблюдаются весной, осенью, а летом и особенно зимой, преобладают слабые и умеренные ветры (табл. 3.2).

Таблица 3.2

**Повторяемость и средняя скорость ветра (м/с) по направлениям,  
по данным ст. Мирный**

Направление	В январе		В июле		За год	
	Повторяемость	Скорость	Повторяемость	Скорость	Повторяемость	Скорость
С	4	2,3	15	3,4	7	3,2
СВ	6	2,2	22	3,6	11	2,9
В	8	2,4	18	3,6	9	3,1
ЮВ	3	2,6	8	3,3	5	3,2
Ю	13	2,7	7	3,9	13	3
ЮЗ	17	3,4	6	3,3	13	3,6
З	36	3,6	10	3,4	25	3,8
СЗ	13	3,2	14	3,6	17	3,7
Штиль	9		6		8	

Скорость ветра, м/с, возможная один раз в					Средняя скорость, м/с	
1 год	5 лет	10 лет	15 лет	20 лет	В январе	В июле
14	16	18	20	22	4–5	0–1

Количество тепла, поступающее от солнечной радиации на горизонтальную поверхность, определенное по литературным данным, в июле месяце составляет 5410 ккал/(ч·м<sup>2</sup>) от прямой и 1046 ккал/(ч·м<sup>2</sup>) от рассеянной радиации за сутки. Среднее количество тепла составляет 2700 ккал/(ч·м<sup>2</sup>).

Наиболее часто на территории района наблюдаются поземные туманы в долине р. Ирелях. Так же в зимнее время отмечаются радиационные туманы. Они возникают в ясную погоду и рассеиваются днем. Локальные туманы радиационного происхождения образуются на промплощадке и вдоль автодорог при температуре ниже минус 40 °С в результате поступления в воздух влаги из-за утечки тепла из зданий, выбросов из систем вентиляции и двигателей транспорта.

На рассматриваемой территории наблюдаются как общие, так и поземные метели. Общие метели связаны с прохождением циклонов и сопровождаются снегопадами. Число дней с метелями ориентировочно составляет 40–50 в год. Происходят они в основном в ноябре и марте–апреле, с декабря по февраль число метелей значительно меньше. Обычно они наблюдаются при скорости ветра более 10 м/с и температурах воздуха –30 °С и выше.

Наибольшая продолжительность метелей 0,5–1,0 сут. Поземные метели наблюдаются при скорости ветра более 4 м/с благодаря сухому снегу. Их повторяемость выше, чем общих метелей из-за открытого характера местности в районе. Вероятность заноса дорог велика.

Гололедно-изморозные явления в среднем бывают 48 дней в году. В преобладающем большинстве это дни с кристаллической изморозью и один день с гололедом.

Грозовая деятельность развита слабо, чаще всего грозы бывают в летний сезон, реже – в весенние и осенние месяцы.

Исследуемый район расположен на водоразделе рек Ирелях-Юлегир, в верховьях лога руч. Широкий – правого притока р. Ирелях. Рельеф территории района представляет собой приподнятую волнистую равнину. Перепад высот незначительный – от 300 до 355 м. Средняя абсолютная отметка месторождения составляет 355 м. Растительность представлена густым угнетенным лиственничным лесом, в пониженных заболоченных участках преобладают кустарники ольхи, карликовой березки и тальника. На возвышенных сухих участках иногда встречается сосна. Моховой покров занимает 92 % площади, лишь на отдельных сухих участках растет трава. Из мхов преобладает сфагнум и кукушкин лен, на сухих – ягель. В пойменных заболоченных частях долин рек растут в основном карликовая березка и тальник. Кроме того, на склонах часто появляются следы солифлюкции – "пьяный" лес, валы в нижней части склонов.

В районе расположения месторождения основным водным объектом является р. Ирелях с ее правым притоком руч. Широкий.

Непосредственно для месторождения "Горное" геокриологическая информация отсутствует. Поэтому материалы по геокриологии приведены по данным ИМЗ СО РАН по району расположения г. Мирный [Климовский, Готовцев, 1994].

Многолетнемерзлые породы в пределах района расположения Мирного имеют сплошной характер распространения. Редкие талики приурочены к днищам крупных водоемов и водотоков, и к зонам разгрузки подземных вод. Отдельные радиогенно-тепловые талики приурочены к небольшим участкам с относительно высокими для района температурами грунтов от 0 до  $-2^{\circ}\text{C}$ .

Сезонное оттаивание грунтов зависит от ряда природных факторов, основные из которых – положение в рельефе, свойства почвенно-растительного покрова и т. д. Так, сезонное протаивание грунтов на водоразделах и склонах, сложенных супесчаными и песчаными отложениями и покрытых редкими сосновыми лесами, достигает 2,0–2,5 м. В дождливые годы в пределах таких склонов могут образовываться талые "чаши", обусловленные скоплением надмерзлотных вод. Несколько меньше – 0,8–1,2 м сезонное протаивание суглинистых грунтов в днищах небольших водотоков. В пределах ограниченных участков развития торфа протаивание минимально – 0,3–0,5 м.

В днищах долин средних и крупных водотоков сезонное протаивание варьирует от 1,3–1,5 м на I надпойменной террасе р. Мал. Ботуобия в супесчано-суглинистых грунтах с березово-лиственничным лесом до 2,5 м на возвышенных песчаных останцах с сосново-лиственничным лесом борového типа. В то же время на прирусловых валах, сложенных заиленными суглинками и супесями с угнетенным лиственнично-еловым лесом, мощность протаивания минимальна – 0,3–0,7 м (табл. 3.3).

**Глубины сезонного оттаивания грунтов в пределах Лено-Вилюйского междуречья (по: [Климовский, Готовцев, 1994])**

Лено-Вилюйское междуречье	Водоразделы	2,0–3,5	
	Склоны:	южной экспозиции	1,5–3,5
		северной экспозиции	1,0–2,5
Днища долин	0,3–1,2		

Одним из важнейших факторов, определяющих глубину протаивания, является местоположение и ориентация участка. Так, на северных крутых склонах Вилюй-Ботуобинского междуречья грунты протаивают на 0,5–0,6 м меньше, чем на южных. Для всех типов грунтов характерно уменьшение глубин сезонного протаивания с увеличением влажности (льдистости).

Наименьшее протаивание фиксируется на заболоченных и покрытых мощным моховым покровом участках днищ долин и на склонах северных экспозиций. Средние значения протаивания характерны для выровненных водораздельных пространств, максимальные – для трапповых увалов, песчаных останцов, склонов южной экспозиции.

Относительно низкие по сравнению с фоновыми значения температуры зафиксированы в пределах маревых ландшафтов, где активно формируются торфяники. В зависимости от расположения, температуры грунтов варьируют от  $-2...-3,5$  °С для верховых, развитых на плоских водоразделах, марей до  $-2,5...-4,5$  °С на марях низинных (придолинных) с явным избыточным увлажнением и с осоково-кустарниковой растительностью [Климовский, Готовцев, 1994].

В целом криолитозоне рассматриваемого района свойственны весьма растянутые ( $0,2-0,5$  °С/100 м) значения геотермического градиента. На формирование температурного поля и мощности криолитозоны помимо общих климатических изменений в плейстоцене и голоцене большое влияние оказывали высокая теплопроводность известняков и доломитов –  $3,5$  Вт/(м·°С), проникновение более тяжелых и холодных растворов из верхних горизонтов в нижележащие.

Криолитозона района представляет собой весьма сложную термодинамическую систему, включающую мерзлые породы, криопэги и, вероятно, гидраты подземных газов.

Сезонное и многолетнее промерзание и протаивание горных пород обуславливают широкое развитие криогенных явлений. Направленность и интенсивность формирующих их криогенных процессов определяется характером теплообмена верхних горизонтов грунтов с атмосферой и геолого-геоморфологическими условиями территории. Их сочетание определяет в районе наиболее широкое развитие таких криогенных явлений, как морозное выветривание, солифлюкция, морозное пучение, термокарст, морозное трещинообразование, термоэрозия.

*Морозное выветривание* в площадном отношении наиболее широко развитый криогенный процесс, охватывающий около 30–40 % площади района. Наиболее активно оно протекает в слое сезонного промерзания и оттаивания, где интенсивны колебания температур и фазовые переходы влаги. Максимальное развитие криогенное выветривание получило на глинисто-карбонатных породах кембрия и ордовика, сформировав кору выветривания мощностью от 2 до 7 м и отчетливо отличающуюся по инженерно-геологическим свойствам от подстилающих коренных пород.

Второй по площадному развитию является *солифлюкция*, охватывающая 20–30 % площади района и наиболее активная на глинисто-карбонатных породах кембрия и ордовика.

Наиболее часты на пологих (2–5°) и средней крутизны (6–15°) склонах и у подножий крутых уступов оплывины, языки и натеки с достаточно четким фронтальным уступом. В разрезе отмечаются гумусовые прослой в 2–3 см.

*Морозное пучение* охватывает порядка 10–15 % площади района. В открытых системах оно проявляется в пределах озерно-аллювиальных и озерно-болотных отложений, слагающих поймы небольших водотоков. Формирующиеся при этом сезонные бугры пучения имеют обычно диаметр порядка 30–50 см при высоте 10–30 см, реже, соответственно, 1–1,5 и 0,3–0,4 м.

*Многолетнее пучение* грунтов редко и зафиксировано лишь на участках торфяников, где высота бугров достигает 1,0–1,5 м.

Наибольшее распространение в районе имеет *пучение по типу закрытых систем* на участках, где естественная влажность супесей, суглинков и глин превышает порог пучения. Практически для всех типов элювиальных и делювиально-солифлюкционных отложений возможно формирование пучинообразных участков.

*Термокарст* ограничен 2–5 % площади и приурочен, главным образом, к участкам развития сильнольдистых четвертичных отложений: поймы, I и II надпойменные террасы р. Ирелях, долины небольших водотоков, плоские и слабовытянутые водораздельные пространства. Незначительное развитие повторно-жильных льдов ограничивает процесс термокарста. Наиболее распространенными формами являются термокарстовые блюдца и мочажины овальной формы диаметром 2–3 м и глубиной 0,2–0,3 м. На надпойменных террасах р. Ирелях отмечены термокарстовые озера, причем даже в пределах ограниченных площадей они могут иметь разные стадии развития, а следовательно, и различия во внешнем проявлении.

*Морозное трещинообразование* охватывает около 3 % площади района и связано с зимним иссушением грунтов с их последующим растрескиванием по разным направлениям. Наиболее отчетливо процесс проявляется на поверхности надпойменных террас водотоков, особенно в заболоченных верховьях, в озерных впадинах, т. е. на участках накопле-

ния тонкодисперсных заторфованных отложений при низких зимних температурах. В подобном сочетании возникают разрывные градиенты, приводящие к формированию полигонов трещин разной формы и размера – от нескольких сантиметров до нескольких десятков метров в поперечнике.

*Термоэрозия* проявляется в виде деллей – плоских вытянутых по склону ложбин стока, проявляющихся с разной интенсивностью. На склонах средней крутизны, перекрытых маломощным и малольдистым делювием прослеживаются зачаточные, слабовыраженные делли глубиной до 20–30 см, отличающиеся прямолинейностью и ненарушенностью растительного покрова.

На пологих склонах, перекрытых сильнольдистыми отложениями, формируются глубокие до 2,5 м и шириной до 30 м делли.

Таким образом, для района характерны весьма суровые природные, в том числе геокриологические условия. Конкретная информация об естественных параметрах мерзлых пород, тем более об их техногенной динамике, отсутствует.

Месторождение "Горное" ограничено разведочными линиями (1–16) по простиранию и (56–164) – вкрест простирания. Всего по участку оконтурено 13 балансовых и 12 забалансовых блоков общей площадью 9758,8 тыс. м<sup>2</sup>.

Россыпь относится к числу выдержанных по мощности и состоит из одного алмазоносного пласта непрерывно вытянутого вдоль долины р. Ирелях. Протяженность россыпи с запада на восток – 5,8 км, ширина – от 150 до 1650 м.

Рельеф поверхности месторождения относительно ровный, слабо наклоненный с запада на восток в сторону русла р. Мал. Ботубоя.

В строении россыпи участвуют русловая и пойменная фации. Русловая фация сложена продуктивными галечно-песчано-глинистыми отложениями, пойменная – глинисто-илистыми осадками.

Сверху разреза залегают торфа, представленные илистыми, суглинистыми отложениями и супесчаным материалом, четко отличающимся от песков. На глубине 0,6–1,8 м отмечены надмерзлотные воды (верховодка). Лдьистость торфов колеблется от 23 до 30 %, в среднем – 26,5 %. Наиболее лдьистыми являются иловато-суглинистые отложения. Мощность торфов изменяется по площади месторождения от 0 до 6 (7,2) м, средние мощности по балансовым блокам колеблются от 0,4 до 5,6 м, составляя в среднем по месторождению 2,27 м. Объемная масса торфов 1,7 т/м<sup>3</sup>.

Коэффициент вскрыши по блокам изменяется от 0,39 до 1,86, равняясь в среднем 0,97 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

Пески месторождения представляют собой песчано-гравийно-галечный материал с различным содержанием песка, гравия и гальки. Песок преимущественно кварцевый, галька кремнистого состава, реже песчано-карбонатного. С глубиной размер гальки увеличивается. На границе с элювием отмечается до 15 % хорошо окатанной гальки среднего размера.

Таблица 3.4

**Средний гранулометрический состав "песков" месторождения "Горное"**

Выход классов крупности, %			
+ 100 мм	-100 + 16 мм	-16 + 0 мм	0,5 мм
0,9	11,3	30,0	57,8

Содержание зернистого материала (класса  $-16 + 0,5$  мм) составляет 30 %. Обломочный материал класса + 100 мм содержится в незначительном количестве и характерен только для приплотиковых слоев и пород разборного плотика. В преобладающем количестве проб из продуктивного слоя он не содержится (табл. 3.4).

Мощность песков по площади месторождения изменяется от 0,4 до 6,4 м, средние мощности по блокам – от 1,16 до 4,12, равняясь в среднем 2,42 м. Наблюдается струйчатость как в изменениях мощности песков, так и гранулометрического состава и содержания алмазов (параллельно руслу р. Ирелях). Направлением максимальной изменчивости параметров россыпи является юг-север (вкрест простирания россыпи) (табл. 3.5).

Коэффициент разрыхления песков по данным разведки 1,4, объемная масса –  $1,88 \text{ т/м}^3$ , угол естественного откоса  $33,5^\circ$ . Льдистость песков  $-16,4\%$  (от 10 до 23 %). Мощность деятельного слоя достигает 2 м (от поверхности).

Пески месторождения "Горное" частично вязкие и за счет присутствия глины пластичные, во всех отчетах характеризуются как легкопромывистые.

Плотик представлен преимущественно элювиальной глиной со щебнем, обломками и разборными плитами карбонатных пород (доломитов, мергелей, известковистых песчаников). Значительно реже (5 % площади) плотик представлен алевритисто-глинистыми отложениями нижнеюрского возраста. Выходы этих отложений в пределах подсчетного контура отмечены только по разведочной линии 157 (шурфы 150, 151). Плотик, как правило, заражен песчано-гравийно-галечным материалом на глубину до 0,1–0,2 м, реже до 0,5 м.

Россыпь находится в районе широкого распространения многолетнемерзлых пород. Величины сезонного оттаивания в зависимости от ли-

Таблица 3.5

**Общие параметры месторождения "Горное"**

Категория запасов	Мощность, м		Площадь блоков, тыс. м <sup>2</sup>	Объем, тыс. м <sup>3</sup>	
	торфов	песков		торфов	песков
Балансовые – В	1,54	2,4	3135,7	4841,1	7512,5
Забалансовые – В	3,91	2,59	6601,1	25 837,6	17 121,9
Забалансовые – С	1,47	1,37	22,0	32,3	30,1
Всего	3,15	2,53	9758,8	30 711	24 664,5

тологического состава пород различны и составляют в августе–сентябре от 0,6 до 2 м. По данным кратковременных наблюдений в июне–июле среднесуточная величина естественного оттаивания в илистых грунтах равна 3–4 см, в песчаных грунтах – 7–8 см.

В целом горнотехнические условия месторождения благоприятны для открытой разработки с предварительной отдельной вскрышей торфов и последующей дражной добычей песков.

## **3.2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЕСТЕСТВЕННОЙ ОТТАЙКИ И ВОДНО-ТЕПЛОВОЙ МЕЛИОРАЦИИ ПЕСКОВ**

### **3.2.1. Расчетные варианты распределения температур в массиве песков**

Рассмотрим технологию двухгодичной подготовки песков к дражной обработке способом естественной оттайки с предохранением оттаянного слоя от зимнего промерзания затоплением поверхности. Она включает в себя следующие операции:

1. Удаление растительности, почвенного слоя и илисто-глинистых пород до обнажения продуктивных песков. Производится заблаговременно либо в конце предыдущего теплого сезона, либо весной, одновременно с появлением положительных температур в дневное время.

2. Своевременная уборка снежного покрова с оттаиваемой поверхности. Эту работу следует производить непосредственно перед датой весеннего перехода среднесуточных температур воздуха через 0 °С.

3. Естественная оттайка мерзлых продуктивных песков полигона (первое лето).

4. Затопление поверхности полигона с целью предохранения оттаянного слоя от зимнего промерзания. Производится осенью с появлением отрицательных температур в дневное время.

5. Осушение полигона. Производится весной.

6. Естественная оттайка мерзлых продуктивных песков полигона (второе лето).

Математическая модель исследуемого процесса оттайки песков, изложенная в п. 2.1, описывается системой уравнений (2.1)–(2.27).

На основе разработанной программы для ПЭВМ, были проведены численные эксперименты по расчету теплового режима массива многолетнемерзлых горных пород россыпных месторождений криолитозоны при следующих исходных данных:

➤ климатические данные по району месторождения приведены в табл. 3.1, 3.2;

➤ свойства горных пород россыпи приведены в табл. 3.6 [Мирнинский ГОК..., 2005];

➤ температура грунта на глубине нулевых годовых амплитуд  $T_e = -1,5$  °С;



Таблица 3.6

Свойства горных пород месторождения "Горное" (прииск Ирелях)

Наименование	Обозн.	Ед. изм.	П <sub>1</sub>	П <sub>2</sub>	П <sub>3</sub>	П <sub>4</sub>
Суммарная весовая влажность	$W$	доли ед.	0,16	0,10	0,23	0,04
Плотность	$\rho$	г/см <sup>3</sup>	2,06	2,20	2,03	2,45
Коэффициент пористости	$e$	доли ед.	0,53	0,34	0,72	0,19
Засоленность и ее степень	$D_s$	%	0,03	0,04	0,08	0,0
Незасол.						
Коэффициент теплопроводности в талом и мерзлом состоянии	$\lambda_t / \lambda_m$	ккал/(м·ч·К)	1,20	2,35	1,20	2,35
			1,35	2,50	1,36	2,50
Объемная теплоемкость в талом и мерзлом состоянии	$C_t / C_m$	ккал/(м <sup>3</sup> ·К)	628	640	691	640
			540	540	526	540
Температура начала замерзания	$T_\phi$	°С	-0,3	-0,1	-0,4	0,0
Средняя мощность слоя	$H_{cl}$	м	1,2*	2,0	1,5	

Примечание. П<sub>1</sub> – суглинок твердый с примесью органических веществ; П<sub>2</sub> – галечниковый грунт влажный; П<sub>3</sub> – мергель выветрелый, насыщенный водой; П<sub>4</sub> – известняк трещиноватый.

\* Мощность слоя торфов  $H_{cl} = 1,2$  м (при существующих больших значениях по котлованам) взята (принята при расчетах), как "наихудший" с теплофизической точки зрения вариант.

- время удаления торфов варьировалось по месяцам: апрель–май, октябрь–ноябрь, декабрь;
- в январе–марте на полигон свозятся дополнительно мерзлые пески и отсыпаются слоем толщиной до 1,5–2 м при конечной мощности по котловану 4 м;
- период зимнего затопления полигона: с сентября по конец апреля;
- глубина затопления песков россыпи изменялась от 1 до 3 м.

Распределения температур ММГП россыпи до снятия торфов (январь–май) представлены на рис. 3.1, распределение температур ММГП после снятия слоя торфов мощностью 1,2 м (торфа удалены к началу мая) в первое лето подготовки песков месторождения методом естественной оттайки – на рис. 3.2.

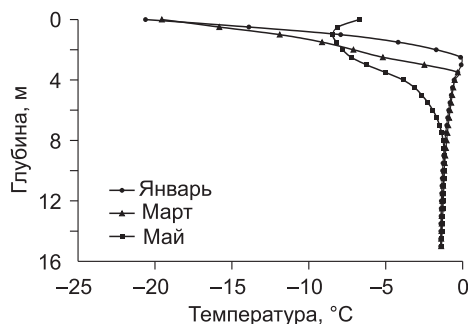


Рис. 3.1. Распределения температур в массиве горных пород россыпи до снятия торфов.

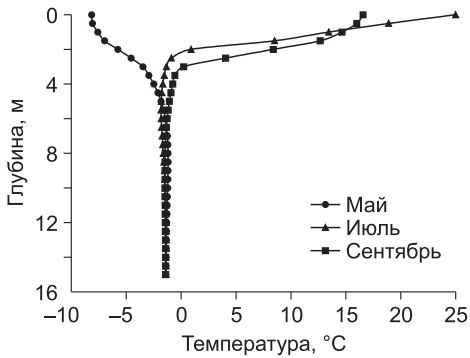


Рис. 3.2. Распределения температур в массиве горных пород россыпи после снятия торфов.

Как видно из графиков динамики температуры ММГП к началу сентября (моменту затопления россыпи) глубина оттаивания горных пород составляет не менее 3 м.

Графики температур ММГП на конец первой зимы после затопления котлована россыпи на глубину 1, 2 и 3 м представлены на рис. 3.3.

Из приведенных графиков видно, что затопление россыпи на глубину сезонного промерзания воды и более (2–3 м) предохраняет пески от зимнего промораживания и к началу следующего летнего сезона (спуска воды) даже в зимний период увеличивает глубину оттаявших пород на 1,0–1,5 м. Для полного предохранения талых пород от сезонного промерзания, минимальная глубина затопления для условий месторождения должна быть больше на 0,2–0,5 м максимальной толщины ледяного покрова. Увеличение глубины затопления россыпи способствует и увеличению глубины зимнего протаивания песков под водой. Этот факт можно объяснить достаточно высокой удельной теплоемкостью воды и, соответственно, ее высоким растепляющим эффектом.

На рис. 3.4 представлены графики температур ММГП на конец первого, второго и третьего лета (глубина зимнего затопления россыпи 2 м). Во всех случаях к концу второго лета глубина оттаявших горных пород составляет не менее 6 м, а к концу третьего лета – не менее 8 м.

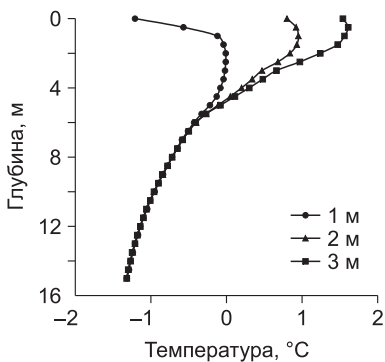


Рис. 3.3. Распределения температур в массиве горных пород россыпи на конец первой зимы после затопления котлована на глубину 1, 2 и 3 м.

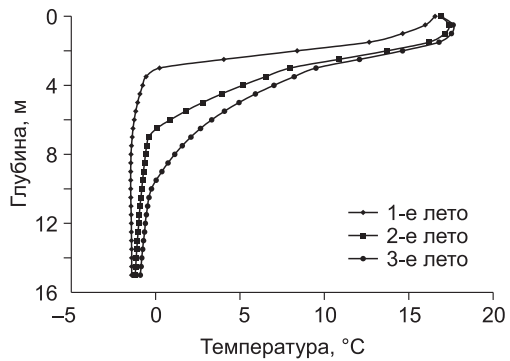


Рис. 3.4. Распределения температур в массиве горных пород россыпи на конец первого, второго и третьего лета (глубина зимнего затопления 2 м).

Таблица 3.7

**Теплофизические свойства горных пород (по: [Ермаков и др., 1998])**

Порода	Объемный вес, кг/м <sup>3</sup>	Влажность, %	Теплоемкость, Дж/(кг·К)		Теплопроводность, Вт/(м·К)	
			талого	мерзлого	талого	мерзлого
Торфа	980	6	3224	2177	1,16	2,2
Пески	1950	24	2562	2186	1,4	1,7

Здесь следует отметить, что данные расчеты соответствуют суммарной весовой влажности песков  $W = 0,10$  долей единиц (см. табл. 3.6). Но, как показывает наша оценка по расчетам и анализу геологических материалов, суммарная весовая влажность песков данного месторождения может достигать значений  $W = 0,18$  долей единиц. В этом случае, по нашим расчетам, глубина оттаявших горных пород к концу второго лета не будет превышать 4,5 м.

Также были проведены расчеты с теплофизическими характеристиками торфов и песков для других россыпных месторождений (как сравнительный, более жесткий вариант, с более высокой влажностью пород), взятыми в работе [Ермаков и др., 1998], с учетом возможности наличия на месторождении таких участков. Свойства торфов и песков приведены в табл. 3.7.

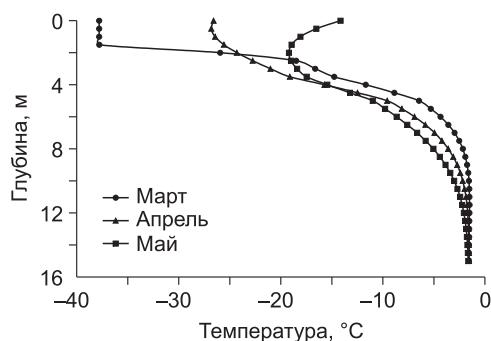
Результаты расчетов показывают, что к концу первого лета глубина оттаявших горных пород составит не более 2,5 м. К концу второго лета после спуска воды (глубина зимнего затопления россыпи – 2 м) глубина оттаявших горных пород не будет превышать 3,5 м. Это связано с тем, что с увеличением влажности горных пород увеличивается их теплоемкость и, соответственно, уменьшается глубина оттаивания за один сезон.

Графики распределения температур горных пород котлована по месяцам для варианта расчетов, когда в октябре–ноябре месяце с полигона удаляется верхний слой непродуктивных горных пород (торфа), затем в зимний период пески стоят обнаженные и потом в марте на полигон свозятся дополнительно мерзлые пески и отсыпаются слоем толщиной до 2 м при конечной мощности по котловану 4 м, представлены на рис. 3.5–3.9.

На рис. 3.5 даны графики распределения температур в массиве горных пород россыпи после отсыпки мерзлых песков.

Рис. 3.5. Распределения температур в массиве горных пород россыпи после отсыпки мерзлых песков.

Мощность слоя отсыпки 2 м. Пески отсыпаны в начале марта.



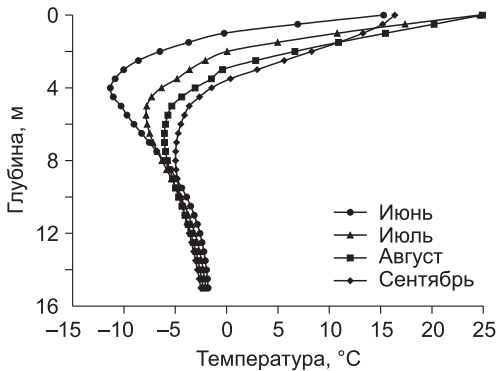


Рис. 3.6. Распределения температур в массиве горных пород россыпи после отсыпки мерзлых песков в первое лето.

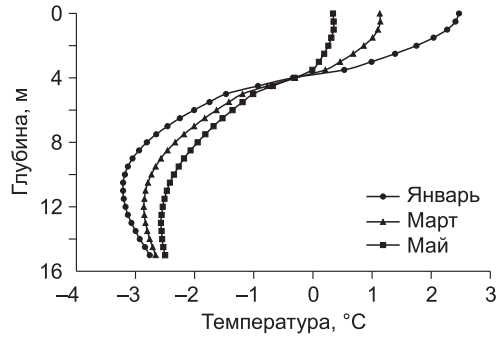


Рис. 3.7. Распределения температур в массиве горных пород россыпи после затопления на глубину 2 м.

Дополнительная отсыпка песков в начале марта, мощность слоя отсыпки 2 м.

ве горных пород россыпи после отсыпки вывезенными мерзлыми песками (март–май). Мощность отсыпаемого слоя – 2 м (рассмотрен “наихудший”, с теплофизической точки зрения”, вариант с температурой воздуха в марте  $-37\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Графики распределения температур в массиве горных пород россыпи по месяцам в первое лето естественной оттайки представлены на рис. 3.6. Как видно из графиков, к концу лета пески успевают протаять на глубину не менее 3,5 м, но в зоне мерзлых горных пород на глубине 5–10 м их температура значительно ниже ( $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) естественной температуры пород ( $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Это объясняется тем, что во время отсыпки мерзлых песков в марте произошла дополнительная аккумуляция холода (хладозарядка) пород на глубину до 10 м.

На рис. 3.7 показаны графики температур в массиве горных пород россыпи по месяцам под водой в первый зимний период, глубина зимнего затопления россыпи – 2 м. Происходит незначительное увеличение глубины протаивания песков под водой в зимние месяцы. В зоне мерзлых горных пород на глубине 5–10 м наблюдается повышение их температуры до  $-1,5\text{--}2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , т. е. значительная часть тепла воды, покрывающая полигон в зимнее время, расходуется не на увеличение глубины протаивания, а на нагрев мерзлых горных пород (уменьшение количества аккумулярованного холода, привнесенного с дополнительной зимней отсыпкой мерзлых песков).

Графики температур в массиве горных пород во второе и третье лето после спуска воды представлены на рис. 3.8 и 3.9. К концу второго лета глубина оттаявших горных пород не превышает 4,5–5 м. Следовательно, за второе лето глубина протаивания увеличивается не более чем на 2 м.

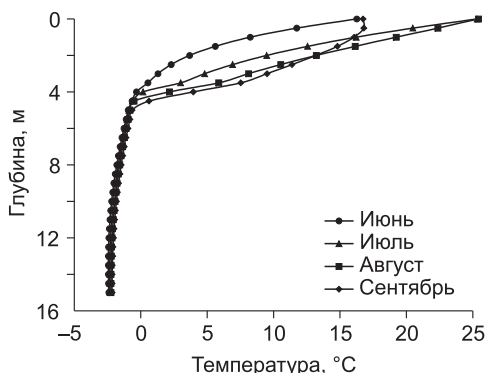


Рис. 3.8. Распределения температур в массиве горных пород россыпи во второе лето.

Глубина зимнего затопления 2 м; дополнительная отсыпка песков в начале марта, мощность слоя отсыпки 2 м.

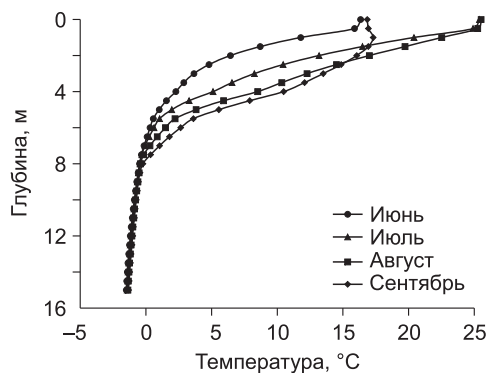


Рис. 3.9. Распределения температур в массиве горных пород россыпи во третье лето.

Глубина зимнего затопления 2 м; дополнительная отсыпка песков в начале марта, мощность слоя отсыпки 2 м.

На глубине 5–10 м температура пород стабилизируется и становится равной естественной ( $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

К концу третьего лета (см. рис. 3.9) оттаивание горных пород в глубину увеличивается и достигает не менее 7 м. Таким образом, можно сделать вывод, что разупрочнение мерзлых песков россыпи на глубину более 5 м при дополнительной отсыпке полигона мерзлыми песками в конце зимы требует не менее чем трехлетней предварительной подготовки методом естественной оттайки, с зимним предохранением песков от промораживания путем затопления полигона россыпи (котлована) на глубину не менее 2 м.

Таким образом, как видно из графиков температуры массива горных пород (см. рис. 3.5–3.9), дополнительная отсыпка полигона мерзлыми песками в конце зимы приводит к дополнительной аккумуляции холода в массиве и увеличению времени оттайки продуктивных песков. Для оттайки песков на глубину более 5 м потребуется три летних сезона.

Для того чтобы не допустить излишнего накопления холода в массиве горных пород россыпи, дополнительная отсыпка полигона продуктивными песками должна производиться незамедлительно после снятия торфов.

Графики температур в массиве горных пород россыпи на конец первого, второго и третьего лета для варианта расчетов, когда в декабре месяце с полигона удаляется верхний слой непродуктивных горных пород (торфа) и затем в течение следующего месяца на полигон свозятся дополнительно мерзлые пески и отсыпаются слоем толщиной до 2 м при конечной мощности по котловану 4 м, представлены на рис. 3.10.

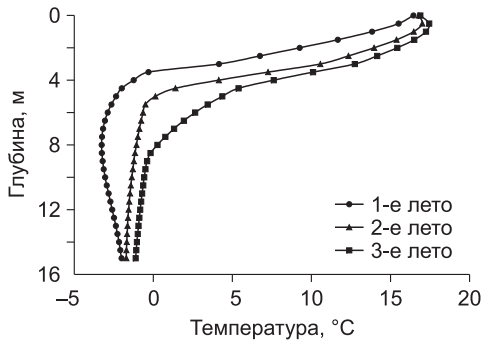


Рис. 3.10. Распределения температур в массиве горных пород россыпи на конец первого, второго и третьего лета.

Глубина зимнего затопления 2 м; дополнительная отсыпка песков в начале января, мощность слоя отсыпки 2 м.

Как видно из графиков, к концу первого лета (перед затоплением россыпи) глубина оттаявших песков достигает не менее 3,5 м. Причем в отличие от варианта, когда мерзлые пески отсыпались в марте, не происходит значительного промораживания мерзлых горных пород на глубине 4–10 м. Глубина оттаявших горных пород во второе лето достигает более 5 м, а к концу третьего лета – не менее 8 м.

Таким образом, можно сделать вывод, что дополнительная отсыпка полигона мерзлыми песками сразу же после снятия торфов не приводит к дополнительной аккумуляции холода в массиве и для оттайки песков на глубину более 5 м потребуются два летних сезона.

Проведенные дополнительные расчеты по варианту, когда мерзлые пески отсыпались на полигон сразу же после снятия торфов, показали, что при уменьшении мощности отсыпаемых мерзлых песков до 1,5 м (для котлованов с мощностью песков до 2,5 м), к концу второго лета можно увеличить глубину оттаявших горных пород до 6 м. Аналогичных результатов можно достичь и при мощности дополнительной отсыпки мерзлых песков 2 м (котлованы с мощностью песков до 2 м), но в этом случае разница во времени между технологическими операциями "удаление торфов" и "дополнительная отсыпка мерзлых песков" не должна превышать двух–четырёх недель.

В случае, когда удаление торфов и отсыпка мерзлых песков происходит в октябре–ноябре, мощность отсыпаемого слоя песков может достигать и 3 м, а глубина оттаявших горных пород россыпи к концу второго лета будет не менее пяти метров при глубине зимнего затопления россыпи не менее 2 м. Это объясняется тем, что дополнительная отсыпка песков в октябре–ноябре происходит на еще не полностью промерзшие горные породы (пески).

При наличии на месторождении участков с более жесткими теплофизическими характеристиками (табл. 3.8) необходимо предусмотреть мероприятия по интенсификации оттайки льда и спуска воды в котловане с целью ускорения начала оттайки песков.

Обзор литературных источников по тепловой и водной подготовке горных пород при разработке мерзлых россыпей [Ермаков и др., 1998; Перльштейн, 1979; Рашкин и др., 2004] показывает, что для ускорения на-

Таблица 3.8

**Глубина оттайки песков россыпи на конец 1-го и 2-го лета**

Технология подготовки полигона россыпи	Глубина оттаявших песков россыпи, м	
	на конец 1-го лета	на конец 2-го лета
В апреле удалили торфа. Глубина зимнего затопления 2 м*	3	6,5
В апреле удалили торфа. Глубина зимнего затопления 2 м**	3	4,5
В апреле удалили торфа. Глубина зимнего затопления 2 м***	2,5	3,5
В ноябре удалили торфа, в марте дополнительно отсыпали пески толщиной 2 м. Глубина зимнего затопления 2 м*	3,5	4,5
В декабре удалили торфа, в январе дополнительно отсыпали пески толщиной 2 м. Глубина зимнего затопления 2 м*	3,5	5
В октябре удалили торфа, в ноябре дополнительно отсыпали пески толщиной 2 м. Глубина зимнего затопления 2 м*	3,5	6
В октябре удалили торфа, в ноябре дополнительно отсыпали пески толщиной 3 м. Глубина зимнего затопления 2 м*	3	5

\* Свойства горных пород из табл. 3.6;

\*\* свойства горных пород из табл. 3.6, при  $W = 18 \%$ ;

\*\*\* свойства горных пород из табл. 3.7.

чала их оттаивания весной, к началу теплого периода года, снег и лед рекомендуется удалять.

Простейшим способом ускорения начала оттаивания является механическая уборка снега и льда (лед предварительно разрезают или взрывают). При этом следует иметь в виду, что преждевременное удаление снежного покрова (например, в начале марта) приведет к значительному охлаждению горных пород и в итоге не даст заметного увеличения глубины оттаивания по сравнению с естественными условиями. Оптимальным сроком уборки снега следует считать вторую половину апреля.

Вместо механического удаления снега может производиться зачернение его поверхности. Таким путем можно добиться уменьшения альбедо снежного покрова в 3 раза, почти так же возрастает сумма поглощенной коротковолновой радиации, в результате чего снег сходит на 3–4 недели раньше обычного. Для зачернения снега используют угольную крошку или сажу в смеси со шлаком и гравием. Оптимальный расход угольной крошки – около 300 г/м<sup>2</sup>. Зачернение поверхности значительно экономичнее механической уборки снежного покрова.

Для повышения скорости оттаивания песков необходимо предусмотреть мероприятия по эффективному спуску поверхностных вод затопляемого полигона. Эффективное осушение поверхности полигона значительно сокращает затраты тепла на испарение и увеличивает скорость оттаивания на 10–15 %.

### **3.2.2. Выводы и рекомендации по подготовке многолетнемерзлых песков методом естественной оттайки и водно-тепловой мелиорации**

1. Пески в зависимости от содержания льда и времени удаления торфов успевают за один сезон протаять на глубину 2,5–3,5 м. При этом торфа должны быть удалены к началу теплого периода года (март, первая половина апреля). Если торфа будут удалены в конце предыдущего теплого периода, то это приведет к усиленному промерзанию обнаженных продуктивных песков за зиму и, как следствие, к последующему значительному уменьшению глубины их оттайки.

2. Для полного предохранения талых песков от сезонного промерзания глубина зимнего затопления полигона должна быть больше на 0,2–0,5 м максимальной толщины ледяного покрова. Для условий месторождения "Горное" глубина затопления должна быть не менее 2 м.

3. К концу второго лета подготовки россыпи способом естественной оттайки с зимним предохранением песков от промораживания затоплением, глубина оттаявших горных пород россыпи будет не менее 4,5–5,5 м.

4. К концу третьего лета – не менее 7–8 м.

5. Для интенсификации процесса оттайки ледового покрова рекомендуется производить его зачернение из расчета 300 г/м<sup>2</sup> поверхности, а также необходимо предусмотреть мероприятия по эффективному спуску поверхностных вод затопливаемого полигона.

6. В случае, когда на полигон предполагается свозить дополнительные пески, разница во времени между технологическими операциями "удаление торфов" и "дополнительная отсыпка мерзлых песков" не должна превышать двух–четырёх недель.

7. В случае, когда на полигон предполагается свозить дополнительные пески в ноябре–марте, то мощность отсыпки не должна превышать 1,5–2,0 м.

8. В случае, когда удаление торфов и отсыпка мерзлых песков осуществляется в сентябре–начале ноября, то мощность отсыпаемого слоя песков может достигать 3 м.

### **3.3. МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬСТВА ГРУНТОВЫХ ПЛОТИН ДРАЖНЫХ ПОЛИГОНОВ МЕТОДОМ ПОСЛОЙНОГО НАМОРАЖИВАНИЯ**

#### **3.3.1. Расчет послойного намораживания льдопородной плотины**

Лед и замороженный грунт уже многие годы используется на Севере при строительстве гидротехнических сооружений (дамбы, плотины), которые могут эксплуатироваться длительное время [СНиП 2.06.05-84, 1991; Чжан, 2000, 2002]. Ледяные и льдопородные сооружения являются самыми дешевыми, прочными и устойчивыми благодаря большому количеству аккумулированного в зимнее время атмосферного холода, запасов которого вполне достаточно для поддержания тела плотин (дамб) в



замороженном и, следовательно, устойчивом состоянии в теплый период года.

При строительстве плотин дражных котлованов месторождения "Горное" рекомендуется использовать мерзлые раздробленные вскрышные породы (торфа), расход воды составляет от 150 до 350 л на 1 м<sup>3</sup> породы. Замерзшая смесь имеет высокую прочность на сжатие – от 2,0 до 6,0 МПа при температуре –5 °С [Курилко, 2004].

В зависимости от начального значения отрицательной температуры кусков мерзлой породы и количества заливаемой воды слой влажных горных пород может быть заморожен за счет холода, аккумулированного в мерзлых кусках. На первом этапе исследований решено не учитывать исходную отрицательную температуру мерзлой породы, а повышение интенсивности замораживания льдопородного массива за счет этого фактора принять в запас надежности результатов расчета. Принято, что слой водонасыщенных дробленых горных пород имеет исходную температуру, равную или выше 0 °С.

Оптимизация формирования льдопородного массива состоит в минимизации времени замораживания и является нестационарной, нелинейной и многопараметрической задачей [Крылов и др., 1977]. На время замораживания влияет много факторов, которые необходимо учитывать в их взаимодействии. Это объем и начальная температура замораживаемой воды, температура атмосферного воздуха и скорость его движения, температура дробленых пород, их количество и грансостав, конечная температура льдопородного массива. Только при оптимальном соотношении всех этих параметров можно образовать монолитный искусственный замороженный массив с необходимыми прочностными и фильтрационными свойствами за заданный период времени.

Укладка льдопородной смеси производится в зимнее время и состоит из следующих технологических операций: раздробленные торфа доставляются на место строительства плотины (дамбы) и укладываются слоями снизу-вверх с проливом водой, распыляемой форсунками поливомоечной машины. После промораживания слоя атмосферным холодом сверху укладывается другой слой и так далее до необходимой высоты.

Возведение грунтовой плотины с льдопородным ядром осуществляется в следующем порядке:

- 1) подготовка основания будущей плотины;
- 2) устройство зуба плотины из льдопородного массива;
- 3) послойная отсыпка и уплотнение раздробленных мерзлых торфов в теле плотины на высоту слоя льдопородного массива с одновременной отсыпкой каменной (из щебня) пригрузки;
- 4) послойная отсыпка, уплотнение, пролив водой и промораживание раздробленных мерзлых горных пород в ядре плотины на высоту слоя льдопородного массива;
- 5) отсыпка и уплотнение раздробленных мерзлых горных пород в теле плотины до формирования плотины необходимой высоты.

Для моделирования послойного намораживания грунтовой плотины примем следующие упрощающие допущения.

1. Поскольку ширина и длина грунтовой плотины в несколько раз превышает ее высоту, то процесс распространения тепла рассматривается только по высоте. Здесь мы исходим из известного положения А.В. Лыкова [Лыков, 1967], согласно которому, если один из размеров тела не менее, чем в три раза меньше остальных его размеров, то процесс переноса тепла, идущий в направлении наименьшего размера, можно считать одномерным.

2. Промежуток времени, затрачиваемый на отсыпку одного слоя, не учитывается, т. е. считается, что каждый слой появляется мгновенно в момент начала этого промежутка.

3. Теплообмен на поверхности слоя с атмосферным воздухом определяется по закону Ньютона с коэффициентом теплообмена  $\alpha$ .

Математическая модель исследуемого процесса послойного намораживания льдопородной плотины, изложенная в п. 2.1, описывается системой уравнений (2.1)–(2.27).

На основе разработанной программы для ПЭВМ, были проведены численные эксперименты по расчету послойного намораживания льдопородной плотины россыпного месторождения криолитозоны при следующих исходных данных:

– климатические данные по району месторождения приведены в табл. 3.1, 3.2;

– свойства горных пород (торфов) тела, ядра и основания плотины приведены в табл. 3.9 [Мирнинский ГОК, 2005];

– начальная температура слоя изменяется от 0 °С до +3 °С;

– расход воды, л/м<sup>3</sup>: 150, 200, 250, 300 и 350;

– высота плотины изменяется от 6 до 18 м;

– проморозка слоя до температуры –5 °С;

– толщина слоя изменяется от 0,3 до 0,6 м;

– температура грунта на глубине нулевых годовых амплитуд  $T_e = -1,5$  °С.

Основным управляющим параметром при формировании льдопородного массива является время замораживания одного слоя при задан-

Таблица 3.9

### Характеристика горных пород плотины

Наименование	Обозн.	Ядро	Тело	Основание
Влажность, доли ед.	$W$	0,15–0,35	0,16	0,04
Плотность, г/см <sup>3</sup>	$\rho$	2,06	2,06	2,45
Коеф. теплопроводности в талом и мерзлом состоянии, ккал/(м·ч·К)	$\lambda_t/\lambda_m$	1,20	1,20	2,35
		1,35	1,35	2,50
Объемная теплоемкость в талом и мерзлом состоянии, ккал/(м <sup>3</sup> ·К)	$C_t/C_m$	628	628	640
		540	540	540
Температура начала замерзания, °С	$T_\phi$	–0,3	–0,3	–0,3

Таблица 3.10

**Время промораживания слоя (ч) в зависимости от температуры атмосферного воздуха, начальной температуры, расхода воды и толщины слоя**

Толщина слоя, м	Температура воздуха, °С					
	-15	-20	-25	-30	-35	-40
1	2	3	4	5	6	7
Начальная температура слоя + 3 °С; расход воды 150 л/м <sup>3</sup>						
0,3	54	41	33	28	25	22
0,4	83	63	51	44	38	35
0,5	116	89	73	62	55	49
0,6	155	119	97	83	74	66
Начальная температура слоя + 3 °С; расход воды 200 л/м <sup>3</sup>						
0,3	68	51	41	35	30	27
0,4	103	78	63	54	47	42
0,5	145	110	90	76	67	60
0,6	193	147	120	102	90	81
Начальная температура слоя + 3 °С; расход воды 250 л/м <sup>3</sup>						
0,3	83	62	49	41	35	32
0,4	125	94	75	63	55	49
0,5	175	132	107	90	79	70
0,6	231	176	143	121	106	95
Начальная температура слоя + 3 °С; расход воды 300 л/м <sup>3</sup>						
0,3	98	73	57	47	41	36
0,4	147	110	88	73	64	57
0,5	205	154	124	104	91	81
0,6	270	205	166	140	122	109
Начальная температура слоя + 3 °С; расход воды 350 л/м <sup>3</sup>						
0,3	114	84	66	54	46	41
0,4	170	127	101	84	72	64
0,5	235	177	142	119	103	92
0,6	309	235	190	159	138	123
Начальная температура слоя + 1 °С; расход воды 150 л/м <sup>3</sup>						
0,3	48	37	30	26	23	21
0,4	73	56	46	40	35	32
0,5	102	78	65	56	50	45
0,6	136	104	86	75	66	60
Начальная температура слоя + 1 °С; расход воды 200 л/м <sup>3</sup>						
0,3	60	46	37	32	28	26
0,4	91	69	57	49	43	39
0,5	128	97	80	69	61	55
0,6	169	130	107	92	81	73
Начальная температура слоя + 1 °С; расход воды 250 л/м <sup>3</sup>						
0,3	73	55	45	38	34	30
0,4	110	83	68	58	51	46
0,5	153	117	96	82	72	65
0,6	203	156	128	109	96	87

Окончание табл. 3.10

1	2	3	4	5	6	7
Начальная температура слоя +1 °С; расход воды 300 л/м <sup>3</sup>						
0,3	86	65	53	45	39	35
0,4	129	98	80	68	60	53
0,5	180	137	112	95	84	75
0,6	237	181	149	127	111	100
Начальная температура слоя +1 °С; расход воды 350 л/м <sup>3</sup>						
0,3	100	75	61	51	45	40
0,4	149	112	91	78	68	61
0,5	207	157	128	109	95	85
0,6	272	208	170	144	127	113
Начальная температура слоя 0 °С; расход воды 150 л/м <sup>3</sup>						
0,3	32	25	21	18	16	15
0,4	49	38	32	28	25	23
0,5	69	53	44	39	35	32
0,6	92	71	59	52	46	42
Начальная температура слоя 0 °С; расход воды 200 л/м <sup>3</sup>						
0,3	39	30	25	22	19	18
0,4	59	46	38	33	29	27
0,5	83	64	53	46	41	38
0,6	111	86	71	62	55	50
Начальная температура слоя 0 °С; расход воды 250 л/м <sup>3</sup>						
0,3	46	35	29	25	23	21
0,4	70	54	44	38	34	31
0,5	98	75	62	54	48	44
0,6	131	100	83	72	64	58
Начальная температура слоя 0 °С; расход воды 300 л/м <sup>3</sup>						
0,3	53	41	34	29	26	24
0,4	81	62	51	44	39	35
0,5	113	87	71	62	55	49
0,6	150	115	95	82	73	66
Начальная температура слоя 0 °С; расход воды 350 л/м <sup>3</sup>						
0,3	61	46	38	33	29	26
0,4	92	70	57	49	44	40
0,5	128	98	81	69	61	55
0,6	170	130	107	92	82	74

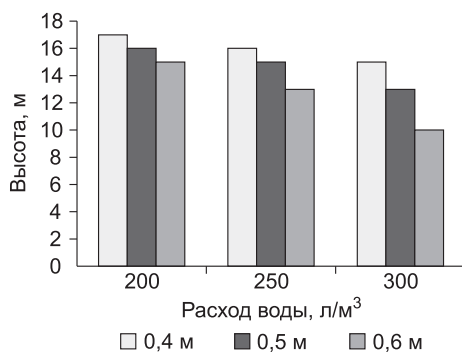
ной толщине слоя. Время счета останавливается после укладки последнего слоя и при достижении температуры льдопородного массива заданного значения ( $-5^{\circ}\text{C}$ ).

В табл. 3.10 и на рис. 3.11 приведены зависимости времени промораживания одного слоя от температуры атмосферного воздуха, начальной температуры, влажности и толщины слоя.

Наиболее существенное значение для промерзания слоя до заданной температуры, при прочих равных условиях, имеет его толщина. Так, на-

Рис. 3.11. Высота плотины при различной толщине укладываемого слоя и расходе воды при формировании льдопородного массива в период декабрь–февраль.

Начальная температура слоя 0 °С.



пример, слой толщиной 0,3 м промерзает до температуры  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  в три раза быстрее, чем слой толщиной 0,6 м (табл. 3.10).

Существенное значение имеет также температура атмосферного воздуха. Так, на проморозку слоя толщиной 0,5 м, при температуре воздуха  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  требуется более чем в два раза больше времени, чем при температуре воздуха  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Увеличение влажности слоя на 10 % требует увеличения времени проморозки примерно на треть, т. е. излишнее переувлажнение слоя отсыпаемых горных пород потребует большего времени на его проморозку. В то же время недоувлажнение отсыпаемого слоя приведет к тому, что он будет иметь в замороженном состоянии значительно более низкие термомеханические характеристики, чем при полном влагонасыщении, а образовавшиеся межкомьевые пустоты, не заполненные льдом, будут способствовать неблагоприятной фильтрационной устойчивости сооружения.

Более высокая начальная температура вновь отсыпаемого слоя значительно увеличивает время его промораживания. Например, при начальной температуре отсыпаемого слоя  $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , расходе воды  $250\text{ л/м}^3$ , толщине 0,5 м и температуре воздуха  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  на полное промораживание слоя потребуется 5,5 сут. При начальной температуре слоя  $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$  и прочих равных условиях – 5 сут., а при начальной температуре слоя  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  – 3 сут. Таким образом, чем ближе температура вновь отсыпаемого слоя к  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , тем быстрее происходит его полное промораживание до заданной температуры.

Наиболее благоприятные месяцы для возведения плотины методом послойного намораживания – декабрь, январь и февраль, так как в эти месяцы средняя температура воздуха ниже  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (см. табл. 3.1) и, соответственно, можно добиться наиболее высокой скорости проморозки каждого слоя. В ноябре среднемесячная температура составляет  $-23,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ , но с теплофизической точки зрения в этот месяц лучше подготовить и проморозить основание будущей плотины. Это позволит сформировать благоприятный температурный режим в основании плотины, что будет способствовать статической и фильтрационной устойчивости всего сооружения.

Таблица 3.11

**Календарный график работ по строительству грунтовой плотины  
методом послойного намораживания**

Виды работ	Время проведения работ, месяцы года					
	октябрь	ноябрь	декабрь	январь	февраль	март
Подготовка основания плотины						
Промораживание основания плотины						
Послойное намораживание ядра плотины						
Укладка тела плотины						
Наружная присыпка плотины						

В табл. 3.11 представлен примерный календарный график работ по строительству грунтовой плотины методом послойного намораживания.

Рассмотрим примеры расчета возведения плотины методом послойного намораживания.

**Пример 1.** Время начала строительства – 1 декабря. Толщина слоя укладываемых горных пород – 0,5 м. Начальная температура слоя  $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Расход воды –  $300\text{ л/м}^3$ . Предположим, что укладка, уплотнение и проливка водой одного слоя осуществляется за одни сутки. Тогда на промораживание слоя (см. табл. 3.10) потребуется четверо суток. Таким образом, в течение декабря месяца можно наморозить 6 слоев толщиной по 0,5 м, или льдопородный массив высотой 3 м. Соответственно, в январе месяце можно наморозить 8 слоев толщиной по 0,5 м, в феврале – 6 слоев по 0,5 м. В итоге за три зимних месяца (декабрь, январь и февраль) можно наморозить льдопородный массив высотой 10 м.

**Пример 2.** Время начала строительства – 1 декабря. Толщина слоя укладываемых горных пород – 0,6 м. Начальная температура слоя  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Расход воды –  $250\text{ л/м}^3$ . Предположим, что укладка, уплотнение и проливка водой одного слоя осуществляется за одни сутки. Тогда на промораживание слоя (см. табл. 3.10) потребуется трое суток. Таким образом, в течение декабря можно наморозить 7 слоев толщиной по 0,6 м, или льдопородный массив высотой 4,2 м. Соответственно, в январе можно наморозить 8 слоев толщиной по 0,6 м, в феврале – 7 слоев по 0,6 м. В итоге за три зимних месяца (декабрь, январь и февраль) можно наморозить льдопородный массив высотой 13 м.

Наиболее реальным, с технологической точки зрения, вариантом с позиции получения монолитного льдопородного ядра с нулевым коэффициентом фильтрации является вариант с расходом воды  $300\text{ л/м}^3$  и более. Более низкие значения расхода воды для промачивания слоя пород требуют более высокого их уплотнения.

Реальный расход воды и степень уплотнения слоя пород определяется опытным путем на месте строительства.

Для ускорения строительства плотины методом послойного намораживания и уменьшения времени простоя тяжелой техники рекомендуется строительство плотины разделить на несколько участков по типу технологических операций: отсыпка мерзлого грунта, выравнивание слоя необходимой толщины, уплотнение слоя, проливка слоя водой, промораживание слоя до необходимой температуры.

Графики зависимости высоты плотины от толщины укладываемого слоя и различных расходов воды при формировании льдопородного массива в период с начала декабря по конец февраля (начальная температура слоя 0 °С) представлены на рис. 3.11.

Таким образом, оптимизация технологических параметров послойного намораживания при строительстве мерзлой грунтовой плотины позволит формировать льдопородный массив с необходимыми прочностными свойствами, что будет способствовать повышению безопасности сооружения и ускорению сроков его возведения.

### **3.3.2. Выводы**

1. Увеличение влажности вновь отсыпаемого слоя на 10 % требует увеличения времени проморозки примерно на треть.

2. Существенное значение имеет время начала строительства грунтовой плотины. Так, если строительство грунтовой плотины начинается в октябре при устойчивой температуре атмосферного воздуха  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  и не полностью промерзшим деятельным слоем, то в основании грунтовой плотины на глубине 0,8–1,5 м остается незамерзшая часть грунта, которая, как показывают расчеты, может существовать достаточно долгое время (от года до четырех и более лет после начала строительства грунтовой плотины). Наличие талой зоны в основании грунтовой плотины совершенно недопустимо с точки зрения технологической и фильтрационной устойчивости грунтовой плотины.

3. Для обеспечения устойчивости основания, возведение грунтовой плотины целесообразно начинать с декабря, когда деятельный слой полностью проморозится.

4. В районах распространения многолетнемерзлых горных пород за зимний период методом послойного намораживания горных пород (3–4 месяца) может быть возведена грунтовая плотина высотой до 16 м.

## **3.4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ПЛОТИН ДРАЖНЫХ КОТЛОВАНОВ РОССЫПНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

### **3.4.1. Варианты расчета теплового режима грунтовой плотины**

На полигоне россыпного месторождения с установившимся тепло-влажностным режимом грунтов основания возведена земляная плотина определенных геометрических размеров. Начальное распределение тем-

пературы, влажности в теле и основании плотины, а также физические и теплофизические свойства грунтов известны.

В теле возведенной плотины под влиянием теплообмена с атмосферным воздухом (гребень, правый и левый откосы), с водой (постоянно или периодически покрываемая водой поверхность откосов и приплотинной части полигонов) и грунтами основания происходит формирование определенного температурного режима. В основании плотины естественный температурный режим грунтов изменяется в соответствии с новыми условиями теплообмена на поверхности.

Необходимо выяснить динамику температурного поля плотины и ее основания в период эксплуатации вплоть до периодически установившегося режима, как основы статической и фильтрационной устойчивости сооружения.

При разработке математической модели исследуемого процесса приняты следующие упрощающие допущения:

1) теплообмен на поверхности плотины (гребень, правый и левый откосы) и массива горных пород приплотинной части полигонов с атмосферным воздухом определяется по закону Ньютона с коэффициентом теплообмена  $\alpha$ ;

2) фильтрация воды в теле плотины отсутствует;

3) за время эксплуатации плотины ее геометрические размеры, а также физические и теплофизические свойства грунтов не изменяются.

Расчетная схема приведена на рис. 3.12, 3.13.

В соответствии с принятыми расчетной схемой и упрощающими допущениями расчет двумерного температурного поля плотины и ее основания при нестационарном режиме сводится к решению системы дифференциальных уравнений теории теплопроводности [Тихонов, Самарский, 1977]:

$$[C(T) + L_1 \cdot W \cdot \rho \cdot \delta(T - T^*)] \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right],$$

$$C(T) = \begin{cases} c_1 \rho_1, & T < T^*; \\ c_2 \rho_2, & T > T^*; \end{cases} \quad \lambda(T) = \begin{cases} \lambda_1, & T < T^*; \\ \lambda_2, & T > T^*; \end{cases} \quad (3.1)$$

$$x \in D_x, \quad y \in D_y, \quad t > 0.$$

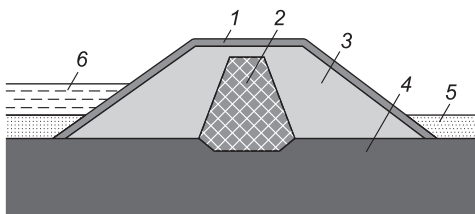


Рис. 3.12. Схема поперечного разреза земляной плотины.

1 – каменная наброска, 2 – противофильтрационное ядро из суглинка, 3 – тело плотины, 4 – плотик (скала), 5 – пески, 6 – вода.



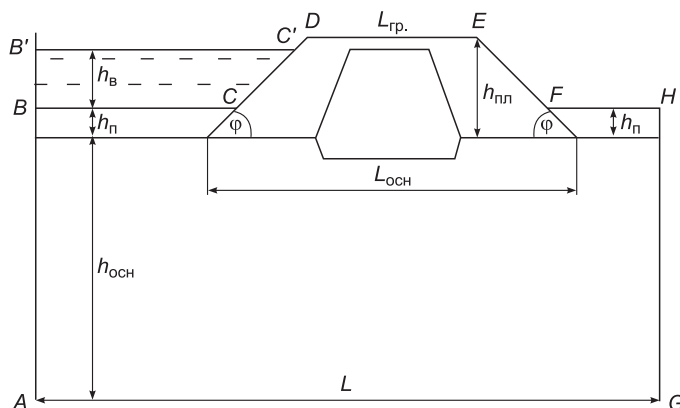


Рис. 3.13. Схема расчета плотины россыпного месторождения.

$L$  – ширина расчетной области, м;  $h_{осн}$  – глубина основания плотины, м;  $h_в$  – уровень воды, м;  $h_{пл}$  – высота плотины, м;  $\varphi$  – угол откоса плотины, град.;  $L_{осн}$  – ширина основания плотины, м;  $L_{гр}$  – ширина гребня плотины, м;  $h_{п}$  – мощность песков, м.  $ABCDEFHG$  ( $AB'C'DEFHG$ ) – границы расчетной области.

Начальное условие:

$$T(x, y, 0) = T_0(x, y). \quad (3.2)$$

Граничные условия:

$$\text{на } BCDEFH \quad \lambda(T, x, y) \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T(x, y, t) - T_B(t)) - Q_R(t), \quad (3.3)$$

$$\text{на } AB, HG \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad (3.4)$$

$$\text{на } AG \quad \frac{\partial T}{\partial y} = T_e. \quad (3.5)$$

Расчеты температурного режима грунтовой плотины производились методом конечных разностей с применением локально-одномерной схемы [Самарский, 1983, 2003].

На основе разработанной программы для ПЭВМ были проведены численные эксперименты по расчету теплового режима грунтовой плотины, ее основания и приплотинной части массива многолетнемерзлых горных пород россыпных месторождений криолитозоны при следующих исходных данных:

– климатические данные по району месторождения приведены в табл. 3.1, 3.2;

– свойства горных пород тела плотины и россыпи приведены в табл. 3.6, 3.9 [Мирнинский ГОК..., 2005];

– температура грунта на глубине нулевых годовых амплитуд  $T_e = -1,5^\circ\text{C}$ .

Геометрические размеры плотин, принятые для расчетов

Наименование	Обозн.	Плотины			
		I	II	III	IV
Ширина гребня, м	$L_{гр}$	10	10	10	10
Угол откоса, град.	$\varphi$	19	19	20	34
Ширина основания, м	$L_{осн}$	46,2	60	75	36,4
Высота, м	$h_{пл}$	6,5	9	12	10,0
Глубина затопления россыпи, м	$h_{в}$	3–5	3–5	3–5	3–9
Средняя толщина каменной наброски, м	–	–	–	–	0,7–1,5

Геометрические размеры плотин приведены в табл. 3.12.

Плотина IV предусматривает каменную наброску по верху и откосам тела плотины толщиной 0,7–1,5 м. Применение каменной наброски по верху тела плотины позволит увеличить угол откоса плотины до  $34^\circ$  и, соответственно, уменьшить основание плотины, что, в свою очередь, приведет к значительному уменьшению объемов работ нулевого цикла при подготовке основания плотины и к существенному уменьшению объемов грунтов, отсыпаемых в тело плотины.

Кроме того, каменная наброска выполняет предохранительную роль от оплывания откосов плотины при их длительном стоянии под слоем воды.

Помимо прочего, зарождение морозобойных трещин в земляных плотинах возможно в интервале глубин 0,0–1,5 м от поверхности. Поэтому рекомендуемая отсыпка защитного слоя толщиной 1,5 м и более, из крупнозернистого материала исключает возможность образования морозобойных трещин. Эта же мера автоматически защищает плотину от сезонного пучения, т. е. для плотин этого типа является универсальной [Чжан, 2000, 2002].

На рис. 3.14–3.19 приведены изолинии температур в теле плотины высотой 6,5 м, возведенной методом послойного намораживания в декабре месяце. На рис. 3.14 и 3.15 приведены изолинии температур в теле плотины в первую зиму после ее возведения.

Видно, что в теле и основании плотины в первую же зиму формируется устойчивый отрицательный температурный режим. В течение первых двух лет после ее возведения с левой стороны плотины ведется подготовка россыпи методом естественной оттайки с зимним предохранением песков от промораживания затоплением полигона на глубину 4 м. В дальнейшем этот участок россыпи с левой стороны плотины затоплен в течение трех лет без летнего спуска воды.

На рис. 3.16 и 3.17 показаны изолинии температур в теле плотины на 1 сентября, перед зимним затоплением правого полигона плотины.

На рисунках видно, что в основании и теле плотины сохраняются устойчивые отрицательные температуры в течение всего летнего периода не выше  $-2^{\circ}\text{C}$ , что является вполне достаточным для ее фильтрационной устойчивости.

За летний период оттайка в теле плотины происходит по всей ширине гребня и не превышает 3 м. По откосам плотины оттайка происходит только со стороны незатопленных участков (правый и верхняя часть левого откосов плотины) и составляет глубину не более 2,5–3,0 м за летний сезон.

В течение зимнего периода тело плотины промерзает полностью со стороны ее гребня, даже если затоплены оба полигона (котлована) с двух сторон плотины. Так, на рис. 3.17 приведены изолинии температур в теле плотины через два года после подготовки песков правого полигона методом естественной оттайки с зимним предохранением песков от промора-

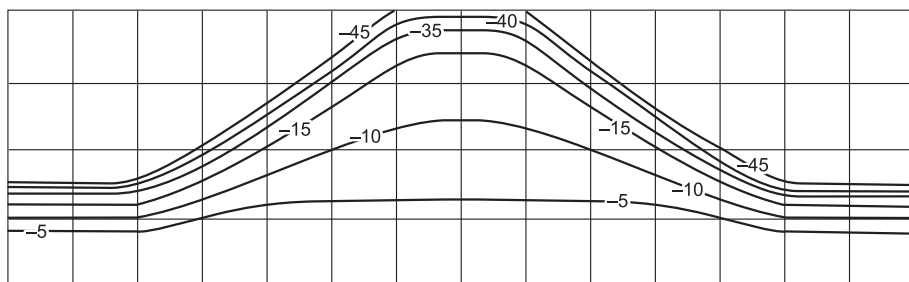


Рис. 3.14. Плотина 6,5 м. Изолинии температур в теле плотины по окончании ее возведения.

Изолинии температур даны на 1 января.

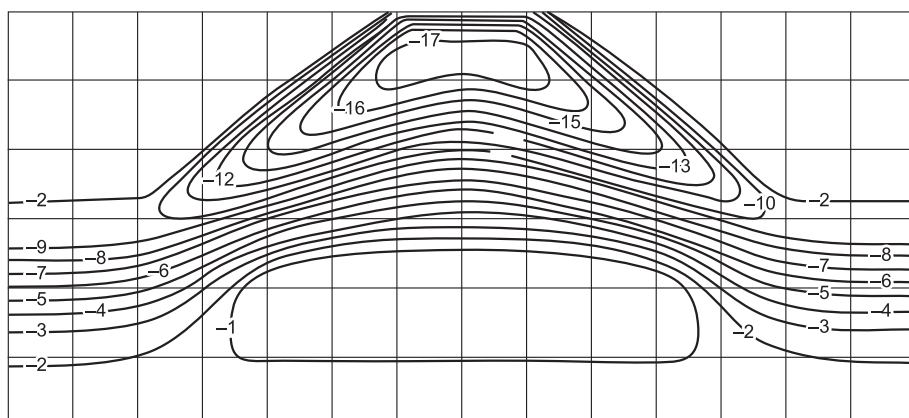


Рис. 3.15. Плотина 6,5 м. Изолинии температур в теле плотины через 4 месяца после ее возведения.

Изолинии температур даны на 1 мая.

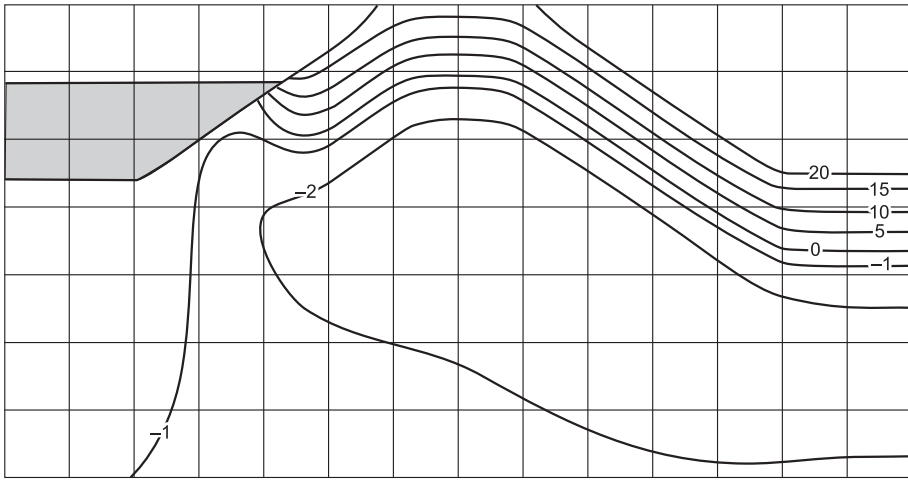


Рис. 3.16. Плотина 6,5 м. С левой стороны плотина затоплена в течение 5 лет. Глубина затопления 4 м. С правой стороны ведется подготовка полигона в течение одного лета. Изолинии температур даны на 1 сентября.

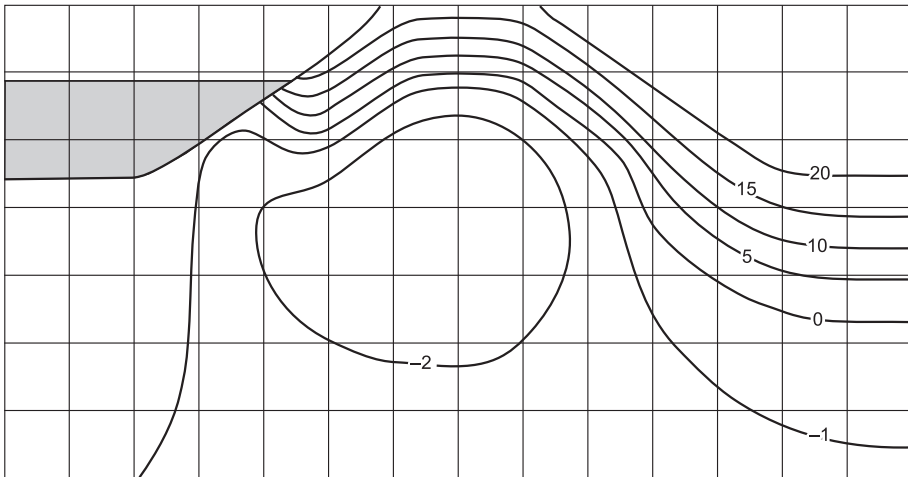


Рис. 3.17. Плотина 6,5 м. С левой стороны плотина затоплена в течение 6 лет. Глубина затопления 4 м. С правой стороны ведется подготовка полигона в течение двух лет. Изолинии температур даны на 1 сентября.

живания затоплением полигона. Видно, что с правой стороны полигона произошла оттайка песков на глубину не менее 7 м. С левой стороны полигон продолжает обрабатываться дражным способом в течение всего лета. Тем не менее на конец летнего периода в теле и основании плотины продолжает сохраняться устойчивое мерзлое ядро. Температура основания плотины не выше  $-2^{\circ}\text{C}$ .

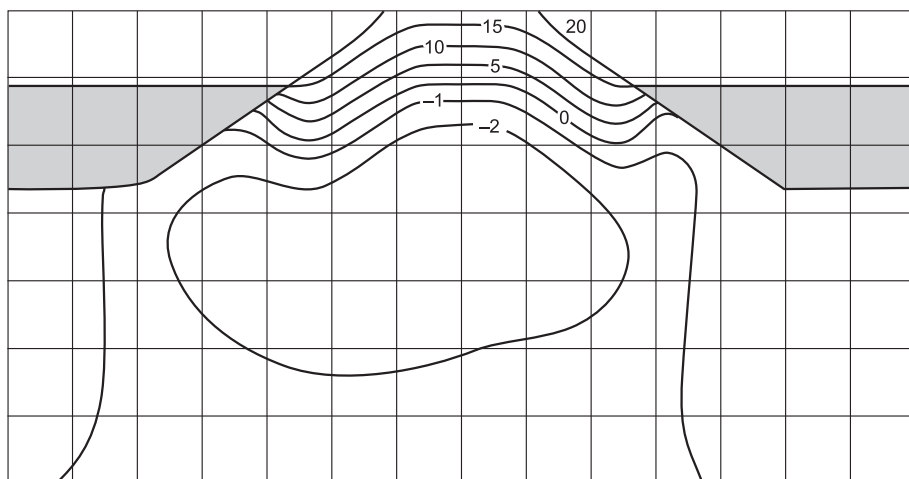


Рис. 3.18. Плотина 6,5 м. С левой стороны плотина затоплена в течение 9 лет, с правой стороны – 3 лет.

Глубина затопления 4 м. Изолинии температур даны на 1 сентября.

На рис. 3.18 приведены изолинии температур в теле этой же плотины при дражной отработке правого полигона в течение 3 лет, с левой же стороны плотины вода не спускалась в течение 9 лет (рассмотрен "наихудший" с теплофизической точки зрения вариант существования плотины). Видно, что в теле плотины практически по всему ее основанию продолжает сохраняться область отрицательных температур. Глубина оттайки грунтов на гребне плотины менее 3 м.

На рис. 3.19 приведены изолинии температур в теле плотины через 40 лет после ее возведения и после 30 лет отработки дражных полигонов с двух сторон плотины. Как показывают расчеты, установившийся периодический тепловой режим в теле и основании плотины устанавливается уже на 3–4 год после спуска воды с обоих полигонов. Растепление плотины не происходит, в теле плотины сохраняется устойчивое льдоподобное ядро. В случае возникновения необходимости повторной отработки полигонов дражным способом эти плотины могут снова использоваться без дополнительных мероприятий по их реконструкции.

Нами также были проведены расчеты по предыдущему варианту при условии, что тело плотины имеет влажность  $W = 20\%$ . Как показали расчеты, увеличение влажности тела плотины приводит к уменьшению глубины летней оттайки, которая к концу летнего периода не превышает 2,5 м.

Таким образом, увеличение влажности тела плотины до верхнего предела пластичности грунтов уменьшает глубину оттайки за летний период.

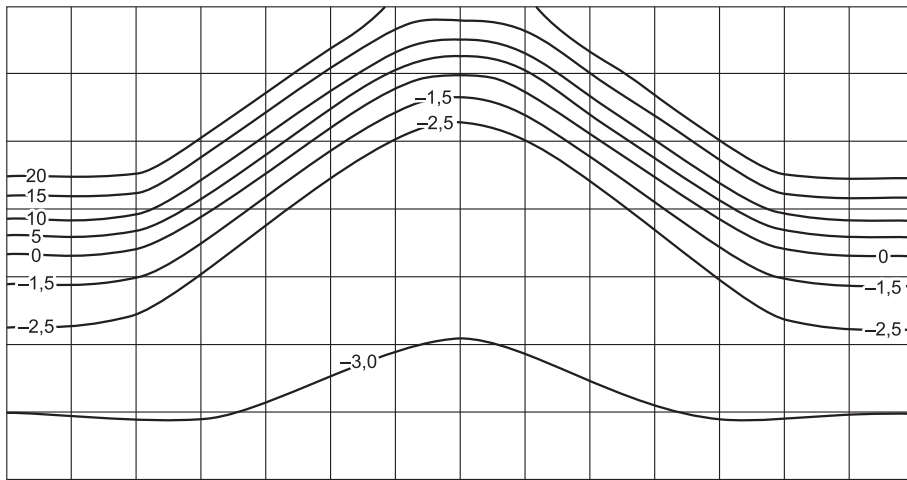


Рис. 3.19. Плотина 6,5 м. Изолинии температур в теле плотины через 40 лет после ее возведения.

Изолинии температур даны на 1 сентября.

На рис. 3.20 приведены изолинии температур в теле плотины высотой 6,5 м, угол откоса  $19^\circ$ , возведенной методом послойного намораживания в октябре месяце через 8 мес. после ее возведения. На рис. 3.21 приведены изолинии температур в теле плотины, когда правый полигон затоплен в течение 8 зимних месяцев (изолинии температур даны на 1 мая).

Как видно из рис. 3.20, 3.21, в теле и основании плотины после ее возведения в течение двух лет остается зона "вялой" мерзлоты с температурой от 0 до  $-1^\circ\text{C}$ , которая, как показывают расчеты, за время ее эксплуатации с периодическим режимом затопления правого и левого полигонов в течение нескольких лет постепенно увеличивается, что может привести к возникновению фильтрации воды через трещиноватые породы основания плотины.

Расчеты, проведенные для плотин других геометрических размеров, возведенных методом послойного намораживания в октябре месяце, показывают аналогичные результаты.

Таким образом, если строительство плотины начинается в октябре при температуре атмосферного воздуха выше  $-10^\circ\text{C}$  и не полностью промерзшим деятельным слоем, то в основании плотины на глубине 0,5–6,5 м образуется незамерзшая часть грунта, которая, как показывают расчеты, может существовать достаточно долгое время. Причем, чем больше геометрические размеры плотины (в высоту или ширину), тем более длительное время существует таликовая зона в основании плотины. При этом с увеличением размеров плотины увеличивается зона "вялой" мерзлоты в основании плотины, что может привести к возникновению фильтрации воды через трещиноватые породы основания плотины.

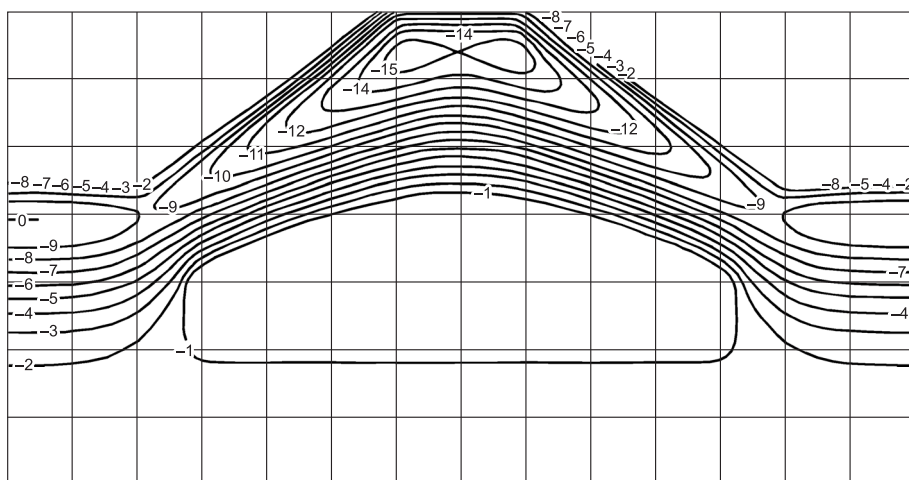


Рис. 3.20. Плотина 6,5 м. Изолинии температур в теле плотины через 7 мес. после ее возведения.

Изолинии температур даны на 1 мая.

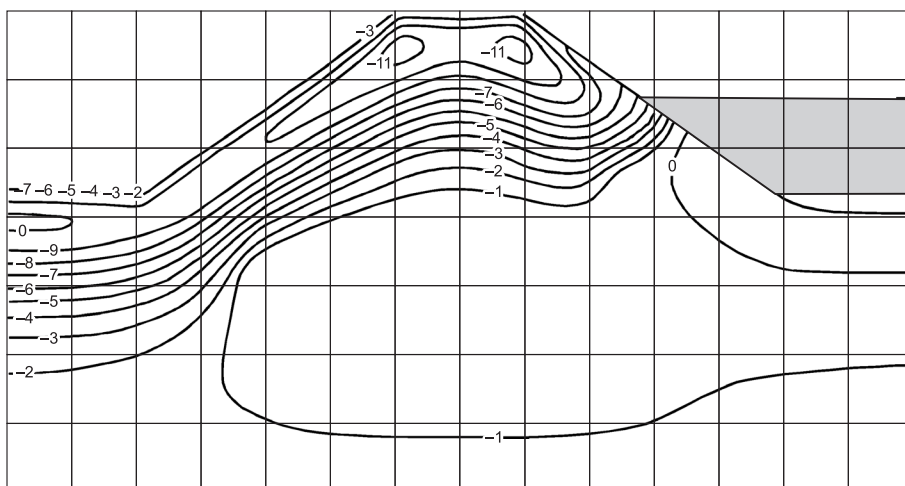


Рис. 3.21. Плотина 6,5 м. С правой стороны плотина затоплена в течение 8 мес.

Изолинии температур даны на 1 мая.

Как показывают расчеты, грунтовые плотины, возведенные в летний период (июнь–июль) и эксплуатируемые с начала зимнего периода (затопление полигона через два-три месяца после возведения грунтовой плотины) остаются в талом состоянии все время, пока затоплен один из полигонов с правой или левой стороны плотины, а нулевая изотерма проходит на глубине 2,0–2,5 м от ее основания.

Если грунтовые плотины, возведенные в летний период, начинают эксплуатироваться через год, два или три (в зависимости от геометрических параметров грунтовой плотины), то в этом случае ядро и основание плотины промерзают полностью и их температура становится не выше  $-1^{\circ}\text{C}$  за все время их эксплуатации.

### **3.4.2. Выводы и рекомендации по тепловому режиму грунтовой плотины россыпного месторождения криолитозоны**

1. Рекомендуется способ возведения грунтовых плотин (дамб дражных котлованов) из вскрышных пород месторождения "Горное" путем зимней отсыпки мерзлого разрыхленного грунта слоями толщиной 0,3–0,6 м с проливом водой из расчета 250–350 л/м<sup>3</sup> и промораживанием каждого слоя до температуры не выше  $-5^{\circ}\text{C}$ . Для района г. Мирный таким образом можно за один зимний сезон возвести плотину высотой до 14 м.

Реальный расход воды и степень уплотнения слоя пород определяется опытным путем на месте строительства.

Плотина с льдопородным противофильтрационным ядром возводится по следующей технологии:

- снятие торфов и удаление продуктивных песков из основания плотины производится в сентябре–ноябре;

- далее в течение месяца (ноябрь–декабрь) основание плотины промораживается;

- в декабре–феврале методом послойного намораживания возводится льдопородное ядро и тело плотины. Толщина отсыпаемого слоя 0,3–0,6 м. Слой выравнивается и уплотняется. По центру плотины на ширину льдопородного ядра производится пролив слоя водой из расчета 250–350 л/м<sup>3</sup>. Слой промораживается до температуры  $-5^{\circ}\text{C}$ . Затем отсыпается следующий слой. Процедура повторяется до возведения плотины на проектную высоту;

- откосы и гребень плотины рекомендуется пригружать каменной наброской (щебнем). Это позволит увеличить угол откоса плотины до  $34^{\circ}$  и, соответственно, уменьшить основание плотины, что, в свою очередь, приведет к значительному уменьшению объемов работ нулевого цикла при подготовке основания плотины и к существенному уменьшению объемов грунтов, отсыпаемых в тело плотины. Кроме того, каменная наброска выполняет предохранительную роль от оплывания откосов плотины при их длительном стоянии под слоем воды. Помимо прочего зарождение морозобойных трещин в земляных плотинах возможно в интервале глубин 0,0–1,5 м от поверхности. Поэтому рекомендуемая отсыпка защитного слоя толщиной 1,5 м и более из крупнозернистого материала исключает возможность образования морозобойных трещин. Эта же мера автоматически защищает плотину от сезонного пучения, т. е. для плотин этого типа является универсальной.

2. Для ускорения строительства плотины методом послойного намораживания и уменьшения времени простоя тяжелой техники рекоменду-



ется строительство плотины разделить на несколько участков по типу технологических операций: отсыпка мерзлого грунта, выравнивание слоя необходимой толщины, уплотнение слоя, проливка слоя водой, промораживание слоя до необходимой температуры.

3. Наиболее благоприятные месяцы для возведения плотины методом послойного намораживания – декабрь, январь и февраль, так как в это время средняя температура воздуха ниже  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (см. табл. 3.1) и, соответственно, можно добиться наиболее высокой скорости проморозки каждого слоя. В ноябре среднемесячная температура составляет  $-23,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ , но, с теплофизической точки зрения, в этот месяц лучше подготовить и проморозить основание будущей плотины. Это позволит сформировать благоприятный температурный режим в основании плотины, что будет способствовать статической и фильтрационной устойчивости всего сооружения.

4. Под плотинами, возведенными в летнее время с противофильтрационным экраном из суглинков, на весь период эксплуатации остается зона "вялой" мерзлоты с температурой горных пород в основании плотины в пределах от  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Это может быть причиной фильтрации воды через трещиноватые породы в основании плотины.

5. Таким образом, анализ данных решения задач температурного режима грунтовых плотин высотой 6–12 м с периодически заполняемым водохранилищем показывает, что:

– в зависимости от времени возведения плотины, ее геометрических размеров, влажности и теплофизических свойств грунтов, используемых при строительстве, характер температурного поля и период промерзания плотины неодинаков;

– при возведении плотины в летнее время не рекомендуется строить плотины высотой более 6 м, так как в этом случае в теле и основании плотины не сформируется благоприятный температурный режим, который способствует статической и фильтрационной устойчивости сооружения;

– при возведении плотины в зимнее время уже в первый год в ее теле и основании формируется отрицательный температурный режим с температурой ядра плотины не выше  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

– для создания надежной противофильтрационной завесы в теле плотины из мерзлого грунта в первый же год эксплуатации, целесообразно ядро плотины формировать в зимнее время (декабрь, январь, февраль) методом послойного намораживания грунтов.

6. При проектировании и в процессе строительства плотин необходимо предусмотреть участки, которые будут разрушаться для перевода драги на новый полигон. Строительство этого участка должно быть выполнено по талому варианту в летний период с использованием уплотненных суглинков. Границы прорана не должны соприкасаться с плотиной, построенной методом послойного намораживания.

7. Водопроект воды через плотины рекомендуется организовать с использованием специальных сифонов, проложенных по гребню плоти-

ны (или с заглублением в тело плотины не более чем на 1 м), чтобы исключить отрицательное растепляющее влияние коллектора, проложенного в мерзлом теле плотины.

8. Для обеспечения надежной эксплуатации льдопородных плотин необходимо организовать периодический надзор за их температурным режимом.

9. К ослабленным зонам следует отнести места примыкания льдопородных плотин к берегам и другим гидротехническим сооружениям.

### **3.5. РАЗРАБОТКА ПОДРУСЛОВОЙ РОССЫПИ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРА (НА ПРИМЕРЕ РОССЫПИ Р. МОЛОДО)**

Как известно, разработка небольших месторождений полезных ископаемых в неблагоприятных, специфических условиях севера Якутии крайне затратна и экономически рентабельна только при добыче уникального по ценности сырья с высоким содержанием полезного компонента. Это в полной мере относится к отработке подрусловых алмазоносных россыпей криолитозоны, расположенных в каньонообразных долинах рек, где применение традиционных технологий невозможно или нерентабельно по ряду причин.

Известно, что разработка обводненных россыпных месторождений без отвода русла реки возможна из-под воды с использованием дражных технологий и скреперных установок [Лешков, 1985; Патент..., 2003]. Очевидно, что такой способ в данном случае невыгоден в первую очередь из-за небольших размеров месторождений и дороговизны установок. Второй способ менее затратен, но имеет ряд недостатков и применялся только в опытном порядке при отработке талой части оловосодержащей россыпи р. Тенкели, расположенной в Усть-Янском районе Республики Саха (Якутия).

Кроме этого, сложность применения данных технологий связана с тем, что ведение работ возможно только в летний период (продолжительность которого на Севере составляет не более 3–4 мес.) при достаточной оттайке мерзлых четвертичных отложений. В связи с этим годовые объемы добываемых песков невысоки. Кроме того, наличие в русле реки движущихся черпаков и скреперов, а вследствие этого высокая взмучиваемость воды препятствуют проходу рыбы на нерест, а рельеф узкой с глубоким врезом каньонообразной речной долины исключает возможность устройства рыбопроводящих проходов.

Учитывая вышеперечисленные факторы, для разработки таких россыпей (на примере россыпи Молодо Жиганского района Якутии) Институтом горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН разработан оригинальный способ, осуществляемый в зимний период с использованием серийно изготавливаемых высокопроизводительных механизмов, установок и транспортных средств, основными преимуществами которого являются: обеспечение высоких объемов годовой добычи горной массы за счет применения высокопроизводительных технологий, удлинение се-

зона ведения работ и занятости горнорабочих, обеспечение чистоты вод реки и долины, возможность беспрепятственного прохода рыбы на места нерестилищ [Патент..., 2009].

Высокие производственные показатели при реализации этого способа планируется получить при максимальном использовании климатических особенностей, криолитозоны и режима речного стока:

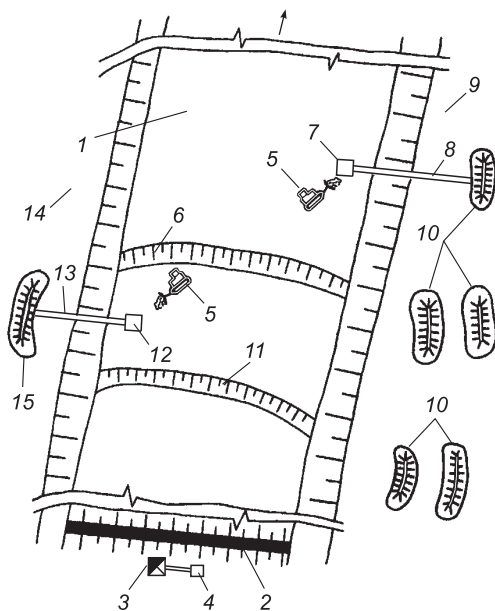
- низкие температуры наружного воздуха в период продолжительной зимы;
- наличие сплошной многолетней мерзлоты;
- высокая скорость промораживания грунтов (оттаявших в летнее время) в зимний период;
- небольшая мощность сезонной оттайки грунтов в летний период (1,5–2,0 м);
- резкое сокращение (а зачастую и полное прекращение) стока большинства малых рек в зимний период.

Разработку подрусловой россыпи (рис. 3.22) предполагается осуществлять в зимнее время при резком или полном прекращении речного стока, начиная с верховьев реки, с разбивкой ее на участки, обрабатываемые в течение одного сезона (года). Предварительно в верхней части обрабатываемого участка в зимний период методом послойного намораживания возводится ледовая плотина расчетной высоты, которая, проседая под собственным весом, перекрывает сток вод [Патент..., 2009].

Одновременно со строительством ледяной плотины выше по течению сооружается зумпф для сбора грунтовых вод, которые периодически откачиваются насосом, установленным в обогреваемом помещении и используются для возведения плотины. Затем (при необходимости) производится осушение участка россыпи путем откачки воды, распиловка и уборка льда, после чего

Рис. 3.22. Способ разработки подрусловой россыпи в условиях криолитозоны.

1 – подрусловая россыпь; 2 – ледовая дамба; 3 – зумпф для сбора воды; 4 – насос для откачки воды; 5 – бульдозеры; 6 – торфа (пустые породы); 7 – бункер для погрузки торфов; 8 – крутонаклонный конвейер для подъема торфов; 9 – борт каньонаобразной долины; 10 – отвалы торфов; 11 – пески, содержащие ценный компонент; 12 – бункер для погрузки песков; 13 – крутонаклонный конвейер для подъема песков; 14 – борт речной долины; 15 – временный отвал песков.



обнаженные подрусловые отложения промораживаются естественным холодом, разрыхляются и срезаются послойно по мере промерзания бульдозерами с применением технологий горного дела [Патент..., 2009].

Срезанные вскрышные породы (торфа) доставляются в приемный бункер и с помощью крутонаклонного конвейера (или скипа) поднимаются на борт долины, где выкладываются в отвалы.

После проведения вскрышных работ, срезаемые тем же способом пески, доставляются в другой приемный бункер и поднимаются конвейерами (или скипами) на другой борт долины, где выкладываются во временные отвалы с последующей транспортировкой их к сезонной стационарной промывочной установке, находящейся за пределами долины.

Для оптимизации процесса послойного промораживания аллювиальных отложений, обеспечивающего высокие скорости промерзания, рекомендуется в их толще по мере промерзания параллельно друг другу бульдозерами нарезать сеть траншей с вертикальными стенками, ширина которых определяется габаритами применяемой техники, глубина должна составлять не менее полуметра, а расстояние между ними равно удвоенной глубине. Тем самым обеспечивается значительное увеличение поверхности контакта подрусловых отложений с атмосферным воздухом и как следствие этого их интенсивное промерзание до требуемых температур за более короткий промежуток времени. Промороженные между траншейные целики срезаются, а затем вновь углубляются траншеи и т. д. до полной отработки участка россыпи на всю мощность.

Технология возведения ледяных сооружений базируется на нескольких основных методах производства работ по намораживанию больших объемов льда [Шаталина, 1990]:

- послойное намораживание;
- капельное разбрызгивание в холодный воздух с целью максимального увеличения поверхности теплообмена;
- так называемое объемное намораживание с использованием термосвай;
- использование готовых ледяных блоков;
- комбинация послойного, брызгового и блочного намораживания с выморозкой.

Комбинация этих методов между собой и использование встроенных в лед инженерных конструкций с дополнительными приемами по защите от воздействия окружающего сооружения ледяного поля и создает все многообразие конструкций ледяных сооружений.

Наиболее простой технологией производства работ при возведении ледовых сооружений является пригрузка ледяного покрова намороженным сверху льдом до полного погружения ледяного массива на дно или те же действия при нарушении связей площадки, на которой идет намораживание, с остальным льдом на акватории. При этом нет принципиальной разницы, каким льдом пригружена начальная ледяная пластина – намороженным послойно или путем разбрызгивания. Чаще всего строи-

тельство методом замораживания разбрызгиваемой воды в воздухе производится с целью ускорения процесса намораживания, однако одновременно это влияет и на качество получаемого льда, его плотность и пористость, которые оказываются, как правило, ниже, чем у льда, намороженного послойно.

Увеличение скорости строительства ледяных сооружений можно достичь за счет возведения сооружений из ледяных блоков, которые заготавливаются из окружающего ледяного покрова или формируются из рыхлого льда [Шаталина, 1990]. Ледяное сооружение такой конструкции возводится на естественном ледяном покрове, выполняющем функции основания. Ледяные блоки укладываются на него до получения нужного веса, обеспечивающего полное погружение ледяного сооружения на дно. Такой метод строительства несколько дороже послойного намораживания или разбрызгивания, однако ледяной остров, построенный из ледяных блоков, обходится в два раза дешевле такого же гравийного острова [Шаталина, 1990].

Использование в строительстве ледяных сооружений термосвай или СОУ (сезонных охлаждающих устройств) дает возможность применять их не только как метод ускорения производства работ за счет увеличения поверхности теплообмена при намораживании, но и как дополнительную арматуру, увеличивающую прочность конструкции и позволяющую создать упрочненный барьер вокруг сооружения для защиты от ударов и навалов движущегося льда. Кроме того, в конструкциях этого типа термосваи могут служить и анкерами, связывающими тело сооружений с дном. Использование термосвай позволяет поддерживать требуемый температурный режим сооружения.

Комбинация известных способов намораживания с выморозкой позволяет облегчить производство работ по возведению ледяных сооружений и решить ряд задач, не решаемых другими методами намораживания. В частности, использование выморозки позволяет вести работы по возведению ледяных сооружений "насухо", дает возможность предварительно проморозить основание, установить необходимую арматуру, в том числе и СОУ. Использование этого способа позволяет избежать трещин и деформаций, имеющих место при намораживании сооружений "на плаву" и посадке ледового блока на подготовленное основание. Промораживание основания ледовой плотины позволяет также значительно снизить (и даже прекратить) фильтрацию воды в таликовой зоне под дном водоема.

Следует заметить, что приведенные технологические схемы возведения сооружений не затрагивают и не отражают решения ряда вопросов инженерного проектирования ледовых конструкций [Шаталина, 1990]:

- качеств, свойств и конструкции основания;
- температурного режима;
- термонапряженного состояния;
- гидро- и термозащиты конструкции от воздействия окружающей среды.

Для строительства ледяных сооружений, также как и для любой другой конструкции, необходим комплекс инженерных изысканий, позволяющих предусмотреть воздействие волн, течений, движущегося льда, необходимы также инженерные расчеты устойчивости и прочности конструкции, разработка способов защиты от внешних воздействий, т. е. проектирование сооружений такого типа должно вестись по всем правилам проектирования гидротехнических сооружений с учетом степени их ответственности. В настоящее время ледяные гидротехнические сооружения еще не вошли в общероссийские стандарты и строительные нормы, однако использование имеющихся нормативов должно стать обязательным условием [Шаталина, 1990].

Необходимо отметить, что в современной практике при возведении ледяных сооружений полный комплекс вышеперечисленных требований выполняется редко. Как правило, решаются лишь характерные задачи для рассматриваемого типа и створа сооружений, что в какой-то степени объясняет весьма ограниченное строительство ледяных сооружений, несмотря на их экономическое преимущество перед грунтовыми.

Природные условия, благоприятные для возведения ледяных сооружений, в настоящее время определены достаточно основательно [Шаталина, 1990]. Результаты расчетов высоты слоя намораживания и стаивания льда, эквивалентного тепловому потоку к поверхности фазового перехода, приведены в работе [Шаталина, 1990]. Расчеты выполнены для климатических условий, в которых максимальная высота слоя намораживания, например, на мысе Челюскин, составила 44,4 м при слое стаивания в 2,4 м.

Достижение географически возможной толщины намораживаемой конструкции и практически осуществимой зависит от технологии намораживания и конструктивных особенностей сооружения. Известно, что послойное намораживание – наиболее длительный путь создания больших массивов льда. Однако качество льда и его прочностные характеристики оказываются при этом выше, чем при любых других способах намораживания.

Таким образом, как показывает обзор методов возведения ледовых сооружений, наилучшим в смысле “цена–качество” способом возведения ледовой плотины следует считать метод послойного намораживания.

При реальном послойном намораживании ледовой конструкции на подстилающей поверхности в продолжительность периода намораживания входит еще время налива воды, растекания ее по поверхности льда, охлаждения до температуры кристаллизации, собственно затвердевания и охлаждения слоя вновь намороженного льда, который становится, в свою очередь, подстилающим слоем для последующего намораживаемого слоя. Таким образом, задача послойного намораживания ледовой плотины может быть сформулирована следующим образом: сооружение ледовой плотины необходимой высоты за минимальный отрезок времени.

При послойном наливе воды все затраты времени на выполнение технологических операций, кроме времени собственно ее замерзания, являются непроизводительными потерями, сокращающими общую высоту слоя. В связи с этим следует стремиться к максимальному сокращению продолжительности каждой из составляющих технологической схемы.

Оптимальное время растекания воды по поверхности льда должно быть установлено в соответствии с производительностью оборудования для подачи воды и размерами площадки намораживания. В каждом отдельном случае оптимальное время определяется опытным путем. В то же время это представляет собой сложную расчетно-теоретическую задачу в силу того, что четко сформулированных положений гидравлики потока, движущегося по поверхности льда, сегодня не существует, а отдельные ее элементы, разработанные в рамках гидравлики подледного потока, не позволяют дать ответа на интересующие нас (в этой задаче) вопросы. Кроме того, ледовая гидравлика способна дать ответ о режиме потока с нулевой температурой, когда не происходит фазовых переходов, таяния на участке охлаждения потока до створа нулевой температуры или далее него, когда имеет место кристаллизация воды в потоке, растекающемся по поверхности льда [Шаталина, 1990].

Процессы растекания жидкости тонким слоем по поверхности льда, с физической точки зрения, сложны и в значительной степени связаны с охлаждением воды и образованием в ее слое внутриводного льда. Гидравлика процесса растекания отличается от аналогичного процесса при положительных температурах в подстилающем слое иной, чем лед, природы [Шаталина, 1990]. Вода, поступающая на лед с положительной температурой, перемещаясь по его поверхности, охлаждается и вызывает частичное таяние льда. После того как вода охладится до  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , в ней начинается образование внутриводного льда. По мере нарастания концентрации внутриводного льда меняется объемный расход потока, увеличивается глубина и меняются скорости. При определенной критической концентрации льда движение прекращается, и фиксируются границы растекания потока. В какой-то мере растекание воды в движущейся пленке аналогично ледотермическому режиму нижних бьефов, где, как известно, имеет место охлаждение воды до  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; створ, фиксирующий это состояние потока, называется створом нулевых температур, за которым в определенной последовательности следуют последующие створы: максимального переохлаждения, начала кристаллизации, наибольшей интенсивности образования внутриводного льда и, наконец, образования ледяного покрова. Различие этих процессов состоит в интенсификации теплообмена за счет теплоотвода его как в сторону атмосферы, так и в основание, по которому движется слой воды.

Интенсивный теплообмен холодного воздуха с водным слоем при его малой толщине слоя ведет к образованию внутриводного льда значительной концентрации, что, в свою очередь, приводит к изменению объемного расхода, толщины слоя и скорости растекания. По ходу охлаждения

из модели ледотермического режима нижнего бьефа сохраняется створ нулевых температур. Створа максимальной величины переохлаждения в процессе охлаждения движущейся пленки по поверхности льда не существует, поскольку переохладить воду, движущуюся по ледяной поверхности, невозможно. Образование внутриводного льда в объеме происходит в условиях неустановившегося гидравлического режима за счет влияния на него постоянно нарастающей концентрации внутриводного льда и переменного во времени отвода тепла в ледяное основание [Шаталина, 1990].

Таким образом, строительство гидротехнических сооружений в северной строительной-климатической зоне требует решения целого ряда вопросов прогнозирования теплофизического характера при их возведении в зимних условиях и в первую очередь – определение скорости замерзания и таяния льда. Наличие таких данных будет способствовать удешевлению работ, экономии энергетических ресурсов и материалов, ускорению процессов возведения с применением "ледяной" технологии, повышению надежности возводимых сооружений, защиты окружающей среды. "Ледяная" технология занимает сегодня вполне определенное место в технике, энергетике, строительстве в условиях многолетней мерзлоты, транспорте и т. д.

Как следует из вышесказанного, одним из основных факторов, определяющих возможность раннего начала ведения добычных работ на разрабатываемой в зимний период подрусовой россыпи, является обеспечение высокой скорости послойного намораживания ледовой плотины. Тем самым сокращаются сроки ее возведения. В этих целях, для определения рациональных режимов ведения работ, разработана специальная математическая модель послойного намораживания плотины, которая учитывает толщину замораживаемого водного слоя, фазовые переходы вода–лед, нестационарный теплообмен поверхности слоя с атмосферным воздухом, динамику температуры наружного воздуха в течение зимнего периода.

На основе математической модели п. 2.1 (2.1)–(2.27) были разработаны программы для ПЭВМ и проведены численные расчеты ряда параметров послойного намораживания ледяной плотины россыпного месторождения криолитозоны при следующих исходных данных:

– место расположения ледяной плотины – север Республики Саха (Якутия);

– удельная теплоемкость льда  $c_{\lambda} = 2260$  Дж/(кг·К);

– удельная теплоемкость воды  $c_{\text{в}} = 4212$  Дж/(кг·К);

– плотность льда  $\rho_{\lambda} = 917$  кг/м<sup>3</sup>;

– плотность воды  $\rho_{\text{в}} = 1000$  кг/м<sup>3</sup>;

– коэффициент теплопроводности льда  $\lambda_{\lambda} = 2,2$  Вт/(м·К);

– коэффициент теплопроводности воды  $\lambda_{\text{в}} = 0,551$  Вт/(м·К);

– естественная температура пород  $T_{\text{е}} = -5$  °С;



Таблица 3.13

**Сроки окончания сооружения ледяной плотины при разных значениях толщины намораживаемого слоя льда**

Высота плотины, м	Толщина намораживаемого слоя льда, м			
	0,1	0,2	0,3	0,4
2	6 ноября	11 ноября	19 ноября	25 ноября
3	15 ноября	21 ноября	3 декабря	10 декабря
4	21 ноября	30 ноября	13 декабря	19 декабря

- удельная теплоемкость мерзлого грунта  $c_m = 840 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;
- удельная теплоемкость талого грунта  $c_r = 940 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;
- плотность грунта  $\rho = 1800 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;
- коэффициент теплопроводности мерзлого грунта  $\lambda_m = 2,4 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;
- коэффициент теплопроводности талого грунта  $\lambda_r = 1,5 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;
- шаг по времени  $\Delta = 2 \text{ ч}$ ;
- месяц, соответствующий началу счета, - октябрь;
- месяц, соответствующий концу счета, - декабрь.

В табл. 3.13 приведены результаты расчета сроков окончания сооружения ледяной плотины при разных значениях толщины заливаемого слоя, при условии, что сооружение плотины начинается с 1 октября. Как видно из таблицы, по мере возрастания толщины заливаемого слоя, увеличиваются сроки возведения плотины. Так при толщине заливаемого слоя  $d = 0,1 \text{ м}$  плотина достигнет высоты  $H = 2 \text{ м}$  к 6 ноября; при  $d = 0,2 \text{ м}$  - к 11; при  $d = 0,3 \text{ м}$  - к 19; при  $d = 0,4 \text{ м}$  - к 25 ноября, т. е. возведение плотины в кратчайшие сроки обеспечивается при минимальной толщине намораживаемого слоя.

Видно, что уменьшение толщины намораживаемого слоя с 0,4 до 0,1 м приводит к сокращению сроков строительства ледовой плотины высотой 2 м на две недели и, соответственно, на этот период могут быть сдвинуты сроки начала ведения горных работ на россыпи, что немаловажно.

На рис. 3.23 приведены результаты расчетов динамики роста высоты ледяной плотины в зависимости от толщины намораживаемого слоя при разных значениях толщины заливаемого слоя. Из

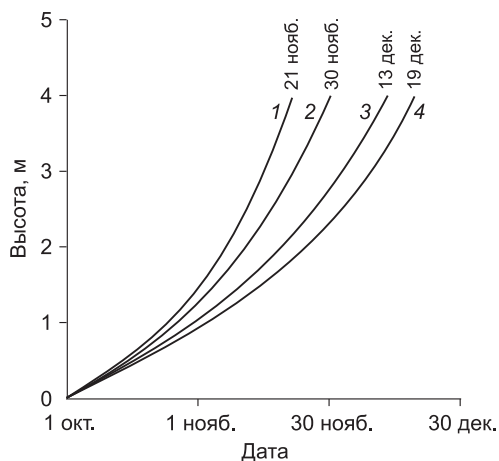


Рис. 3.23. Динамика высоты ледяной плотины в зависимости от толщины намораживаемого слоя.

1 - толщина слоя 0,1 м; 2 - 0,2 м; 3 - 0,3 м; 4 - 0,4 м.

графика видно, что при толщине слоя  $d = 0,1$  м плотина достигнет высоты 4 м к 21 ноября; при  $d = 0,2$  м – к 30 ноября; при  $d = 0,3$  м – к 13 декабря; при  $d = 0,4$  м – к 19 декабря.

Расчеты показали, что в районах с суровым климатом, таким как территория Якутии, в принципе возможно и целесообразно возводить ледяные сооружения (плотины) путем послойного намораживания. За зимний сезон можно возвести ледяную плотину высотой 4 и более метров.

Поскольку сроки возведения послойно намораживаемой плотины сокращаются по мере того, как уменьшается высота заливаемого слоя, нужно заливать его наименьшей толщины, насколько это технически возможно. Оптимальным по условиям заливки и промораживания можно считать толщину слоя в пределах 0,2 м.

С наступлением весны и окончанием добычных работ на россыпи, ледовая плотина разрушается любым способом, а лед растаивает и уносится вешними водами. В летний период ведутся работы по обогащению добытых песков, а с началом зимнего периода приступают к обработке тем же способом следующего участка.

Основные преимущества предлагаемого способа:

- длительность сезона ведения работ ( $\approx 7$  мес.);
- относительная дешевизна и простота монтажа вновь приобретаемого оборудования;
- отсутствие загрязнения и взмучивания воды;
- возможность прохода рыбы на нерест;
- использование естественного природного материала (льда) и ресурса криолитозоны – атмосферного холода для сооружения плотины и промораживания подрусловых отложений;
- отсутствие необходимости ведения рекреационных работ в долине реки;
- круглогодичная занятость рабочих приисков;
- легкость возведения и последующего разрушения (в весенний период) ледовой плотины;
- простота технологических операций и высокая механизация всех видов работ.

---

---

## 4 ПРИМЕР РЕАЛИЗАЦИИ ПРЕДЛАГАЕМЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В УСЛОВИЯХ МЕСТОРОЖДЕНИЯ “ГОРНОЕ”

### 4.1. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ

Месторождение “Горное” представляет собой типичную надпойменную террасовую россыпь разных уровней. Рыхлые отложения месторождения сложены почвенно-растительным слоем и илами темно-серого цвета общей мощностью от 1 до 6 м. Аллювиальные галечники и элювиально-делювиальный слой расположены ниже. Плотик представлен коренными породами преимущественно сланцевого состава по прочности средне- и трудноразборными.

На месторождении числится 13 блоков с балансовыми запасами и 12 блоков – с забалансовыми запасами, расположенных на площади протяженностью по простиранию около 6 км и более 2 км вкрест простирания. На некоторых из них выложены отвалы прошлой отработки, имеются блоки с небольшими запасами, а также блоки со значительными перепадами отметок плотика. Мощность продуктивных балансовых отложений в среднем по месторождению составляет 3,9 м, изменяясь от 3 до 9 м, забалансовых – 6,5 м, изменяясь от 2 до 9,5 м.

Основные объемы горной массы перерабатываются дражным способом [Технический проект..., 2000], а разрозненные блоки и блоки с большими перепадами плотика – раздельным способом с использованием бульдозеров, погрузчиков и автотранспорта и обогащением песков на стационарной обогатительной фабрике или промприборах.

Примечательной особенностью россыпи является ее значительная протяженность и ширина с расположением значительной части запасов на разных гипсометрических уровнях, что требует четкой организации горно-подготовительных, вскрышных, добычных и рекультивационных работ.

Для обеспечения доступа драги к промышленным запасам на месторождении “Горное” было предусмотрено [Технический проект..., 2000] возведение 15 плотин-котлованов с общей протяженностью водонакопительных дамб 32 276,5 м. Дамбы сооружаются из пород вскрыши, укладываемых по подошве на плотик промышленных запасов. Технологией производства предусмотрено опережающее по времени вскрытие промышленных блоков от торфов и выемка песков по всей протяженности контурных осей котлованов.

Оси водонакопительных дамб выставлены с учетом следующих факторов:

- обеспечения полного погашения запасов дражным способом;
- минимизации объемов дамб и выемки песков из-под дамб;
- высокой оперативности водонакопления котлованов (за 30–40 сут.) для предохранения песков от промерзания;
- уменьшения потерь песков за счет своевременной выемки их из-под строящихся дамб;
- уменьшения вероятности прорыва фильтрационных вод в пойму р. Ирелях за счет устройства зуба.

Исходя из того, что дамбы будут использоваться для передвижения автосамосвалов БелАЗ-7540, ширина гребня дамб принята 10 м. Гребень дамб обустраивается с учетом требований к обустройству автодорог. Учитывая интенсивность передвижения автотранспорта по дамбе, ее поверхность укрепляется слоем щебня толщиной 1 м.

## **4.2. СООРУЖЕНИЕ ПЛОТИН (ДАМБ) ДРАЖНЫХ КОТЛОВАНОВ**

### **4.2.1. Расчет параметров дамб**

Предусмотрено сооружение двух типов дамб:

1) продольные дамбы вдоль русла р. Ирелях отсыпаются тальми вскрышными породами с послойной укаткой, которая обеспечивает создание противофильтрационного ядра;

2) водонакопительные дамбы в остальных котлованах сооружаются в зимний период (ноябрь–март) из мерзлых вскрышных пород (суглинков) с послойной (0,5–0,6 м) укаткой гусеницами бульдозеров.

По условиям фильтрационной прочности дамбы устраиваются с врезкой зуба в коренные породы и оформлением ядра путем послойной укладки, укатки, дополнительного увлажнения до 25–30 % влажности и последующей проморозки каждого слоя в течение периода, определенного расчетом в разделе п. 3.2. Расчетным путем установлены параметры мерзлого ядра, равные 3 м по верху и 10 м по низу. Высота противофильтрационного ядра на 2 м меньше высоты дамбы. Верхний слой по мерзлому телу дамбы толщиной 1 м отсыпается из того же суглинка, но без дополнительного увлажнения. Поверхность гребня дамбы и боковые откосы укрепляются крупнофракционным материалом (щебнем) из плотиковых пород месторождения. Отсыпка гребня дамбы производится слоем толщиной 1 м, а боковых откосов – переменным сечением от 1 м от гребня до 2,5 м у подножия дамбы.

При строительстве водоудерживающих мерзлых плотин III–IV классов из грунтовых материалов (СНиП 2.06.05-84) необходимо выполнить расчет фильтрационной прочности и устойчивости откосов.

Расчет **фильтрационной прочности** производим, исходя из наибольшего напора, действующего на плотину.

Таблица 4.1

**Критический средний градиент напора**

Грунт	Значения критических средних градиентов напора $J_{cr,m}$ для		
	понура	экрана и ядра	тела и призмы плотины
Глина, глинобетон	15	12	8–2
Суглинок	10	8	4–1,5
Супесь	3	2	2–1
Песок	–	–	1

Необходимо выполнение следующего условия:

$$J_{est,m} \leq J_{cr,m} / \gamma_n$$

где  $J_{est,m}$  – действующий средний градиент напора в расчетной области фильтрации;  $J_{cr,m}$  – критический средний градиент напора, принимаемый на основании исследований грунтов (табл. 4.1);  $\gamma_n$  – коэффициент надежности по ответственности сооружений, определяемый по СНиП 2.06.01.86.

Для плотин III–IV классов  $\gamma_n = 1,1$ –1,15.

При варианте для тела и призмы плотины, выполненных из суглинков, критический средний градиент находится в пределах 8–2, тогда фильтрационная прочность будет выглядеть следующим образом:

$$J_{est,m} \leq J_{cr,m} / \gamma_n$$

при действующем градиенте, равном 10

$$10 > 8 / 1,1,$$

т. е. фильтрационная прочность не обеспечивается. Поэтому принимаем вариант с устройством ядра, тогда критический градиент будет выше и составит 12.

При таком положении расчетный градиент составит:

$$J_{est,m} \leq J_{cr,m} / \gamma_n; 10 \leq 10,9,$$

т. е. фильтрационная прочность будет обеспечена.

Согласно проведенным расчетам, при строительстве плотин необходимо устройство противофильтрационного ядра. Для плотин, сооружаемых из талых материалов, противофильтрационное ядро устраивается из суглинков с послойной (0,5–0,6 м) укладкой и уплотнением. Для плотин, сооружаемых из мерзлых материалов, противофильтрационное ядро оформляется из мерзлых суглинков с укаткой и дополнительным увлажнением.

Устройство зуба также необходимо и по показателям трещиноватости коренных пород.

Оценка устойчивости **талых водонакопительных дамб** производится по методике [Гольдин, Рассказов, 1987]. Откосы дамб приняты по условиям устойчивости на скольжение и опрокидывание, дополнительно укрепляются пригрузкой из щебня.

**Расчет ширины основания для дамбы со средней высотой 9 м**

1. Ширина гребня дамбы  $B = 10$  м.
2. Заложение откосов дамбы: мокрого 1:3, сухого 1:3.
3. Превышение гребня дамбы над горизонтом подтопа – 1,0 м.
4. Средняя высота дамбы  $H = 9$  м.

Ширина основания по принятым углам откосов:

$$B_0 = B + H(\operatorname{ctg} q + \operatorname{ctg} f) = 10 + 9(3 + 3) = 64 \text{ м,}$$

где  $q, f$  – углы откосов дамбы.

Ширина основания дамбы, исходя из расчета на скольжение и опрокидывание, определяется по формуле

$$B_p = \frac{\rho \times K}{v \times k} \times h_n = \frac{1000 \times 10 \times 8}{1900 \times 1} = 42 \text{ м,}$$

где  $\rho$  – удельный вес воды,  $\text{кг/м}^3$ ;  $h_n$  – напор воды перед дамбой, м (8 м);  $K$  – коэффициент безопасности на скольжение (10);  $v$  – объемный вес материала дамбы,  $\text{кг/м}^3$  (1900);  $k$  – коэффициент трения по основанию (1).

Как видно из расчета,  $B_p < B_0$ , что позволяет судить об устойчивости дамбы. На основании расчета устойчивости принимается ширина основания 42 м. Сечение дамбы в этом случае составит 234 м<sup>2</sup>.

**Расчет ширины основания для дамбы со средней высотой 12 м**

1. Ширина гребня дамбы  $B = 10$  м.
2. Заложение откосов дамбы: мокрого 3, сухого 3.
3. Превышение гребня дамбы над горизонтом подтопа 1,0 м.
4. Средняя высота дамбы  $H = 12$  м.

Ширина основания по принятым углам откосов:

$$B_0 = B + H(\operatorname{ctg} q + \operatorname{ctg} f) = 10 + 12(3 + 3) = 82 \text{ м,}$$

где  $q, f$  – углы откосов дамбы.

Ширина основания дамбы, исходя из расчета на скольжение и опрокидывание, также определяется по формуле

$$B_p = \frac{\rho \times K}{v \times k} \times h_n = \frac{1000 \times 10 \times 11}{1900 \times 1} = 57,8 \text{ м,}$$

где  $\rho$  – удельный вес воды,  $\text{кг/м}^3$ ;  $h_n$  – напор воды перед дамбой, м (11);  $K$  – коэффициент безопасности на скольжение (10);  $v$  – объемный вес материала дамбы,  $\text{кг/м}^3$  (1900);  $k$  – коэффициент трения по основанию (1).

Как видно из расчета,  $B_p < B_0$ , что позволяет судить об устойчивости дамбы. На основании расчета устойчивости принимается ширина основания 57,8 м. Сечение дамбы составит 407 м<sup>2</sup>.

Расчетную оценку общей устойчивости **земляных плотин с мерзлым ядром** рекомендуется выполнять по приближенной схеме плоского сдвига, описанной в работе [Кузьмин, 1982].

При создании плотин мерзлого типа производится послойное промораживание противofильтрационного ядра с дополнительным уплотнением и увлажнением. Такая технология позволяет создать мерзлое ядро необходимой прочности. В процессе эксплуатации таких дамб необходимо контролировать состояние основания и не допускать его оттайки.

Для обеспечения устойчивости сооружения при заполнении котлована до полного промерзания низовой упорной призмы необходимо создать замороженное ядро минимальной ширины  $b$ .

Как неблагоприятный вариант расчета принимается, что к моменту промораживания ядра низовая призма сохраняет положительную температуру, а в ее основании льдистые породы оттаивают на определенную величину, причем оттаявшие породы обладают нулевым сопротивлением сдвигу. В условиях данного месторождения такой случай может возникнуть только при несоблюдении рекомендаций по срокам сооружения дамбы (слишком раннее начало работ). При этом породы в основании могут не успеть промерзнуть.

При отсыпке верхового клина из талых уплотненных пород боковое давление на вертикальную поверхность мерзлого ядра не возникает, а если в верховом откосе отсыпаны мерзлые породы, то они при оттаивании и переувлажнении создают боковое давление с нулевыми значениями параметров сопротивления сдвигу. Мерзлое ядро сопротивляется смещению за счет собственного веса и сопротивления замороженных пород сдвигу  $R_{сА}^H$ , принимаемого для средней расчетной температуры мерзлой стенки на глубине  $h_s$  (глубина основания мерзлого ядра).

Расчет проводится также для моделирования ситуации, когда произошла частичная оттайка пород со стороны заполненного котлована, что является вероятной ситуацией в процессе разработки полигонов.

Минимальная ширина мерзлой завесы при отсутствии бокового давления пород верховой призмы

$$b \geq \frac{\gamma_B h_B^2}{2(\gamma h_s + R_{сА}^H)},$$

при одновременном воздействии гидростатического давления и бокового давления оттаявших пород в верховом откосе

$$b \geq \frac{h_B^2 (\gamma_{взв} + \gamma_B)}{2(\gamma h_s + R_{сА}^H)},$$

где  $\gamma$ ,  $\gamma_B$  и  $\gamma_{взв}$  – плотность соответственно мерзлых пород в ядре плотины ( $2,06 \text{ г/см}^3$ ), воды ( $1,0 \text{ г/см}^3$ ) и взвешенной породы верхового клина ( $1,84 \text{ г/см}^3$ );  $h_B$  – глубина воды у верхового откоса.

Значения свойств пород приняты по данным отдела инженерных изысканий Якутнипроалмаз [Мирнинский ГОК..., 2005].

Так как по принятой технологии дамбы котлованов сооружаются в зимнее время из мерзлых пород, а в процессе эксплуатации возможно оттаивание поверхностного слоя на небольшую глубину, определяемую моделированием, для расчета ширины мерзлой завесы используем формулу, учитывающую оттаивание пород в верховом откосе.

Согласно данным [Мирнинский ГОК..., 2005], вскрышные грунты, которые в настоящее время используются при отсыпке дамб, представлены легким суглинком с примесью органических веществ. По гранулометрическому составу вскрышной суглинок пригоден для возведения противofильтрационных элементов плотин.

Сопротивление промороженных пород сдвигу определяется в соответствии с методикой, предложенной Н.А. Цытовичем [1973]. По данным табл. 17 из этой работы, сдвигающее напряжение  $\tau$  при нормальной нагрузке  $p = 4 \text{ кг/см}^2$  и объемном весе  $\gamma = 1,84 \text{ кг/см}^3$ , при температуре мерзлого грунта  $-1 \text{ }^\circ\text{C}$  и влажности 26,5 % равно  $6,2 \text{ кг/см}^2$ . Нормальная нагрузка обеспечивается как собственным весом мерзлого ядра, так и весом верхнего слоя отсыпки мощностью 2 м. Остальные параметры соответствуют свойствам грунта. Таким образом, данное значение сопротивления сдвигу можно принять за основу для дальнейших расчетов.

При длительном времени действия сдвигающей нагрузки необходимо учитывать снижение сил сцепления мерзлого грунта. По данным С.С. Вялова, предельное значение длительного сцепления для грунтов сопоставимого с используемым в данном расчете состава и температуре  $-1,2 \text{ }^\circ\text{C}$  составляет 25 % от первоначального [Цытович, 1973, табл. 19]). Значение длительной прочности мерзлого грунта сдвигу для данных условий равно  $6,2 \times 0,25 = 1,55 \text{ кг/см}^2$ .

Расчет минимальной ширины мерзлой завесы выполнен для максимальной высоты плотины  $h = 13,5 \text{ м}$  и глубине воды у верхового откоса 12,5 м:

$$b \geq \frac{12,5^2 \times (1,84 + 1,0)}{2 \times (2,06 \times 12 + 1,55)} = 8,5 \text{ м.}$$

Ширина основания мерзлой завесы принимается равной 10 м. Минимальная ширина по верху определяется, исходя из технологических возможностей оборудования (бульдозер Т-170) и равна 3 м. Таким образом, для всех дамб котлованов, сооружаемых по схеме с промораживанием мерзлого ядра, принимаются параметры ядра проморозки: ширина по верху – 3 м, ширина по низу – 10 м. Исходя из этого, рассчитываются объемы укладки, количество воды для проморозки и время сооружения ядра.

Оценка **величины пригрузки для укрепления песчано-глинистых постоянных откосов** выполняется по методике, изложенной в работе [Фисенко, 1965].

При постоянном или циклическом заполнении котлованов водой и дальнейшей эксплуатации дамб в условиях воздействия годового хода температур возможно оттаивание поверхностного слоя на определенную глубину с возникновением фильтрующего слоя.



Для предотвращения возможного оплывания пород постоянные песчаные и песчано-глинистые откосы необходимо пригружать гравийной призмой треугольного сечения, параметры которого зависят от коэффициента фильтрации водоносного слоя  $K_{\phi}$ , удельного расхода  $q$  и от заложения откоса в пределах промежутка высачивания  $m$ .

Применение каменной наброски поверх тела плотины позволит увеличить угол откоса плотины и, соответственно, уменьшить основание плотины, что, в свою очередь, приведет к значительному уменьшению объемов работ нулевого цикла при подготовке основания плотины и к существенному уменьшению объемов грунтов, отсыпаемых в тело плотины.

Кроме того, что каменная наброска выполняет предохранительную роль от оплывания откосов плотины при их длительном стоянии под слоем воды, она исключает возможность образования морозобойных трещин, зарождение морозобойных трещин в земляных плотинах возможно в интервале глубин 0,0–1,5 м от поверхности. Эта же мера автоматически защищает плотину от сезонного пучения.

Высота пригрузки должна быть несколько больше высоты промежутка высачивания  $h_b$ , определяемого по формуле

$$h_b = (m + 0,5) \frac{q}{K_{\phi}} = (1,5 + 0,5) \frac{7}{6} = 2,5 \text{ м.}$$

Ширина основания гравийной призмы определяется по формуле

$$a = \frac{h_b}{A} \times \left( \frac{\bar{a}}{2\gamma_{\text{пр}}A} + \frac{K_{\phi}}{K_{\text{пр}}} \right), \text{ где } A = \sin \alpha \times \left( 1 - \frac{K_{\phi}}{K_{\text{пр}}} \cos \alpha \right),$$

где  $K_{\phi}$  и  $K_{\text{пр}}$  – коэффициенты фильтрации грунта и материала пригрузки;  $\alpha$  – угол откоса без пригрузки;  $\gamma_{\text{пр}}$  – объемный вес материала пригрузки;  $\rho$  – угол трения грунта.

Вспомогательная величина  $\bar{a}$  определяется по графику из работы Г.Л. Фисенко [1965].

Значения  $K_{\phi}$  и  $K_{\text{пр}}$  приняты по табличным данным соответственно 6 и 50 м/сут.,  $\alpha = 18^\circ$ .  $\gamma_{\text{пр}} = 2,5 \text{ т/м}^3$  (щебень из местных материалов);  $\rho$  – угол внутреннего трения,  $22^\circ$  (данные института "Якутнипроалмаз" [Мирнинский ГОК..., 2005]).

Пример расчета выполним для максимального уровня воды 12,5 м.

$$A = \sin 18^\circ \times \left( 1 - \frac{6}{50} \cos 18^\circ \right) = 0,24.$$

По графику определяем  $\bar{a} = 0,18$ .

$$a = \frac{2,5}{0,25} \times \left( \frac{0,18}{2 \times 2,5 \times 0,25} + \frac{6}{50} \right) = 3,8 \text{ м.}$$

Таблица 4.2

## Сравнение общих параметров дамб

№	Высота	Угол откоса, град.	Основание, м	Сечение, м <sup>2</sup>		Объем, тыс. м <sup>3</sup>		Площадь под дамбой		Пески под дамбой	
				старое	новое	старое	новое	старое	новое	старое	новое
3	8,9	19	60,4	313,6	207,4	1091,6	721,9	210,2	127,4	756,8	458,6
4	11,8	20	74,2	497,1	325,7	983,2	644,2	146,8	89,4	518,1	315,6
5	10,9	24	55,8	345,4	291,6	890,9	752,2	144,2	109,9	366,2	279,1
6	10,5	23	59,3	364,5	269,9	666,4	493,4	108,4	75,7	222,2	155,1
7	12,5	28	56,2	413,9	358,8	1001,6	868,3	136,0	114,7	360,4	304,0
8	13,5	24	69,4	535,7	406,4	618,7	469,4	80,2	58,0	258,1	186,7
12	10,7	21	65,4	402,8	278,2	295,0	203,8	47,9	30,8	169,1	144,9
13	9,3	23	52,3	288,1	222,3	662,6	511,3	120,3	86,9	446,3	333,0
10	8	19	54,5	258,1	175,2	846,0	574,2	178,6	110,8	684,1	353,4
11	11	34	41,9	285,5	290,4	709,5	721,6	104,1	106,4	332,1	375,4
9	7,1	24	40,5	178,5	146,3	268,6	220,2	61,0	47,0	287,0	197,2
14	4,4	24	29,6	88,2	73,0	218,4	180,7	74,0	57,4	177,3	139,0
Всего						8252,5	6136,3	1411,7	994,2	4577,7	3169,3

Примечание. Внутренние дамбы – с проморозкой ядра, внешние – без проморозки. Все дамбы – с боковой пригрузкой щебнем (2 м). Угол откоса 34°.

Таким образом, расчетная величина пригрузки (ширина основания гравийной призмы) равна 3,4 м. Для дамб высотой до 12 м эта величина составила 2,7 м; для дамб высотой до 10 м – 1,8 м; для дамб высотой до 8 м – 1,5 м.

Возведение плотины в зимний период методом послойного намораживания с формированием в основании и теле плотины мерзлого противофильтрационного ядра позволит создать благоприятный температурный режим, что будет способствовать статической и фильтрационной устойчивости всего сооружения. Для месторождений криолитозоны, как показали расчеты, методом послойного намораживания за один сезон можно возвести плотину высотой до 14 м. Наиболее благоприятными месяцами для возведения плотины таким методом в условиях Северо-Востока России являются декабрь–февраль.

С учетом нового подхода к сооружению дамб котлованов в основном предусматриваемых к отсыпке в зимнее время из мерзлых торфов с формированием льдопородного ядра (кроме русловых дамб котлованов № 3, 4, которые выполняются из талых осушенных торфов) по отношению к проекту [Технический проект..., 2000] расчетные параметры и объемы дамб изменились в меньшую сторону. Объемы дамб по проектным технологиям уменьшены на 2116 т/м<sup>3</sup>, или на 26 %, в том числе талые – на 709 т/м<sup>3</sup>, мерзлые – на 1407 т/м<sup>3</sup>. Объемы вывоза песков из-под дамб уменьшены на 1408 т/м<sup>3</sup>, или на 31 %. Таким образом, общая экономия в объемах составляет 3524 т/м<sup>3</sup> (табл. 4.2).

#### 4.2.2. Технология и порядок сооружения плотин

До начала работ должна быть произведена выемка вскрышных пород и песков в границах, определяемых размерами основания дамб. Первоочередным этапом являются вскрышные работы. Далее производится выемка песков. Вскрышные породы месторождения, используемые для отсыпки дамб, подлежат внутренней транспортировке на расстояние, определяемое размерами блока. Остальная часть пород вскрыши вывозится во внешние отвалы.

##### *Технология сооружения плотины*

1. Плотина с льдопородным противофильтрационным ядром:
  - снятие торфов и удаление продуктивных песков из основания плотины – сентябрь–ноябрь;
  - промораживание основания – ноябрь–декабрь;
  - возведение методом послойного намораживания льдопородного ядра и тела плотины – декабрь–февраль. Толщина отсыпаемого слоя 0,3–0,6 м. Слой выравнивается и уплотняется. По центру плотины на ширину льдопородного ядра производится пролив водой из расчета 250–350 л/м<sup>3</sup>. Слой промораживается до температуры –5 °С, затем отсыпается следующий. Процедура повторяется до возведения плотины на необходимую высоту.

2. Откосы и гребень плотины пригружаются щебеночной наброской (март–апрель). Наброска предохраняет откосы от оплывания при их длительном стоянии под слоем воды.

3. Для ускорения сооружения плотины методом послойного намораживания рекомендуется весь процесс разделить на несколько участков по типу технологических операций: отсыпка мерзлого грунта, выравнивание слоя необходимой толщины, уплотнение слоя, проливка слоя водой, промораживание слоя до необходимой температуры.

4. В процессе возведения плотин необходимо предусмотреть участки, которые будут разрушаться для перевода драги в следующий котлован. Эти участки должны быть выполнены по талому варианту в летний период с использованием уплотненных суглинков. Границы прорана не должны соприкасаться с плотиной, сооруженной методом послойного намораживания.

Количество песков из-под дамб котлованов, предназначенное для размещения на территории полигона, определяется мощностью слоя песков и возможностью их оттайки в течение одного или максимум двух сезонов водно-тепловой подготовки. По расчетам теплового режима (п. 2.3), величина оттайки песков за один сезон составляет при неблагоприятных условиях до 2,5 м, за два сезона – 4,5 м. Согласно этому определено, что внутреннее размещение песков возможно для всех котлованов, имеющих мощность песков до 4,5 м.

Толщина дополнительно отсыпаемого слоя песков в варианте перевозки их автотранспортом составляет до 2 м, при этом суммарная мощность слоя песков после отсыпки не должна превышать 4,5 м, что позволит эффективно подготовить пески для драгирования в течение не более двух годовых циклов водно-тепловой оттайки. В тех случаях, когда начальная мощность песков не позволяет производить дополнительную отсыпку на высоту 2 м, необходимо расчетами определить возможную дополнительную мощность подсыпки до общей мощности 4,5 м, площадь, объемы планировки и способ выполнения работ.

### 4.3. ВСКРЫШНЫЕ РАБОТЫ

При дражном способе разработки вскрышные работы ведутся с опережением от 3–6 мес. до нескольких лет. В первую очередь снимается почвенно-растительный слой со складированием в спецотвалы для последующего возврата при рекультивации площади горного полигона.

Для условий месторождения "Горное", с учетом сложной гипсометрии пласта песков, требований к оттайке и предохранению песков от последующего промораживания методом подтопления, опережение вскрышных работ над добычными должно быть не менее двух лет. Зачистка полигона от растительного покрова должна производиться с еще большим опережением.

Как показали расчеты (результаты моделирования, п. 2.3.) для рас-тепления песков мощностью до 4 м при двухлетнем цикле подготовки, торфа должны быть убраны до наступления теплого времени года, при этом период их удаления может быть с октября по март.

Схема вскрышных работ, согласно [Технический проект..., 2000], следующая:

Промышленная площадь месторождения разбивается на 15 котло-ванов с отработкой в последовательности снизу вверх по котлованам 1–2–3–4–5–6, затем сверху вниз по течению р. Ирелях по котлованам 7–8, 12–13 и затем, в случае обеспечения рентабельности отработки, по забалансо-вым запасам котлованов 10–11–9–14.

Породы вскрыши используются для устройства дамб, оставшиеся объемы складированы во внешние отвалы на борту россыпи. Вскрышные породы, необходимые для отсыпки мерзлых дамб, оставляются в контуре котлована и подлежат внутренней транспортировке на расстояние по расчетам не более 1 км, в зависимости от длины дамб. Расстояние транс-портировки во внешние отвалы определяется индивидуально для каждо-го котлована при формировании отвала за контуром запасов по ежегод-ным планам развития горных работ и составляет по расчетам 0,8–2,3 км.

#### ***Возможны следующие варианты выполнения вскрышных работ***

1. По первому варианту производится механическое рыхление по-род, выкучивание бульдозерами и транспортировка комплексом погруз-чик-автосамосвал.

2. По второму варианту рыхление частично производится с исполь-зованием буровзрывных работ, далее выкучивание и транспортировка. Вывоз мерзлых торфов на отсыпку дамб производится автосамосвалами также после рыхления, выкучивания и погрузки.

Вывозка талых торфов на возведение дамб производится путем вы-кучивания и последующей погрузки на автотранспорт. Все этапы работ предусматривают бульдозерную планировку отвалов вскрыши.

Вскрышу основных объемов торфов по месторождению намечено выполнять с помощью бульдозеров Д-355, ДЭТ-250, автопогрузчика РС-570, САТ-988 или экскаватора ЭКГ-5, а также автосамосвалов БелАЗ-7540.

С учетом результатов моделирования температурного режима дамб котлованов и оптимальных сроков их сооружения составлены примеры календарных графиков (табл. 4.3–4.5) горно-подготовительных и вскрыш-ных работ для трех котлованов (№ 3–5) (с учетом минимального промер-зания вскрытого массива песков; возведения дамб с мерзлым ядром в зимнее время; выемки песков из-под дамб в зимнее время). Объемы ра-бот по котлованам № 3–5 даны в табл. 4.6–4.8.

Снятие почвенно-растительного слоя производится бульдозерами Т-170.

Таблица 4.3

График работ по котловану № 3

Работы по сезонам	1-й год	2-й год	3-й год	4-й год
Снятие растительного слоя	июнь			
Вскрыша	ноябрь–декабрь	январь–март		
Пески из-под дамб	ноябрь–декабрь	январь–март		
Сооружение талых дамб		июнь–сентябрь		
мерзлых дамб		ноябрь–декабрь	январь–март	
Оттайка песков			май–сентябрь	
Затопление котлована (предохранение песков)			сентябрь	
Слив воды				май
Заливка на драгирование				сентябрь

Таблица 4.4

График работ по котловану № 4

Работы по сезонам	1-й год	2-й год	3-й год	4-й год
Снятие растительного слоя	июнь			
Вскрыша	ноябрь–декабрь	январь–март		
Пески из-под дамб	ноябрь–декабрь	январь–март		
Сооружение талых дамб		июнь–сентябрь		
мерзлых дамб		ноябрь–декабрь	январь–март	
Оттайка песков			май–сентябрь	
Затопление котлована (предохранение песков)			сентябрь	
Слив воды				май
Заливка на драгирование				сентябрь
Добыча				сентябрь

Таблица 4.5

График работ по котловану № 5

Работы по сезонам	1-й год	2-й год	3-й год	4-й год
Снятие растительного слоя	июнь			
Вскрыша	ноябрь–декабрь	январь–март		
Пески из-под дамб	ноябрь–декабрь	январь–март		
Сооружение мерзлых дамб		ноябрь–декабрь	январь–март	
Заливка на оттайку			сентябрь	
Слив воды				май
Заливка на драгирование				сентябрь
Добыча				сентябрь

Таблица 4.6

**Объемы работ по котловану № 3, тыс. м<sup>3</sup>**

Работы по сезонам	1-й год	2-й год	3-й год	4-й год
Снятие растительного слоя	58			
Вскрыша	411	616		
Пески из-под дамб	148	222,5		
Сооружение мерзлых дамб		178	266	
Сооружение талых дамб		310,1		
Заливка на оттайку			2320	
Слив воды				2320
Заливка на драгирование				2320
Добыча				сентябрь

Таблица 4.7

**Объемы работ по котловану № 4, тыс. м<sup>3</sup>**

Работы по сезонам	1-й год	2-й год	3-й год	4-й год
Снятие растительного слоя	100,6			
Вскрыша	213	319		
Пески из-под дамб	136	204		
Строительство мерзлых дамб		183	274	
Строительство талых дамб		228		
Заливка на оттайку			2785,4	
Слив воды				2785,4
Заливка на драгирование				2139
Добыча				сентябрь

Таблица 4.8

**Объемы работ по котловану № 5, тыс. м<sup>3</sup>**

Работы по сезонам	1-й год	2-й год	3-й год	4-й год
Снятие растительного слоя	122			
Вскрыша	343	515		
Пески из-под дамб	112	167		
Строительство мерзлых дамб		301	451	
Заливка на оттайку			1835,3	
Слив воды				1835,3
Заливка на драгирование				2370
Добыча				сентябрь

Согласно расчетам производительности оборудования определено количество оборудования для выполнения горно-подготовительных и вскрышных работ по этим котлованам в соответствии с приведенными объемами.

1. Котлован № 3: бульдозер Т-170 – 2 ед., бульдозер Д-355 – 5 ед., автосамосвал БелАЗ-7548 – 10 ед., 2 погрузчика САТ-988 и 1 экскаватор ЭКГ-5.

2. Котлован № 4: бульдозер Т-170 – 2 ед., бульдозер Д-355 – 4 ед., автосамосвал БелАЗ – 11 ед., 2 погрузчика САТ-988 и 1 экскаватор ЭКГ-5.

3. Котлован № 5: бульдозер Т-170 – 2 ед., бульдозер Д-355 – 5 ед., автосамосвал БелАЗ – 12 ед., 2 погрузчика САТ-988 и 1 экскаватор ЭКГ-5.

#### **4.4. РАСЧЕТ ПОТРЕБНОСТИ ГОРНОТРАНСПОРТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

##### ***Выемка и транспортировка вскрышных пород и песков***

Транспортировка вскрышных пород и песков производится автотранспортом с погрузкой из навала колесным погрузчиком типа САТ-988G с ковшом емкостью 6,1 м<sup>3</sup>, либо экскаватором ЭКГ-5 с ковшом емкостью 5 м<sup>3</sup>. Выкучивание вскрышных пород и песков производится бульдозерами Д-355. Предварительно проводится механическое либо буровзрывное рыхление мерзлых пород. Погрузка производится в автосамосвалы БелАЗ-7540, грузоподъемностью 30 т.

С учетом факторов, снижающих производительность, сменная производительность экскаватора составит 2270 м<sup>3</sup>, сезонная при 150 рабочих днях – 613 тыс. м<sup>3</sup>. Среднемесячная производительность составит 123 тыс. м<sup>3</sup>.

Сменная производительность погрузчика, соответственно 1804 м<sup>3</sup> за смену, сезонная – 487 тыс. м<sup>3</sup>, среднемесячная – 97 тыс. м<sup>3</sup>.

Производительность автосамосвала при расстоянии транспортирования 1 км – 1180 т за смену; при изменении расстояния транспортирования: 2 км – 800 т за смену, 3 км – 605 т за смену, 4 км – 490 т за смену, 5 км – 410 т за смену.

##### ***Выемка песков из-под дамб***

Расчет производительности бульдозеров проведен в соответствии с “Едиными нормами...” [1991].

Расчеты производительности при послонной разработке выполнены для средневзвешенного расстояния перемещения в соответствии с принятой технологией – 80 м и усредненной крепости пород по пескам: II категория – 50 %, III категория – 50 %.

При автотранспортном способе вывозки песков необходимым элементом технологии является рыхление (механическое или буровзрывное) и выкучивание мерзлых песков или естественная оттайка и выкучивание песков.

Согласно “Единым нормам...” [1991], производительность Д-355А на рыхлении составляет 120 тыс. м<sup>3</sup>/мес.; на выкучивании песков – 60 тыс. м<sup>3</sup>,



Таблица 4.9  
**Выемка песков из-под дамб из расчета сезона работы 150 дней**

Котлован	Пески всего	В том числе пески из-под дамб	Мощн. песков	Объем бульфа.	Кол-во оборуд., ед.		Объем автотр.	Кол-во а/сам.	Кол-во погруз.	Все пески на вывоз а/сам.	
		тыс. м <sup>3</sup>	м	тыс. м <sup>3</sup>	рыхл.	окуч.	тыс. м <sup>3</sup>	ед.	ед.	а/сам., ед.	погр., ед.
3	2386,3	370,5	3,4	306,3	0,6	1,3	64,2	0,4	0,2	2,5	0,8
4	1881,2	339,9	3,3	190,0	0,6	1,1	150,0	1,0	0,3	2,3	0,7
5	1919,5	279,1	2,3	279,1	0,5	0,9	0	-	-	1,8	0,6
6	1151,5	155,1	1,9	155,1	0,3	0,5	0	-	-	1	0,3
7	1777,8	304,0	2,5	304,0	0,5	1	0	-	-	2	0,6
8	1011,4	186,7	3,0	138,6	0,3	0,7	48,1	0,3	0,1	1,2	0,4
12	1569,9	144,9	4,5	0	0,3	0,5	144,9	0,9	0,3	1	0,3
13	2702,6	333	3,6	256	0,6	1,2	167	1,1	0,4	2,2	0,7
10	3846,3	354	3,1	354	0,6	1,2	0	-	-	2,3	0,75
11	2551,5	375,4	3,3	238,6	0,7	1,3	136,8	0,9	0,4	2,5	0,8
9	2033,4	197,2	3,5	120,4	0,3	0,7	76,8	0,5	0,2	1,3	0,4
14	1235,7	139,0	2,2	139,0	0,2	0,5	0	-	-	0,9	0,3
Всего	24067,1	3178,8	-	2481,1	-	-	787,8	-	-	-	-

Примечание. Варианты транспортировки: бульдозерно-автомобильный/автомобильный.

на удалении разрыхленных пород – 42 тыс. м<sup>3</sup>; на удалении взорванных пород – 52 тыс. м<sup>3</sup>/мес.

Расчет количества оборудования определяется по условию частичного выполнения объемов работ бульдозерной выемкой (на расстояние до 80 м от границы дамбы). Остальная часть песков удаляется автотранспортом с погрузкой погрузчиком. Просчитан также вариант с вывозкой всего объема песков автотранспортом. Соответствующие объемы и количество оборудования даны в табл. 4.9. Вывозка песков из котлована № 12 производится автотранспортом на фабрику или в другой котлован ввиду невозможности размещения их в текущем контуре. Расстояние перевозки усредненно принимается в 1 км. Количество погрузчиков определено исходя из среднемесячной производительности 97,5 тыс. м<sup>3</sup>, сезонной – 487 тыс. м<sup>3</sup>. Среднемесячная производительность автосамосвала 30,5 тыс. м<sup>3</sup>, сезонная (150 дней) – 152 тыс. м<sup>3</sup>.

#### ***Транспортировка вскрышных пород на дамбы***

Транспортировка вскрышных пород на дамбы производится автосамосвалами, после предварительного рыхления и выкучивания. Рыхление может производиться механическим (тракторные рыхлители) либо буровзрывным способом. Расчет объемов рыхления и количество оборудования приводится в п. 4.3. Расстояние перемещения пород усредненно – один километр. Количество автосамосвалов приводится в табл. 4.10.

#### ***Разработка и транспортировка вскрышных пород***

Расчет количества оборудования производится в двух вариантах. Первый вариант предусматривает механическое рыхление всего объема вскрыши, выкучивание бульдозерами и погрузку в автосамосвалы погрузчиком САТ-988 или экскаватором ЭКГ-5. В связи со значительной (4–5 м) мощностью вскрышных пород в контурах котлованов 7–14 представляется более приемлемым вариант с буровзрывным рыхлением этих объемов вскрыши, с последующей погрузкой непосредственно экскаватором ЭКГ-5 либо погрузчиком САТ-988.

Количество оборудования для разработки и перевозки вскрышных пород рассчитывается по календарному плану, исходя из годовых объемов горных работ. Количество автосамосвалов при использовании погрузчика САТ-988 с некоторым приближением может быть принято равным их количеству при погрузке экскаватором ЭКГ-5. Особенностью работы погрузчика является увеличенная длительность рабочего цикла по сравнению с рабочим циклом экскаватора, что приводит к некоторому снижению производительности.

Вскрышные породы, предназначенные для отсыпки дамб, перевозятся в пределах котлована, поэтому расстояние транспортировки составляет не более 1 км. Сменная производительность при этом составит 1142 т. При сезоне работы в 150 дней производительность автосамосвала составит 152 тыс. м<sup>3</sup>.

Таблица 4.10

## Транспортировка вскрышных пород для сооружения дамб

Котлован	Высота	Основание, м	Сечение, м <sup>2</sup>	Длина, м	Объем, тыс. м <sup>3</sup>	Вскрыша, тыс. м <sup>3</sup>	Кол-во а/сам.	Планировка Т-170, ед.
Талые породы. Возможный сезон работы 150 дней								
3	8,9	42	231,4	1340,0	310,1	286,5	2	1,2
4	11,8	57,2	396,5	575,0	228,0	213,7	1,5	0,9
Всего	–	–	–	–	538,1	500,2	–	–
Мерзлые породы. Возможный сезон работы 90 дней								
3	8,9	36,6	207,4	2140,5	443,9	365,0	4,9	1,8
4	11,8	45,2	325,7	1403	457,0	395,3	5,0	1,8
5	10,9	42,6	291,6	1370	400	336	4,4	1,6
6	10,5	41,4	269,9	1828	493,4	411,3	5,4	2,0
7	12,5	47,4	358,8	1305	468,3	339	5,1	1,9
8	13,5	50,2	406,4	1155,0	400	396	4,4	1,6
12	10,7	42,0	278,2	732,5	203,8	170,2	2,2	0,8
13	9,3	37,8	222,3	1400	311,3	257	3,4	1,2
10	8	33,8	175,2	1565	274,2	165	2,2	0,8
11	11	42,8	290,4	1712,5	300	223	3	1,1
9	7,1	31,2	146,3	1105	321,6	245	3,3	1,2
14	4,4	23,2	73,0	1380	400	269	3,5	1,3
Всего	–	–	–	1505	220,2	335	4,4	1,6
				2475	180,7	178,2	2,4	0,9
				–	5896	145,1	2,0	0,8
				–	–	4925,6	–	–

Таблица 4.11  
**Оборудование для разработки и транспортировки вскрыши при механическом рыхлении. Сезон 150 дней**

Котлован	Вскрыша всего	В том числе на дамбы	Внешние отвалы	Расстояние транспорг.	Бульва, ед.		ЭКГ-5 (САТ-988)	БелАЗ	Планиров. отв., Т-170	Сезон
					рыхл.	окуч.				
3	941,0	651,5	289,5	1,5	рыхл.	3,1	2,0	7,6	2,3	1-2
4	500,6	609,0	189,4	2,3	0,8	1,7	1,1	5,3	1,2	1
	298,4				0,5	1	0,6	3,2	0,7	2
5	122	631,2	548,5	2	-	0,4	0,3	1,2	0,3	1
	600				1	2	1,2	5,8	1,4	2
	458				0,8	1,5	0,9	4,4	1,1	3
6	78,5	411,3	664,3	1,2	-	0,3	0,2	0,6	0,2	1
	540				0,9	1,8	1,1	2,9	1,3	2
	457,6				0,8	1,5	0,9	3,3	1,1	3
7	186	735,4	1533,9	1,5	-	0,6	0,4	1,5	0,4	1
	500				0,8	1,7	1,0	4,1	1,2	2
	600				1	2	1,3	4,9	1,4	3
	500				0,8	1,7	1,0	4,1	1,2	4
	500				0,8	1,7	1,0	4,1	1,2	5
8	70,5	400,3	961,3	2	-	0,2	0,2	0,7	1,1	1
	600				1	2	1,3	5,8	2	2
	700				1,2	2,3	1,5	6,8	2,3	3
12	87	170,2	1276,2	2,2	-	0,3	0,2	0,9	0,2	1
	800				1,3	2,7	1,6	8,3	1,9	2
	600				1	2	1,3	6,2	1,4	3



Таблица 4.12

## Оборудование для разработки и транспортировки вскрыши при буровзрывном рыхлении

Котлован	Вскрыша всего	В том числе на дамбы	Внешние отвалы	Расстояние транспорт.	Бульдозер, мес.		ЭКГ-5 (САГ-988)	БелАЗ, при 150 дн.	Планиров. отв., Т-170	Сезон	
					рыхл.	окуч.					ед.
3	941,0	651,5	289,5	1,5	1,6	3,1	2,0	11,8	2,3	1-2	
4	500,6	609,0	189,4	2,3	0,8	1,7	1,1	5,3	1,2	1	
	298,4				0,5	1	0,6	3,2	0,7		2
5	122	631,2	548,5	2	-	0,4	0,3	1,2	0,3	1	
	600				1	2	1,2	5,8	1,4		2
	458				0,8	1,5	0,9	4,4	1,1		
6	78,5	411,3	664,3	1,2	-	0,3	0,2	0,6	0,2	1	
540	0,9				1,8	1,1	2,9	1,3	2		
457,6	0,8				1,5	0,9	3,3	1,1			3
7	186	735,4	1533,9	1,5	-	-	0,4	1,5	0,4	1	
	500				-	-	1,0	4,1	1,2		2
	600				-	-	1,3	4,9	1,4		
	500				-	-	1,0	4,1	1,2		4
	500				-	-	1,0	4,1	1,2		
8	70,5	400,3	961,3	2	-	-	0,2	0,7	1,1	1	
	600				-	-	1,3	5,8	2		2
	700				-	-	1,5	6,8	2,3		
12	87	170,2	1276,2	2,2	-	-	0,2	0,9	0,2	1	
	800				-	-	1,6	8,3	1,9		2
	600				-	-	1,3	6,2	1,4		

13	932,7								2,0	8,2	2,2	1
	800	421,8						1,6	1,6	7	1,9	2
	800		1,7					1,6	1,6	7	1,9	3
	300							0,6	2,6	2,6	0,7	4
10	1236,4							2,5	12	3,0	3,0	1
	1000	468,0						2,1	9,7	2,4	2,4	2
	1250		2					2,6	12,1	3	3	3
	1250							2,6	12,1	3	3	4
	800							1,6	7,8	1,9	1,9	5
11	698,5							1,4	6,7	1,7	1,7	1
	700	603,8						1,4	6,8	1,7	1,7	2
	700		2					1,4	6,8	1,7	1,7	3
	700							1,4	6,8	1,7	1,7	4
	600							1,3	5,8	1,4	1,4	5
9	122							0,5	1,1	0,2	0,2	1
	600	178,2						1,2	5,3	1	1	2
	600		1,7					1,2	5,3	1	1	3
	600							1,2	5,3	1	1	4
	400							0,8	3,5	0,7	0,7	5
14	133							0,3	0,8	0,2	0,2	1
	600	145,1						1,2	3,6	1	1	2
	600		0,8					1,2	3,6	1	1	3
	600							1,0	3,6	1	1	4
Всего	24782,1	5425,8						19376,3				-

Таблица 4.13

## Материалы и оборудование для буровзрывного рыхления пород вскрывши

Котло- ван	Объем, тыс. м <sup>3</sup>	Сезон	ВВ, т	ДШ, тыс. м	Шашки, т	Объем бурения, тыс. п. м	Бур. ста- нок, ед.
7	–	1	0	0	0	0	0
	500	2	325	2	1,85	19,46	0,5
	600	3	390	2,4	2,22	23,35	0,6
	500	4	325	2	1,85	19,46	0,5
	500	5	325	2	1,85	19,46	0,5
8	–	1	0	0	0	0	0
	600	2	390	2,4	2,22	23,35	0,6
	700	3	455	2,8	2,59	27,24	0,7
12	–	1	0	0	0	0	0
	800	2	520	3,2	2,96	31,13	0,8
	600	3	390	2,4	2,22	23,35	0,6
13	800	1	520	3,2	2,96	31,13	0,8
	800	2	520	3,2	2,96	31,13	0,8
	800	3	520	3,2	2,96	31,13	0,8
	300	4	195	1,2	1,11	11,67	0,3
10	1000	1	650	4	3,7	38,91	1
	1000	2	650	4	3,7	38,91	1
	1250	3	812,5	5	4,63	48,64	1,2
	1250	4	812,5	5	4,63	48,64	1,2
	800	5	520	3,2	2,96	31,13	0,8
11	500	1	325	2	1,85	19,46	0,5
	700	2	455	2,8	2,59	27,24	0,7
	700	3	455	2,8	2,59	27,24	0,7
	700	4	455	2,8	2,59	27,24	0,7
	600	5	390	2,4	2,22	23,35	0,6
9	–	1	0	0	0	0	0
	600	2	390	2,4	2,22	23,35	0,6
	600	3	390	2,4	2,22	23,35	0,6
	600	4	390	2,4	2,22	23,35	0,6
	400	5	260	1,6	1,48	15,56	0,4
14	–	1	0	0	0	0	0
	600	2	390	2,4	2,22	23,35	0,6
	600	3	390	2,4	2,22	23,35	0,6
	600	4	390	2,4	2,22	23,35	0,6
Всего	20000	–	13000	80	74,01	778,28	–



Остальные породы вскрыши вывозятся во внешние отвалы, расположенные за границами котлованов. Расстояние транспортирования, определенное по планам горных работ, составляет от 0,8 до 2,3 км. В совокупности со значительными годовыми объемами автотранспортной вскрыши это потребует большого количества автосамосвалов. Определенное расчетами количество оборудования приведено в табл. 4.11. Планировочные работы на дамбах подсчитаны, исходя из 1/3 объема отсыпаемых пород. Производительность Т-170, определенная по "Единым нормам..." [1991], составляет 25 тыс. м<sup>3</sup>/мес. Приведено необходимое количество бульдозеров.

Количество оборудования при буровзрывном рыхлении вскрышных пород в границах котлованов 7–14 приводится в табл. 4.12.

Количество материалов для буровзрывного рыхления приводится в табл. 4.13. Удельный расход материалов на 1000 м<sup>3</sup> составляет: ВВ – 0,65 т; ДШ – 4 м; шашки – 3,7 кг·м<sup>3</sup>. Производительность 2СБШ-200 при 310 рабочих днях – 40 000 п.м. При расчетах количества ВВ и ВМ не учитывался объем почвенно-растительного слоя. Основное ВВ – граммонит 79/21.

# 5 ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАЗРАБОТКИ РОССЫПНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В УСЛОВИЯХ КРИОЛИТОЗОНЫ

## 5.1. ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ПОДГОТОВКЕ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПЕСКОВ И СТРОИТЕЛЬСТВУ ВОДОПОДПОРНЫХ ДАМБ

Совместное применение способа водно-тепловой мелиорации и возведения плотин мерзлого типа обеспечивает существенное снижение объемов выполняемых работ, уменьшение землеемкости и повышение экологической безопасности за счет отказа от применения буровзрывного рыхления песков, снижения трудозатрат на выполнение выемочно-погрузочных и транспортных работ (см. гл. 4).

По приведенным в гл. 4 методикам выполнены расчеты и определены параметры (ширина основания и сечение) дамб, сооружаемых по "талому" и "мерзлому" способам для условий россыпных месторождений Восточной Якутии, которые показали, что при сооружении дамб "мерзлого" типа за счет увеличения углов боковых откосов происходит уменьшение ширины основания и сечения на 10–25 % в зависимости от высоты дамб (рис. 5.1, 5.2).

В целом поверхностная тепловая мелиорация в комбинации с защитой талых песков от зимнего промерзания путем затопления поверхности предохраняемых участков обеспечивает к концу второго года (лета) подготовительных работ оттайку многолетнемерзлых грунтов россыпных месторождений на глубину не менее 4,5–5 м, что находится в пределах мощности песков для большей части россыпных месторождений северо-

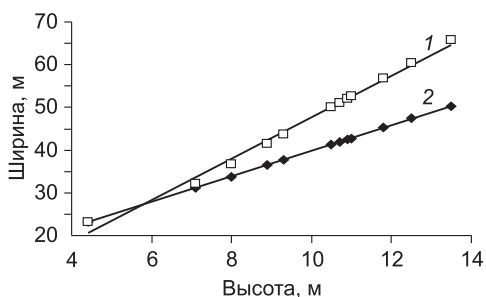


Рис. 5.1. Ширина основания дамб талого (1) и мерзлого (2) типов.

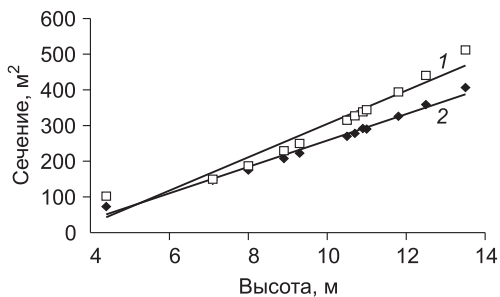


Рис. 5.2. Сечения дамб в зависимости от их высоты.

1 – талый тип; 2 – мерзлый тип.

востока РФ и определяет широкую область применения данного способа. Это дает возможность применить для их разработки традиционное оборудование и способы (бульдозерный, бульдозерно-гидравлический, экскаваторный) без дополнительного рыхления.

В этом случае при сопоставимых годовых параметрах обрабатываемых полигонов россыпных месторождений снижаются объемы вредных выбросов за счет исключения буровзрывного и сокращения объема механического рыхления, уменьшения количества оборудования. Одновременно снизится себестоимость добычи 1 м<sup>3</sup> песков, также будут созданы оптимальные условия дезинтеграции и обогащения.

Достигается существенное уменьшение временно задерживаемых площадей под вывозимые вскрышные породы, предназначенные для обезвоживания и последующего возврата в тело дамб при "талом" способе их сооружения, так как значительная часть мерзлых вскрышных пород направляется непосредственно на возведение дамб "мерзлого" типа. Это сокращает расстояние транспортирования в 2–2,5 раза.

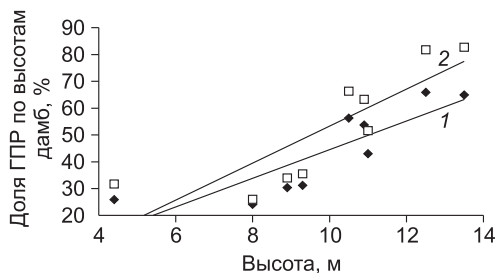
При возведении плотины методом послойного намораживания в зимний период в основании и теле плотины формируется мерзлое противофильтрационное ядро. Это позволит сформировать благоприятный температурный режим в основании плотины, что будет способствовать статической и фильтрационной устойчивости всего сооружения. Для месторождений криолитозоны, как показали расчеты, методом послойного намораживания за один сезон можно возвести плотину высотой до 14 м. Расчетами также установлено, что статическая и фильтрационная устойчивость плотин мерзлого типа в течение длительного периода времени позволяет эффективно проводить мероприятия по водно-тепловой мелиорации песков россыпных месторождений.

В условиях использования плотин "мерзлого" типа исключен дополнительный фильтрационный расход через тело плотины (возможный при "талом" способе сооружения), приводящий к потерям воды, а также к выносу загрязняющих веществ за пределы рабочей зоны.

Эффективность предлагаемого способа возведения плотин определяется тем, что при сооружении дамб "мерзлого" типа, за счет увеличения углов боковых откосов, происходит уменьшение ширины основания и сечения дамб, при этом объемы вскрышных пород и подготавливаемых песков, вынимаемых из-под дамб, уменьшаются на 20–25 %. Выполненные расчеты показали, что доля горно-подготовительных работ в подготавливаемых к выемке объемах песков снижается на 15 % (рис. 5.3).

Рис. 5.3. Изменение относительных объемов горно-подготовительных работ по способам возведения дамб.

1 – мерзлый тип; 2 – талый тип.



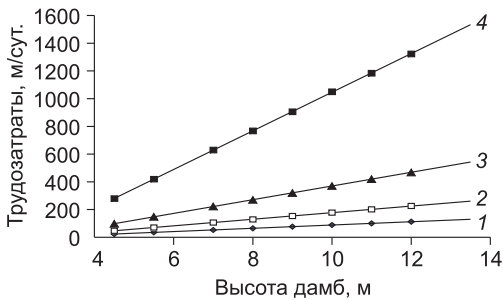


Рис. 5.4. Изменение трудозатрат (машиносутки) при рекомендуемых параметрах обустройства гидротехнических сооружений.

1, 2 – трудозатраты на погрузочные работы при мерзлом и талом способах; 3, 4 – трудозатраты на транспортные работы при мерзлом и талом способах.

Установлено существенное снижение трудозатрат (в машиносменах) при рекомендуемых параметрах сооружения плотин на россыпных месторождениях (рис. 5.4). Основной причиной повышенных трудозатрат также является необходимость вывоза вскрышных пород на обезвоживание и последующего их возврата при "талом" способе возведения дамб.

Выполнен расчет необходимого количества оборудования, исходя из равных объемов вскрышных пород и песков в случае возведения плотин по "талому" и "мерзлому" способам. Расчет показал, что при сооружении "мерзлых" плотин количество оборудования и сроки работ значительно сокращаются (табл. 5.1). Основным фактором, определяющим разницу в количестве оборудования, является необходимость "двойной перевозки" и переработки объемов вскрышных пород при "талом" способе работ.

Таблица 5.1

**Количество оборудования по способам отсыпки водоподпорных дамб**

Высота дамбы, м	Погрузка				Перевозка			
	мерзлый		талый		мерзлый		талый	
	ед.	дни	ед.	дни	ед.	дни	ед.	дни
4,5	1	24	1	47	2	49	2	140
5,5	1	36	1	71	2	74	3	140
7	1	53	1	107	3	74	5	126
8	1	65	1	130	3	90	6	128
9	1	77	1	154	4	80	6	151
10	1	89	2	89	5	74	7	150
11	2	50	2	101	5	84	8	148
12	2	56	2	113	6	78	9	147

## 5.2. ОЦЕНКА ПРЕДЛАГАЕМЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ЭКОЛОГИЧЕСКОМУ ФАКТОРУ

Экологическая нагрузка на окружающую среду при традиционных способах разработки россыпных месторождений в основном складывается из выбросов пыли и газов при работе горно-транспортного оборудования, а также при буровзрывном рыхлении пород.

Выполнение меньших объемов горных и транспортных работ при использовании водно-тепловой мелиорации подготовки мерзлых песков и метода послойного намораживания при строительстве дамб "мерзлого" типа влечет за собой соответствующее снижение объемов пылевых и газовых выбросов.

Так, применение водно-тепловой мелиорации для оттайки песков позволяет отказаться от буровзрывных работ, связанных с пылевыделением при бурении скважин и выбросами газов при массовых взрывах. Удельные объемы выбросов пыли и газов на 1000 м<sup>3</sup> песков при буровзрывной подготовке мерзлых песков, рассчитанные с использованием программных средств фирмы "Интеграл" (программа "Горные работы"), приведены в табл. 5.2, 5.3. В расчетах использованы показатели удельного расхода взрывчатых веществ, выхода горной массы на 1 п. м. бурения, производительности используемого бурового станка на основе практических данных.

В процессе водно-тепловой мелиорации происходит существенное снижение прочности многолетнемерзлых пород, что снижает нагрузку на рабочие органы механических рыхлителей и, соответственно, также уменьшает выделение вредных веществ.

Таблица 5.2

### Выбросы при буровых работах

Код вещества	Название вещества	Макс. выброс, г/с	Валовый выброс, т/год	% очистки	Макс. выброс, г/с	Валовый выброс, т/год
		до очистки			после очистки	
2902	Взвешенные вещества	0,4927390	0,006031	95,98	0,0198316	0,000243
2909	Пыль неорганическая: до 20 % SiO <sub>2</sub>	0,7391085	0,009047	95,98	0,0297474	0,000364

Таблица 5.3

### Выбросы при взрывных работах

Код вещества	Название вещества	Макс. выброс, г/с	Валовый выброс, т/год
0301	Азота диоксид (азот (IV) оксид)	4,8300000	0,008232
0337	Углерод оксид	3,3125000	0,005700
2902	Взвешенные вещества	1,0000000	0,001200
2909	Пыль неорганическая: до 20 % SiO <sub>2</sub>	1,5000000	0,001800

Таблица 5.4

**Разработка мерзлых песков**

Код вещества	Название вещества	Макс. выброс, г/с	Валовый выброс, т/год
0301	Азота диоксид (азот (IV) оксид)	0,1144444	0,007706
0304	Азот (II) оксид (азота оксид)	0,0185972	0,001252
0328	Углерод (сажа)	0,0311111	0,002170
0337	Углерод оксид	0,1400000	0,011603
2732	Керосин	0,1152778	0,010496
2902	Взвешенные вещества	0,0047838	0,000551
2909	Пыль неорганическая: до 20 % SiO <sub>2</sub>	0,0071758	0,000827

Таблица 5.5

**Разработка песков после ВТМ**

Код вещества	Название вещества	Макс. выброс, г/с	Валовый выброс, т/год
0301	Азота диоксид (азот (IV) оксид)	0,1144444	0,003853
0304	Азот (II) оксид (азота оксид)	0,0185972	0,000626
0328	Углерод (сажа)	0,0311111	0,001085
0337	Углерод оксид	0,1400000	0,005802
2732	Керосин	0,1152778	0,005248
2902	Взвешенные вещества	0,0047838	0,000276
2909	Пыль неорганическая: до 20 % SiO <sub>2</sub>	0,0071758	0,000413

Проведен сравнительный расчет удельных (на 1000 м<sup>3</sup>) объемов выбросов при бульдозерной разработке мерзлых песков с механическим рыхлением в сравнении с их разработкой после подготовки способом водно-тепловой мелиорации (табл. 5.4, 5.5). Расчет показал, что удельные объемы выбросов при подготовке песков в целом сокращаются вдвое – с 0,034605 до 0,017303 т/год на 1000 м<sup>3</sup> песков.

Предлагаемый способ подготовки песков россыпных месторождений, расположенных в зоне многолетнемерзлых пород, позволяет также вовлечь в разработку месторождения с пониженным содержанием полезного компонента за счет применения более экономичных и эффективных способов добычи.

Значительная часть вредных выбросов при проведении горных работ на россыпных месторождениях приходится на транспортировку горной массы. Выполнен расчет объемов выбросов на 1000 м<sup>3</sup> при транспортировке горной массы автосамосвалами БелАЗ грузоподъемностью 30 т на расстояние 2,5 км (табл. 5.6). При строительстве дамб "мерзлого" типа значительная часть мерзлых вскрышных пород направляется непосред-

Таблица 5.6

**Транспортировка горных пород автосамосвалами**

Код вещества	Название вещества	Макс. выброс, г/с	Валовый выброс, т/год
0301	Азота диоксид (азот (IV) оксид)	0,2941470	0,025414
0304	Азот (II) оксид (азота оксид)	0,0477989	0,004130
0328	Углерод (сажа)	0,0099371	0,000859
0337	Углерод оксид	0,1197554	0,010347
2732	Керосин	0,0376017	0,003249
2902	Взвешенные вещества	5,0228667	0,346560
2908	Пыль неорганическая: 70–20 % SiO <sub>2</sub>	7,5343000	0,519840

ственно на отсыпку сооружений. Это сокращает расстояние транспортирования и соответственно объемы выбросов в 2–2,5 раза.

В совокупности применение рекомендуемых параметров сооружения водоподпорных дамб мерзлого типа по отношению к талым с учетом всего комплекса горных работ снижает пылевые и газовые выбросы по взвешенным веществам (2902) и пыли неорганической (2909) в 5 раз, по диоксиду азота (0301) – в 2 раза, в целом в зависимости от параметров дамб – в 2–3 раза (рис. 5.5).

Одним из важных факторов при разработке месторождений является нарушение и задалживание земельных площадей (землеемкость). При строительстве водоподпорных дамб мерзлого типа площадь, занимаемая под внешние временные отвалы вскрышных пород, предназначаемых для обезвоживания и последующего возврата в тело дамб при талом способе их сооружения снижается до минимума (практически исключается).

Размеры задалживаемых площадей под внешние отвалы вскрышных пород при сооружении дамб талого типа для различных высот и длин дамб в условиях конкретного месторождения показаны на рис. 5.6.

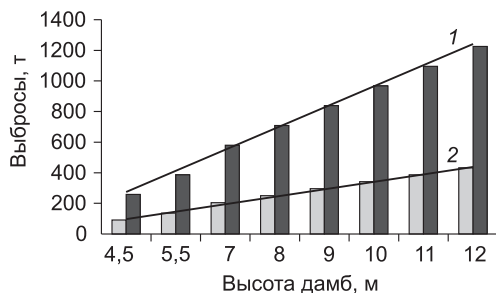


Рис. 5.5. Объемы выбросов в зависимости от способа сооружения дамб.

1 – талый способ, 2 – мерзлый способ.

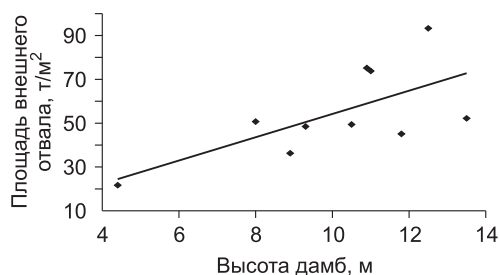


Рис. 5.6. Задалживаемые площади под временные отвалы вскрышных пород.

### 5.3. ВЫВОДЫ

1. Совместное применение способа водно-тепловой мелиорации и строительства плотин "мерзлого" типа при эксплуатации россыпных месторождений в условиях криолитозоны обеспечивает существенное (на 10–15 %) снижение объемов выполняемых работ, уменьшение землеемкости, отказ от применения буровзрывного рыхления песков, снижение трудозатрат на выполнение выемочно-погрузочных и транспортных работ и снижение выбросов вредных веществ в 2–3 раза.

2. Предлагаемый способ подготовки россыпных месторождений зоны многолетнемерзлых пород позволяет вовлечь в разработку месторождения с пониженным содержанием полезного ископаемого за счет применения более экономичных и эффективных способов добычи.

3. Реализация результатов выполненных исследований позволит существенно улучшить технико-экономические показатели разработки россыпных месторождений криолитозоны, снизить экологическую нагрузку на окружающую среду за счет снижения выбросов в атмосферу и сокращения площади нарушенных земель.



---

---

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным содержанием монографии явилось: разработка и расчет численных моделей температурного режима многолетнемерзлых горных пород месторождений РС (Я) в неоднородной двумерной области произвольно изменяющейся во времени конфигурации; исследование факторов активно влияющих на изменение температурного режима горного массива; обоснование технологических параметров по результатам решения тепловых задач.

На основе моделирования тепловых процессов в массиве рассмотрены варианты отработки и методы подготовки пород к выемке для различных климатических и горно-технических условий на примере ряда месторождений Якутии: россыпное месторождение алмазов "Горное", Мирнинский район, месторождение россыпного золота "Нерское", Оймяконский район, алмазоносная россыпь "Молодо", Жиганский район, погребенная россыпь золота р. Бол. Куранах, Алданский район.

Описаны тепловые задачи, математические модели и результаты прогнозирования теплового режима для четырех типов месторождений, различающихся объемным содержанием многолетнемерзлых пород и горно-техническими условиями.

Для условий месторождения "Горное" решены задачи промерзания–протаивания многолетнемерзлого массива, позволившие определить сроки подготовки массива песков для дражной разработки на определенную глубину, а также задачи обоснования параметров дамб котлованов, предусматриваемых к отсыпке в зимнее время. Выполненные расчеты позволили обосновать новый подход к сооружению дамб котлованов, в результате чего расчетные параметры и объемы дамб изменились в меньшую сторону.

В математической модели процесса теплообмена атмосферного воздуха с массивом многолетнемерзлых пород, для решения одномерной задачи промерзания–протаивания использованы численные методы сквозного счета со сглаживанием коэффициентов. В результате просчета вариантов с изменяющимися условиями выработаны рекомендации по подготовке многолетнемерзлых песков методом естественной оттайки и водно-тепловой мелиорации.

Задача о нестационарном температурном поле в нефилтующей земляной плотине с учетом скрытой теплоты фазовых переходов влаги грунта была заменена двумерной задачей Стефана, с обеспечением достаточной для практики точности. Расчеты температурного режима грунтовой плотины производились методом конечных разностей с применением локально-одномерной схемы.

Предложен способ разработки подрусловой россыпи, заключающийся в возведении в верхней части обрабатываемого участка ледовой плотины расчетной высоты в сочетании с сокращением или полным прекращением речного стока.

Для определения рациональных режимов ведения работ, разработана специальная математическая модель послойного намораживания плотины, которая учитывает толщину замораживаемого водного слоя, фазовые переходы вода–лед, нестационарный теплообмен поверхности слоя с атмосферным воздухом, динамику температуры наружного воздуха в течение зимнего периода.

Для решения задачи теплообмена ледяного массива с атмосферным воздухом используется метод конечных разностей, а именно численные методы сквозного счета со сглаживанием коэффициентов.

Алгоритм решения задачи теплообмена ледяного массива с атмосферным воздухом реализован в виде программы на языке FORTRAN. На ее основе были проведены численные эксперименты по расчету ряда параметров послойного намораживания ледяной плотины.

Проведено моделирование теплового режима многолетнемерзлых горных пород россыпи Нерская при предварительном снятии напочвенного покрова. Установлено, что в естественном состоянии величина оттайки составляет 0,5 м, а после удаления напочвенного покрова – 1,55 м. Даже с учетом повышения температуры в слоях, непосредственно прилегающих к талой зоне, возможная глубина разупрочнения недостаточна.

Для оценки эффективности применения в данных условиях способа водно-тепловой мелиорации выполнено моделирование теплового режима россыпи при заливке слоями воды различной глубины и при разных структурах массива. Показано, что в долинах природных водотоков, где происходит естественный процесс водно-тепловой оттайки, возможно образование участков пород с положительными либо с повышенными температурами, что зависит от толщины водного слоя, длительности и стабильности процесса.

Выполнен численный эксперимент по моделированию теплового режима забоя при снятии оттаявшего слоя песков россыпного месторождения через заданные интервалы в 1, 3 и 5 сут. Установлена достаточно устойчивая зависимость между интенсивностью оттайки и отрицательной температурой породы на контакте с положительной температурой воздуха.

В результате решения комплекса тепловых задач установлено, что поверхностная тепловая мелиорация в комбинации с защитой талых песков от зимнего промерзания путем затопления поверхности предохраняемых участков обеспечивает к концу второго года (лета) подготовительных работ оттайку многолетнемерзлых грунтов россыпных месторождений на глубину не менее 4,5–5 м. Это дает возможность применить для их разработки традиционное оборудование и способы (бульдозер-

ный, бульдозерно-гидравлический, экскаваторный) без дополнительного рыхления.

В этом случае при сопоставимых годовых параметрах обрабатываемых полигонов россыпных месторождений снижаются объемы вредных выбросов за счет исключения буровзрывного и сокращения объема механического рыхления, уменьшения количества оборудования. Одновременно снизится себестоимость добычи 1 м<sup>3</sup> песка, также будут созданы оптимальные условия дезинтеграции и обогащения.

Приведенные в монографии примеры моделирования теплообменных процессов в горных массивах при ведении добычных работ на россыпных месторождениях полезных ископаемых Якутии показали их эффективность при обосновании и выборе технологических решений, что в большинстве случаев приводит к существенному снижению затрат на добычу и уменьшает экологическую нагрузку на окружающую среду.

---

---

## ЛИТЕРАТУРА

- Агейкин А.С., Байрон И.Ю., Беккер А.Г. и др.** Методическое руководство при разведке россыпей золота и олова. – Магадан, Магаданск. кн. изд-во, 1982. – 218 с.
- Бауск А.С., Вычужин Т.А.** Анализ производительности бульдозеров при освоении россыпных месторождений Южной Якутии // Пути решения актуальных проблем добычи и переработки полезных ископаемых Южной Якутии: Материалы II республ. науч.-практ. конф. (Нерюнгри, 19–21 октября 2004 г.). – Нерюнгри: Изд-во ЯГУ, 2005. – С. 248–253.
- Беляков Ю.И.** Применение роторных экскаваторов в зимнее время. – М.: Госгортехиздат, 1962. – 96 с.
- Беляков Ю.И.** Совершенствование технологии выемочно-погрузочных работ на карьерах. – М.: Недра, 1977. – 296 с.
- Беляков Ю.И.** Выемочно-погрузочные работы на карьерах. – М.: Недра, 1987. – 268 с.
- Будак Б.М., Соловьева Е.Н., Успенский А.Б.** Разностный метод со сглаживанием коэффициентов для решения задачи Стефана // Журн. выч. математики и матем. физики. – 1965 – Т. 5, № 5. – С. 828–840.
- Временные инструкции по солнечной оттайке / ВНИИ-1 золота и ред. металлов.** – Магадан, 1959. – 23 с.
- Вялов С.С.** Реология мерзлых грунтов. – М.: Стройиздат, 2000. – 464 с.
- Гаврильев Р.И.** Теплофизические свойства компонентов природной среды в криолитозоне: Справочное пособ. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. – 146 с.
- Гольдин А.А., Рассказов Л.Н.** Проектирование грунтовых плотин. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 303 с.
- Гольдштейн М.Н.** Механические свойства грунтов. 2-е изд. – М.: Стройиздат, 1971. – 367 с.
- Давыдов В.А., Бондарева Э.Д.** Изыскания и проектирование автомобильных дорог на многолетнемерзлых грунтах: учеб. пособ. – Омск: ОмПИ, 1989.
- Единые нормы выработки и времени на разработку россыпных месторождений открытым способом.** – Магадан: Северовостокзолото, 1991. – 251 с.
- Емельянов В.И.** Технология бульдозерной разработки вечномерзлых россыпей. – М.: Недра, 1976. – 288 с.
- Емельянов В.И., Назарчик А.Я., Перльштейн Г.З. и др.** Техника и технология подготовки многолетнемерзлых пород к выемке. – М.: Недра, 1978. – 280 с.
- Ермаков С.А., Бураков А.М., Тетельбаум А.С.** Открытая разработка месторождений в условиях нестационарного термомеханического состояния горного массива. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1998. – 110 с.

- Ермаков С.А., Бураков А.М., Заудальский И.И., Панишев С.В.** Совершенствование геотехнологий открытой разработки месторождений Севера. – Якутск: ЯФ ГУ Изд-во СО РАН, 2004. – 372 с.
- Зеленин А.Н.** Основы разрушения грунтов механическими способами. – М.: Машиностроение, 1968. – 376 с.
- Климат Якутска.** – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 246 с.
- Клименко М.И., Сулин Г.А.** Разработка россыпных месторождений бульдозерами. – Магадан: Магаданск. кн. изд-во, 1967. – 106 с.
- Климовский И.В., Готовцев С.П.** Криолитозона Якутской алмазоносной провинции. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1994. – 168 с.
- Кошлаков К.В.** Вскрыша торфов послойным способом. – Магадан: Магаданск. кн. изд-во, 1955. – 75 с.
- Кошлаков К.В.** Опыт вскрышных работ с естественной оттайкой грунта / ВНИИ-1 золота и ред. металлов. – Магадан, 1958. – 36 с.
- Крылов В.И., Бобков В.В., Монастырный П.И.** Вычислительные методы. – М.: Наука, 1977. – Т. 2. – 400 с.
- Кудрин В.Д., Махоткин О.А.** Задача Стефана для вещества, помещенного в контейнер конечной длины // Математические проблемы химии. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1970. – С. 57–74.
- Кузьмин А.В.** Условия строительства сооружений в районах распространения многолетнемерзлых пород. – Л.: Изд-во ЛГИ, 1982.
- Курилко А.С., Каймонов М.В.** Экспериментальные исследования прочности смерзшихся сыпучих горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2004. – № 12. – С. 69–71.
- Куртнер Д.А., Чудновский А.Ф.** Расчет и регулирование теплового режима в открытом и защищенном грунте. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 299 с.
- Лешков В.Г.** Разработка россыпных месторождений. – М.: Недра, 1977. – 460 с.
- Лешков В.Г.** Разработка россыпных месторождений. – М.: Недра, 1985. – 568 с.
- Ломтадзе В.Д.** Инженерная геология. Инженерная петрология. – Л.: Недра. Ленингр. отд-ние, 1984. – 511 с.
- Лыков А.В.** Теория теплопроводности. – М.: Высш. шк., 1967. – 599 с.
- Мазуров Г.П.** Физико-механические свойства мерзлых грунтов. – М.: Недра, 1983. – 81 с.
- Месчан С.Р.** Начальная и длительная прочность глинистых грунтов. – М.: Недра, 1978. – 207 с.
- Мирнинский ГОК.** Прииск "Ирелях". Месторождение "Горное". Изыскания. Инженерно-геологические работы / А.В. Бурундуков, В.М. Гафиятуллин. – Мирный: Якутнипроалмаз, 2005.
- Некрасов И.А., Климовский И.В., Чувашова И.И.** Вечная мерзлота зоны БАМ. – Новосибирск: Наука, 1978. – 120 с.
- Обидин А.Д., Дюрягин Б.С.** Оценка рыхлости многолетнемерзлых горных пород // Совершенствование техники и технологии разработки глубокозалегающих россыпей: сб. науч. тр. – Магадан, 1987. – С. 36–45.

- Осипов В.И.** Природа прочности и деформационных свойств глинистых пород. – М.: Изд-во МГУ, 1979. – 232 с.
- Павлов А.В.** Расчет и регулирование мерзлотного режима почвы. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1980. – 240 с.
- Павлов А.В., Оловин Б.А.** Искусственное оттаивание мерзлых пород теплом солнечной радиации при разработке россыпей. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1979. – 184 с.
- Папернов И.М.** Методика расчета послойного оттаивания для разработки россыпных месторождений в арктических районах Магаданской области // Тр. ВНИИ-1. – Магадан, 1969. – Т. 29. – С. 231–235.
- Патент № 2212538** Российская Федерация, МКИ 7E21C41/30. Устройство для разработки русловой алмазосодержащей россыпи / Тарасов Ю.Д., Диогу Де Соуза Филине Сезар; заявл. 29.04.2002; опубл. 20.09.2003. Бюл. № 26 (III ч).
- Патент № 2349755** Российская Федерация, МПК E21C41/30. Способ разработки подрусловой россыпи в условиях криолитозоны / Курилко А.С., Хохолов Ю.А., Киселев В.В., Каймонов М.В.; заявитель и патентообладатель ИГДС. – № 2007112721/03; заявл. 05.04.07; опубл. 20.03.2009. Бюл. № 8. – 5 с.: 1 ил.
- Перлыштейн Г.З.** Водно-тепловая мелиорация мерзлых пород на Северо-Востоке СССР. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1979. – 304 с.
- Потемкин С.В.** Оттайка мерзлых пород. – М.: Недра, 1991. – 160 с.
- Потемкин С.В.** Разработка россыпных месторождений. – М.: Недра, 1995а. – 471 с.
- Потемкин С.В.** Разупрочнение мерзлых и цементированных пород россыпных месторождений // Практик. и учеб. пособие. – М.: Моск. гос. геолого-разведочная академия, 1995б. – 120 с.
- Растегаев И.К.** Машины для вечномерзлых грунтов. – М.: Машиностроение, 1986. – 213 с.
- Рашкин А.В., Авдеев П.Б., Субботин Ю.В.** Тепловая и водная подготовка горных пород при разработке мерзлых россыпей. – М.: Изд-во "Горная книга", 2004. – 352 с.
- Ржевский В.В., Новик Г.Я.** Основы физики горных пород. – М.: Недра, 1978. – 390 с.
- Самарский А.А., Моисеенко Б.Д.** Экономичная схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана // Журн. выч. математики и матем. физики. – 1965. – Т. 5, № 5. – С. 816–827.
- Самарский А.А., Николаев Е.С.** Методы решения сеточных уравнений. – М.: Наука, 1978. – 592 с.
- Самарский А.А.** Теория разностных схем. – М.: Наука, 1983. – 616 с.
- Самарский А.А., Вабищевич П.Н.** Вычислительная теплопередача. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 784 с.
- СНиП 2.06.05-84\***. Плотины из грунтовых материалов. – М., 1991. – 49 с.
- Сулин Г.А.** Техника и технология разработки россыпей открытым способом. – М.: Недра, 1974. – 232 с.

- Суриков В.В.** Механика разрушения мерзлых грунтов. – Л.: Стройиздат. Ленингр. отд-ние, 1978. – 128 с.
- Тайбашев В.Н.** Некоторые физико-механические свойства мерзлых щебнистых суглинков // Тр. ВНИИ-1. Т. XXII. – Магадан, 1963.
- Тетельбаум А.С.** Модифицированный разностный метод со сглаживанием коэффициентов для решения задачи Стефана // Геокриологические исследования на севере Западной Сибири. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1990. – С. 111–118.
- Тетельбаум А.С.** Модификация численной схемы решения многомерного нелинейного параболического уравнения методом расщепления // Моделирование в механике. – Новосибирск: ИТПМ СО РАН, 1992. – Т. 6 (23), № 4. – С. 116–122.
- Технический** проект на горно-эксплуатационные работы месторождения "Горное". – Якутск: ИГДС СО РАН, 2000. – 156 с.
- Тихонов А.Н., Самарский А.А.** Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1977. – 736 с.
- Трупак Н.Г.** Замораживание грунтов в подземном строительстве. – М.: Недра, 1974. – 280 с.
- Федотченко А.М., Мамаев Ю.А., Плотников Б.Д.** Исследование влияния климатических факторов на эффективность эксплуатации отечественных и импортных бульдозеров в календарном периоде года при разработке многолетнемерзлых россыпей (ВНИИ-1) // Совершенствование техники и технологии разработки глубокозалегающих россыпей: сб. науч. тр. – Магадан, 1987. – С. 22–31.
- Фельдман Г.М.** Термокарст и вечная мерзлота. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1984. – 256 с.
- Фельдман Г.М., Тетельбаум А.С., Шендер Н.И. и др.** Пособие по прогнозу температурного режима грунтов Якутии / Отв. ред. П.И. Мельников. – Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО АН СССР, 1988. – 240 с.
- Фельдман Г.М., Тетельбаум А.С., Сорокина З.Г.** Прогноз термокарста с помощью ЭВМ // Рациональное природопользование в криолитозоне. – М.: Наука, 1992. – С. 139–145.
- Фисенко Г.А.** Устойчивость бортов карьеров и отвалов. – М.: Недра, 1965. – 378 с.
- Фотиев С.М.** Подземные воды и мерзлые породы Южно-Якутского угленосного бассейна. – М.: Наука, 1965. – 231 с.
- Хазанет Л.А., Остапенко П.В., Моисеенко М.Г.** Эксплуатация карьерного оборудования непрерывного действия. – М.: Недра, 1984. – 250 с.
- Цытович Н.А.** Механика мерзлых грунтов. – М., 1973. – 448 с.
- Цытович Н.А.** Механика грунтов. – М.: Высш. шк., 1983. – 228 с.
- Чеченков М.С.** Разработка прочных грунтов – Л.: Стройиздат. Ленингр. отд-ние, 1987. – 232 с.
- Чжан Р.В.** Проектирование, строительство и эксплуатация гидротехнических сооружений низкого напора в криолитозоне (на примере Якутии). – Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2000. – 160 с.

- Чжан Р.В.** Температурный режим и устойчивость низконапорных гидроузлов и грунтовых каналов в криолитозоне. – Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2002. – 208 с.
- Шаталина И.Н.** Теплообмен в процессах намораживания и таяния льда. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. – 120 с.
- Шендер Н.И., Тетельбаум А.С., Фельдман Г.М.** Алгоритм ускоренного поиска периодически установившегося режима при решении задачи Стефана без начальных условий // Геокриологические исследования на севере Западной Сибири. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1990. – С. 105–110.
- Шлойдо Г.А., Захарчук Б.З., Яркин А.А., Телушкин В.Д.** Навесное тракторное оборудование для разработки высокопрочных грунтов. – М.: Машиностроение, 1979. – 192 с.



## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение</b> .....	3
<b>Глава 1. Условия и особенности разработки россыпных месторождений Якутии</b> .....	5
1.1. Природно-климатическая составляющая горных работ .....	–
1.2. Характеристика климата Якутии .....	7
1.2.1. Общие особенности .....	–
1.2.2. Анабарский район .....	9
1.2.3. Оймяконский район .....	10
1.2.4. Усть-Янский район .....	–
1.2.5. Алданский район .....	11
1.2.6. Нерюнгринский район .....	13
1.3. Распространение многолетнемерзлых пород .....	14
1.3.1. Оймяконский район .....	–
1.3.2. Усть-Майский район .....	–
1.3.3. Нерюнгринский район .....	15
1.4. Свойства горных пород и их термомеханическое состояние ..	–
1.4.1. Температура и прочность горных пород .....	–
1.4.2. Исследование прочности песчано-гравийных горных пород .....	20
1.5. Разработка россыпных месторождений Якутии .....	23
1.5.1. Краткая характеристика применяемых технологий .....	–
1.5.2. Основные схемы вскрышных и добычных работ на золото- и алмазонасных россыпях .....	26
1.5.3. Способы разупрочнения многолетнемерзлых горных пород .....	27
1.5.4. Естественная оттайка многолетнемерзлых пород .....	30
<b>Глава 2. Исследование факторов активного влияния на изменение температурного режима многолетнемерзлых пород</b> .....	34
2.1. Математическая модель процесса теплообмена атмосферного воздуха с массивом многолетнемерзлых горных пород .....	–
2.2. Моделирование параметров тепловых процессов на примере месторождения Нерское .....	39
2.2.1. Характеристика месторождения .....	–

2.2.2. Температурный режим ММП при предварительном снятии напочвенного покрова . . . . .	40
2.2.3. Температурный режим ММП при водно-тепловой мелиорации. . . . .	42
2.3. Моделирование параметров тепловых процессов в условиях россыпи реки Бол. Куранах . . . . .	46
2.3.1. Характеристика россыпи . . . . .	–
2.3.2. Инженерные методы расчета глубины оттаивания мерзлого массива . . . . .	47
2.3.3. Расчет теплового состояния массива при послойном снятии оттаявшего слоя . . . . .	49
2.3.4. Анализ результатов расчета. . . . .	51
2.4. Данные натурных наблюдений естественной оттайки в условиях россыпей Колымы. . . . .	53
<b>Глава 3. Моделирование тепловых процессов на россыпном месторождении “Горное” . . . . .</b>	<b>56</b>
3.1. Характеристика условий месторождения . . . . .	–
3.2. Моделирование процессов естественной оттайки и водно-тепловой мелиорации песков. . . . .	64
3.2.1. Расчетные варианты распределения температур в массиве песков . . . . .	–
3.2.2. Выводы и рекомендации по подготовке многолетнемерзлых песков методом естественной оттайки и водно-тепловой мелиорации . . . . .	72
3.3. Моделирование строительства грунтовых плотин дражных полигонов методом послойного намораживания . . . . .	–
3.3.1. Расчет послойного намораживания льдопородной плотины . . . . .	–
3.3.2. Выводы. . . . .	79
3.4. Моделирование теплового режима плотин дражных котлованов россыпного месторождения. . . . .	–
3.4.1. Варианты расчета теплового режима грунтовой плотины . . . . .	–
3.4.2. Выводы и рекомендации по тепловому режиму грунтовой плотины россыпного месторождения криолитозоны . . . . .	88
3.5. Разработка подрусовой россыпи в условиях Севера (на примере россыпи р. Молодо) . . . . .	90
<b>Глава 4. Пример реализации предлагаемых технологических решений в условиях месторождения “Горное” . . . . .</b>	<b>99</b>
4.1. Обоснование выбора технологии разработки . . . . .	–
4.2. Сооружение плотин (дамб) дражных котлованов. . . . .	100
4.2.1. Расчет параметров дамб . . . . .	–
4.2.2. Технология и порядок сооружения плотин . . . . .	107
4.3. Вскрышные работы . . . . .	108
4.4. Расчет потребности горнотранспортного оборудования . . . . .	112

<b>Глава 5. Обоснование рациональных параметров разработки россыпных месторождений в условиях криолитозоны</b> . . . . .	122
5.1. Эффективность реализации технологических решений по подготовке многолетнемерзлых песков и строительству водоподпорных дамб . . . . .	–
5.2. Оценка предлагаемых технологических решений по экологическому фактору . . . . .	125
5.3. Выводы . . . . .	128
<b>Заключение</b> . . . . .	129
<b>Литература</b> . . . . .	132

*Научное издание*

Курилко Александр Сардокович, Ермаков Сергей Александрович,  
Хохолов Юрий Аркадьевич, Каймонов Михаил Васильевич,  
Бураков Александр Михайлович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ  
В ГОРНОМ МАССИВЕ ПРИ ОТКРЫТОЙ РАЗРАБОТКЕ  
РОССЫПЕЙ КРИОЛИТОЗОНЫ**

*Утверждено к печати Ученым советом  
Института горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН*

Редактор *А.В. Владимирова*  
Художественный редактор *Н.Ф. Суранова*  
Корректор *В.В. Борисова*  
Дизайн обложки *Л.Н. Ким*  
Компьютерная верстка *Н.М. Райзвих*

---

Подписано в печать 20.12.2011. Формат 70×100 1/16. Гарнитура BalticaС.  
Печать офсетная. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 11,3. Уч.-изд. л. 9,0.  
Тираж 250 экз. Заказ № 5.0157

---

ООО "Академическое издательство "Гео"  
630055, Новосибирск, ул. Мусы Джалиля, 3/1  
тел./факс: (383) 328-31-13, <http://www.izdatgeo.ru>

Отпечатано в ООО «Таллерес»  
630084, Новосибирск, ул. Лазарева, 33/1, тел.: (383) 271-01-30