

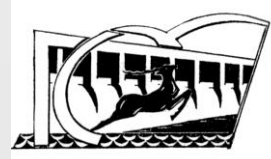
**С. В. Соболев, И.С. Соболев**  
**ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ**  
**ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ**  
**В КРИОЛИТОЗОНЕ**



**Нижний Новгород, 2017**



Министерство образования и науки Российской Федерации



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»

С.В. Соболев, И.С. Соболев

# Температурный режим гидротехнических сооружений в криолитозоне

Утверждено редакционно-издательским советом университета  
в качестве электронного учебного пособия

Нижний Новгород  
ННГАСУ  
2017

ББК 38.77

С<sub>54</sub>

## Рецензенты

*Е. Н. Горохов* – д-р техн. наук, профессор (ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»)

*И.В. Липатов*– д-р техн. наук, профессор (ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта»)

**Соболь, С.В. Температурный режим гидротехнических сооружений в криолитозоне** [Электронный ресурс]: учеб. пос. для студентов вузов /С.В. Соболь, И.С. Соболь; Нижегород. гос. архитектур.- строит. ун-т. – Нижний Новгород: ННГАСУ, 2017. – 402 с. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). ISBN 978-5-528-00181-4

В электронном учебном пособии (ЭУП) приведен в кратком (тезисном) изложении материал иллюстрированного курса лекций по дисциплине «Температурные расчеты гидротехнических сооружений», изучаемой в магистратуре по направлению подготовки 08.04.01 Строительство, направленности (профиль) Гидротехническое строительство.

Представлены конструкции гидротехнических сооружений в области вечной мерзлоты, приведены сведения о физико-термических характеристиках грунтов и строительных материалов, необходимые в температурных расчетах, изложены общие положения и основы методов расчетов температурного режима гидротехнических сооружений, температурного режима и переформирований мерзлых берегов и ложа водохранилищ, в сопровождении результатов прогнозных расчетов и натурных наблюдений для конкретных объектов.

Все права защищены. Копирование и публичное воспроизведение преследуется по закону.

Объем данных: 402 с., 239 Мб.

### **Минимальные системные требования:**

Процессор Pentium III

Операционная система Microsoft® Windows XP

Браузер v.6

ISBN 978-5-528-00181-4

©С.В. Соболь, И.С. Соболь, 2017

© ННГАСУ, 2017

# Содержание

## Введение – 12

### 1. Особенности условий строительства на северо-востоке России – 16

Территория и природные ресурсы России – 17

Климат России – 28

Вечная мерзлота на северо-востоке страны – 34

Температурное состояние долин северных рек – 48

Мерзлотные явления в долинах рек – 52

Строительство зданий и сооружений в области вечной мерзлоты – 59

### 2. Гидротехнические сооружения в области вечной мерзлоты – 83

Типы плотин из грунтовых материалов в криолитозоне – 84

Талые земляные, каменно-земляные и каменнонабросные плотины – 85

Анадырская земляная плотина с ядром на р. Казачке – 85

Земляная плотина с грунтовым экраном на р. Каменушке у г. Магадана – 86

Земляная плотина с ядром строящегося Усть-Среднеканского гидроузла на р. Колыме – 87

Каменно-земляная плотина с грунтовым экраном Вилюйского энергетического гидроузла на р. Вилюй – 88

Каменно-земляная плотина с грунтовым ядром Усть-Хантайского энергетического гидроузла на р. Хантайке – 90

Каменно-земляная плотина с грунтовым ядром Колымского энергетического гидроузла на р. Колыме – 94

Варианты каменнонабросной плотины высотой 230 м для проектируемого Канкунского гидроузла на р. Тимптон в Якутии – 96

Применение грунтово-криогелевых композитов в водоупорных элементах каменно-земляных плотин – 98

Замораживающие системы для грунтовых плотин – 100

Замораживающие устройства Монбейга – 100

Мерзлотная противofiltrационная завеса в плотине, создаваемая с помощью замораживающей системы – 101

Воздушные замораживающие системы – 102

Жидкостные замораживающие системы – 105

Замораживающие системы из парожидкостных сезоннодействующих охлаждающих устройств (ПЖ СОУ) – 106

Предложения по промораживанию грунтовых плотин – 107

Мерзлые земляные и каменно-земляные плотины – 109

Первая мерзлая плотина – 109

Мерзлая земляная плотина на р. Долгая в г. Норильске – 111

Земляная насыпная плотина с мерзлотной противofiltrационной завесой Иреляхского гидроузла на р. Ирелях у г. Мирный в Якутии – 116

Плотина с мерзлотной завесой Сытыканского гидроузла на р. Сытыкан у г. Удачный в Якутии – 121

Плотина с мерзлотной завесой гидроузла на р. Ойуур-Юреге у п. Айхал в Якутии – 126

Сопряжение мерзлых плотин с берегами – 129

- Использование льда для строительства временных плотин – 130
- Предложение о применении грунтово-криогелевых композитов в конструкциях мерзлых плотин – 132
- Изменение типа грунтовых плотин в период эксплуатации – 133
  - Земляная плотина водохранилища Аркагалинской ГРЭС на р. Мянунджа – 133
  - Земляная плотина на руч. Безымянный (приток р. Мархи) в 300 км к северо-востоку от г. Мирный – 135
- Водосбросы гидроузлов с грунтовыми плотинами – 136
  - Водосбросы при талых плотинах – 136
  - Водосбросы при мерзлых плотинах – 143
- Бетонные плотины в зоне сурового климата – 150
- Накопители промышленных отходов – 153
  - Разновидности накопителей по назначению – 153
  - Накопители с ограждающими дамбами талого типа – 155
  - Накопители с ограждающими дамбами мерзлого типа – 159
- Причальные и оградительные сооружения портов – 160
- 3. Физико-термические характеристики грунтов и строительных материалов – 166**
  - Грунты и строительные материалы как многофазные системы – 167
  - Основные физико-термические характеристики, необходимые в температурных расчетах – 173
  - Изменение свойств грунтов при замерзании и оттаивании, тепловая осадка – 180

#### **4. Некоторые сведения из теории теплопередачи – 182**

Виды теплопередачи – 183

Основные понятия и уравнения теплопроводности – 186

Уравнения конвективной теплопередачи в фильтрующем грунте – 196

Уравнения теплопередачи в каменной наброске при конвекции воздуха – 199

#### **5. Основы температурных расчетов гидротехнических сооружений – 202**

Расчеты теплопередачи теплопроводностью в конструкциях зданий и сооружений – 203

Стационарная теплопроводность стенки при граничных условиях I рода – 204

Стационарная теплопроводность стенки при граничных условиях II и III рода – 205

Тепловое сопротивление – 206

Метод конечных разностей – 209

Нестационарная теплопроводность стенки: графический расчет методом конечных разностей – 213

Безразмерные переменные – 216

Сложение температурных полей (суперпозиция) – 217

Расчеты оттаивания мерзлых грунтовых оснований при отсутствии фильтрации воды – 218

Условие на границе раздела фаз при оттаивании-промерзании грунта – 219

Одномерная задача промерзания – оттаивания грунта: приближенное аналитическое решение Л.С. Лейбензона – 222

Учет зависимости  $\lambda=f(\vartheta)$  в задачах о стационарной теплопроводности – 226

- Задача о стационарном температурном состоянии основания сооружения (двухразмерные условия) – 228
- Расчеты температурного режима нефльтрующих мерзлых земляных плотин – 230
  - Виды температурного режима плотин – 230
  - Нестационарная плоская задача теплопроводности: решение методом конечных разностей – 232
  - Постановка и решение двухмерной задачи расчета температурного режима мерзлой земляной плотины – 235
  - Трехмерная модель температурного режима берегового примыкания плотины – 241
  - Построение стационарного температурного поля в плотине методом электротепловой аналогии (ЭТА) – 245
- Расчеты замораживающих систем в грунтовых плотинах – 246
  - Приближенный метод расчета воздушной замораживающей системы – 246
  - Результаты расчета мерзлотной завесы в фильтрующем грунте – 252
- Понятие о расчете температурного режима фильтрующих талых земляных плотин – 253
- Понятие о расчете температурного режима каменно-земляных плотин – 256
- Расчеты температурного режима грунтовых гидросооружений на ЭВМ – 264
- Натурные наблюдения температурного режима – 266
- 6. Температурный режим гидротехнических сооружений по расчетам и наблюдениям – 268**
  - Температурный режим грунтовых плотин мерзлого типа – 269
    - Плотина на р. Долгая в г. Норильске – 269



- Плотина Иреляхского гидроузла на р. Ирелях – 271
- Плотина Сытыканского гидроузла на р. Сытыкан – 272
- Плотина гидроузла на ручье Уэся-Лиендокит в бассейне р. Вилюй – 274
- Ледогрунтовая защитная дамба в условиях Центральной Якутии – 276
- Проектный вариант плотины мерзлого типа Амгуэмского гидроузла на р. Амгуэма – 277
- Температурный режим каменно-земляных и каменнонабросных плотин талого типа – 278
- Каменно-земляная плотина с ядром Усть-Хантайского гидроузла на р. Хантайке – 279
- Каменно-земляная плотина с экраном Вилюйского гидроузла на р. Вилюй – 282
- Каменно-земляная плотина с ядром Колымской ГЭС на р. Колыме – 287
- Участок сопряжения каменно-земляной плотины с бетонными сооружениями строящегося Усть-Среднеканского гидроузла на р. Колыме – 290
- Каменно-земляная плотина проектировавшегося гидроузла на р. Вача в Иркутской области – 293
- Каменнонабросная плотина Тельмамского гидроузла на р. Мамакан, проектные варианты – 295
- Каменнонабросная плотина проектируемого Канкунского гидроузла на р. Тимптон – 298
- Предложение по регулированию температурного режима каменно-земляных плотин талого типа путем управления конвекцией воздуха в низовой призме – 299

- Температурный режим ограждающих дамб хвостохранилищ – 300
  - Мирнинский ГОК: ограждающая дамба хвостохранилища фабрики №3 – 300
  - Нюрбинский ГОК: ограждающая дамба хвостохранилища фабрики №16 – 302
- Температурный режим бетонных плотин – 304
  - Бетонная гравитационная плотина Братской ГЭС – 304
  - Проектный вариант бетонной гравитационной плотины Колымской ГЭС – 305
  - Бетонная водосливная плотина на фильтрующем основании – 306
- Температурный режим портовых гидротехнических сооружений – 307
  - Шпунтовый причал порта Якутск на р. Лене – 307
  - Ряжевый причал порта Якутск на р. Лене – 308
  - Грунтовая защитная дамба в Городской протоке р. Лены у г. Якутска – 310

## **7. Наблюдения и расчеты температурного режима и переформирования ложа и берегов водохранилищ – 311**

- Водохранилища в криолитозоне России – 312
  - Показатели водохранилищ – 312
  - Температура воды – 317
  - Тепловые и механические процессы в основании и берегах – 318
- Температурный режим основания и оседание ложа водохранилищ – 319
  - Натурные данные об оседании ложа водохранилищ – 319
  - Одномерная задача оттаивания грунта основания водохранилища с учетом осадки: приближенное аналитическое решение – 322

- Оттаивание основания и оседание дна термокарстового озера Сырдах в центральной Якутии – 325
- Трехмерная модель температурного режима основания водохранилища с учетом оседания ложа – 326
- Температурный режим основания и оседание ложа Анадырского водохранилища – 335
- Температурный режим основания водохранилища на руч. Поннеурген, проектировавшегося для водоснабжения Билибинской АЭС – 342
- Температурный режим и переформирование мерзлых берегов водохранилищ – 344
- Типы берегов и данные натурных наблюдений за их переформированием – 344
- Температурный режим пологого нейтрального берега Вилюйского водохранилища – 352
- Определение стационарного температурного состояния берега водохранилища методом ЭТА – 354
- Прогнозная энергетическая модель переформирования термоабразионного берега водохранилища – 356
- Переформирование термоабразионных берегов Вилюйского водохранилища – 361
- Переформирование термоабразионного берега проектировавшегося Амгуэмского водохранилища на р. Амгуэме – 366

Берегозащита на водохранилищах криолитозоны – 368

Изменение морфометрических параметров водохранилищ криолитозоны  
в период эксплуатации – 371

**Заключение – 376**

**Список литературы – 377**

**Приложения – 391**

Соотношения единиц измерения метрической системы и системы СИ – 392

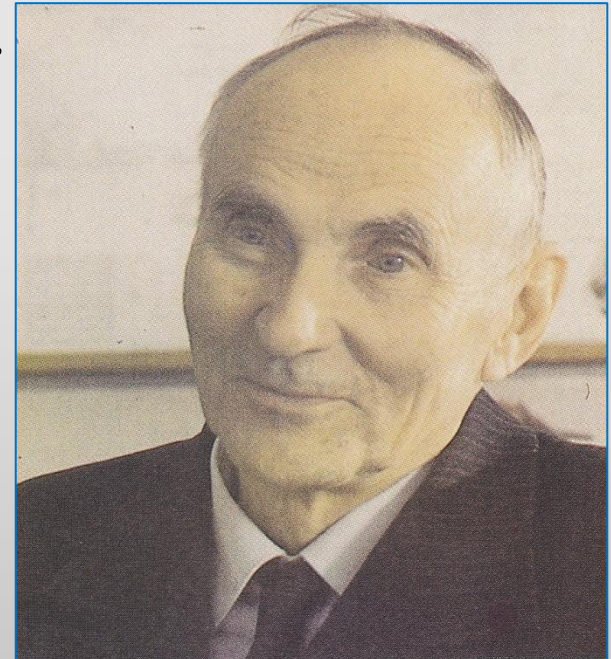
Теплофизические характеристики грунтов в естественном залегании – 394

Контрольные вопросы – 396

# Введение

В Нижегородском государственном архитектурно-строительном университете (бывшем Горьковском инженерно-строительном институте имени В.П. Чкалова) кафедрой гидротехнических сооружений для студентов специальности Гидротехническое строительство с 1965 г. читался спецкурс «Температурные расчеты гидротехнических сооружений в северной строительной - климатической зоне».

Спецкурс был впервые поставлен доктором технических наук, профессором П.А. Богословским в порядке реализации научного направления кафедры по северному гидротехническому строительству и специализации части выпускников - гидротехников в этом направлении.



Петр Алексеевич Богословский (1913 – 1993), доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой гидротехнических сооружений ГИСИ – ННГАСУ с 1952 г. по 1989 г.

За прошедший период неоднократно менялось наименование и содержание курса, он делился на части, которые затем вновь объединялись, варьировалось количество часов лекций и практических занятий вслед за изменениями учебных планов специальности при реформах высшего строительного образования.

К настоящему времени дисциплина под названием «Температурные расчеты гидротехнических сооружений» перетекла в учебный план прикладной магистратуры по направлению подготовки 08.04.01 Строительство, направленность (профиль) Гидротехническое строительство [Федеральный государственный образовательный стандарт, 2014; Рабочий учебный план, 2016].

Целью дисциплины является теоретическая и практическая подготовка магистрантов в области температурных расчетов и проектирования гидротехнических сооружений, подверженных особому влиянию температурных факторов в условиях криолитозоны, занимающей значительную часть территории нашей страны. В процессе изучения дисциплины они должны приобрести умения и навыки ориентироваться в составе и применяемых методах расчетов температурного режима гидротехнических сооружений, пользоваться специальной литературой в изучаемой предметной области.

При отсутствии специального учебника восполнить пробел призвано настоящее учебное пособие. Оно содержит значительный теоретический, информационный и иллюстративный лекционный материал, позволяющий изучить дисциплину сообразно количеству учебных часов, которые на нее отведены.

В пособии отражены особенности условий строительства на северо-востоке страны, описаны конструкции гидротехнических сооружений в области вечной мерзлоты, приведены сведения о физико-термических характеристиках грунтов и строительных материалов, необходимые в температурных расчетах, изложены общие положения и основы методов температурных расчетов гидротехнических сооружений, содержатся сведения о температурном режиме гидротехнических сооружений, полученные в результате прогнозных расчетов и натурных наблюдений, представлены методы прогноза и общие закономерности изменения морфометрических параметров водохранилищ криолитозоны в период эксплуатации.

Лекционный текст в пособии представлен в краткой (тезисной) форме, имея в виду, что расширенные пояснения делаются преподавателем.

Предусмотрено, что навыки по основам проведения температурных расчетов магистранты получают на практических занятиях и самостоятельно выполняя практические работы согласно методическому руководству [Соболь С.В., Горохов Е.Н., Соболь И.С., Ежков А.Н. температурные расчеты сооружений и водохранилищ гидроузлов. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2008. – 143 с.]

В пособии, наряду с единицами СИ, иногда используются удобные для гидротехников и примененные в первоисточниках метрические единицы измерения; в приложении дано соотношение единиц.

Библиографический список включает 95 наименования научно-технической литературы, так или иначе использованной при составлении настоящего учебного пособия. Магистранты, желающие совершенствоваться в данной области исследований, могут проводить температурные расчеты гидротехнических объектов в индивидуальном порядке на ЭВМ при выполнении выпускных квалификационных работ. В этих случаях приведенный библиографический список окажется для них особенно полезным.



# **1. Особенности условий строительства на северо-востоке России**

# Территория и природные ресурсы России

Территория Российской Федерации простирается с севера на юг на 4,5 тыс. км, с запада на восток более чем на 9 тыс. км. Площадь территории 17 075 200 км<sup>2</sup>.

К Европейской России относят территорию, лежащую западнее Урала – около 23%; на долю Азиатской России приходится свыше 75% площади страны. Основная часть территории расположена между 70° и 50° с. ш., около 20% лежит за Северных полярным кругом.

Общая протяженность границ России 60 932,8 км, из них 38 807,5 км приходится на долю морских границ – суша страны омывается 12-ю морями бассейнов Атлантического, Северного Ледовитого и Тихого океанов.



Знак границы Европа-Азия на Урале 17

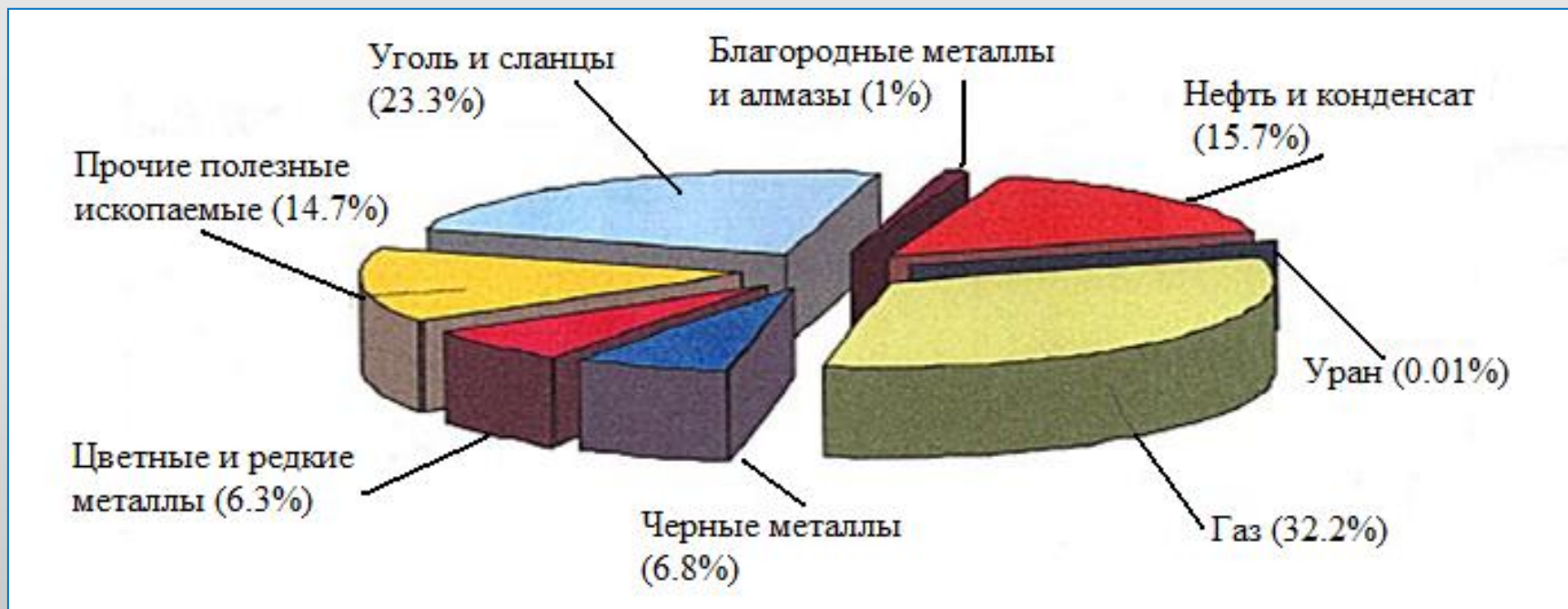
В недрах России сосредоточены значительные природные богатства.



Месторождения полезных ископаемых в России

В России примерно 30% мировых запасов природного газа, 50% алмазов, 25% никеля, 17% олова, почти 10% запасов нефти, обнаружены залежи практически всех полезных ископаемых.

Общая потенциальная ценность разведанных запасов полезных ископаемых России 28 560 млрд. долларов. Их доли в общей стоимости отражены диаграммой.



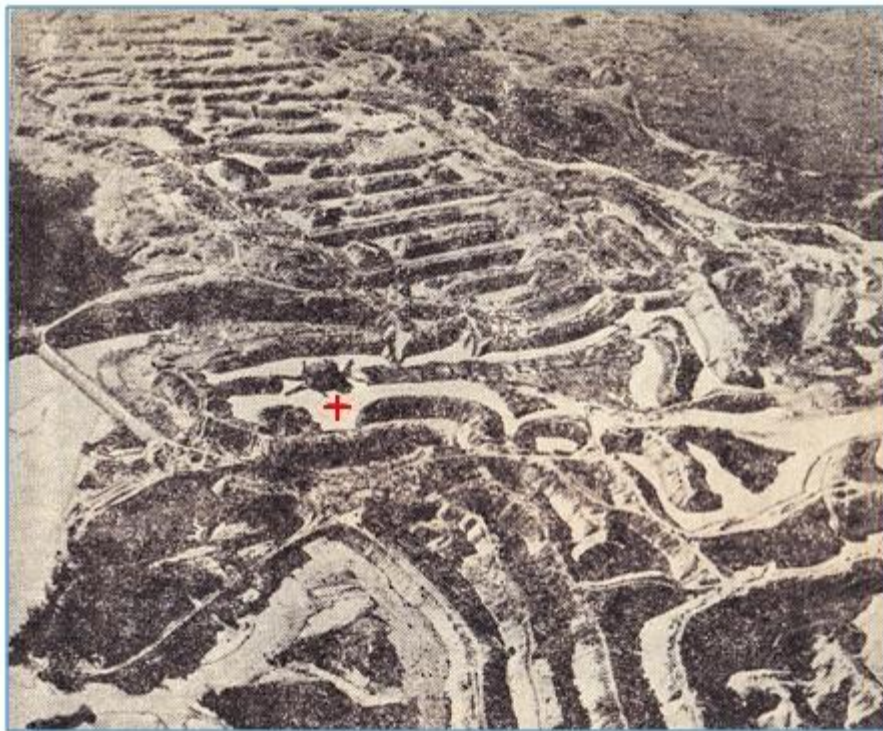
Обеспеченность России собственными разведанными запасами полезных ископаемых (исходя из уровня добычи 1991г.) следующая, в годах:

Нефть	35	Вольфрам	37
Природный газ	81	Цинк	18
Уголь	60-180	Свинец	15
Железные руды	42	Сурьма	14
Ниобий	43	Золото рассыпное	12
Медь	40	Золото коренное	37
Никель	40	Фосфаты	52
Молибден	40	Калийные соли	112

Приоритеты по разработке полезных ископаемых находятся в азиатской части страны:

- нефть и газ – Западная Сибирь, Восточная Сибирь, Тимано-Печорский бассейн, шельф;
- уран – Дальневосточный и Сибирский федеральные округа;
- золото – те же территории;
- алмазы – Северо-Запад России и Восточная Сибирь.

Ресурсы Азиатской России для разработки дороги, она иногда требует больше затрат, чем стоят запасы по мировым ценам [Паршев, 2003], в то время как инвестиции подразумевают возвратность и доходность.



Участок россыпного месторождения золота в Магаданской области , разрабатываемый драгой, после чего остается холмисто-грядовый озерный рельеф с оттаявшими грунтами. Крестиком отмечена драга. 1980-е гг.

Действующий алмазный карьер трубки «Удачная» в Якутии: пройден в вечной мерзлоте на глубину более 400 м; ГОК и г. Удачный снабжаются водой из Сытыканского водохранилища на р. Сытыкан площадью зеркала 6,18 км<sup>2</sup>, полным объемом 34,1 млн. м<sup>3</sup>, образованным в 1977 г. грунтовой плотиной мерзлого типа



В России насчитывается:

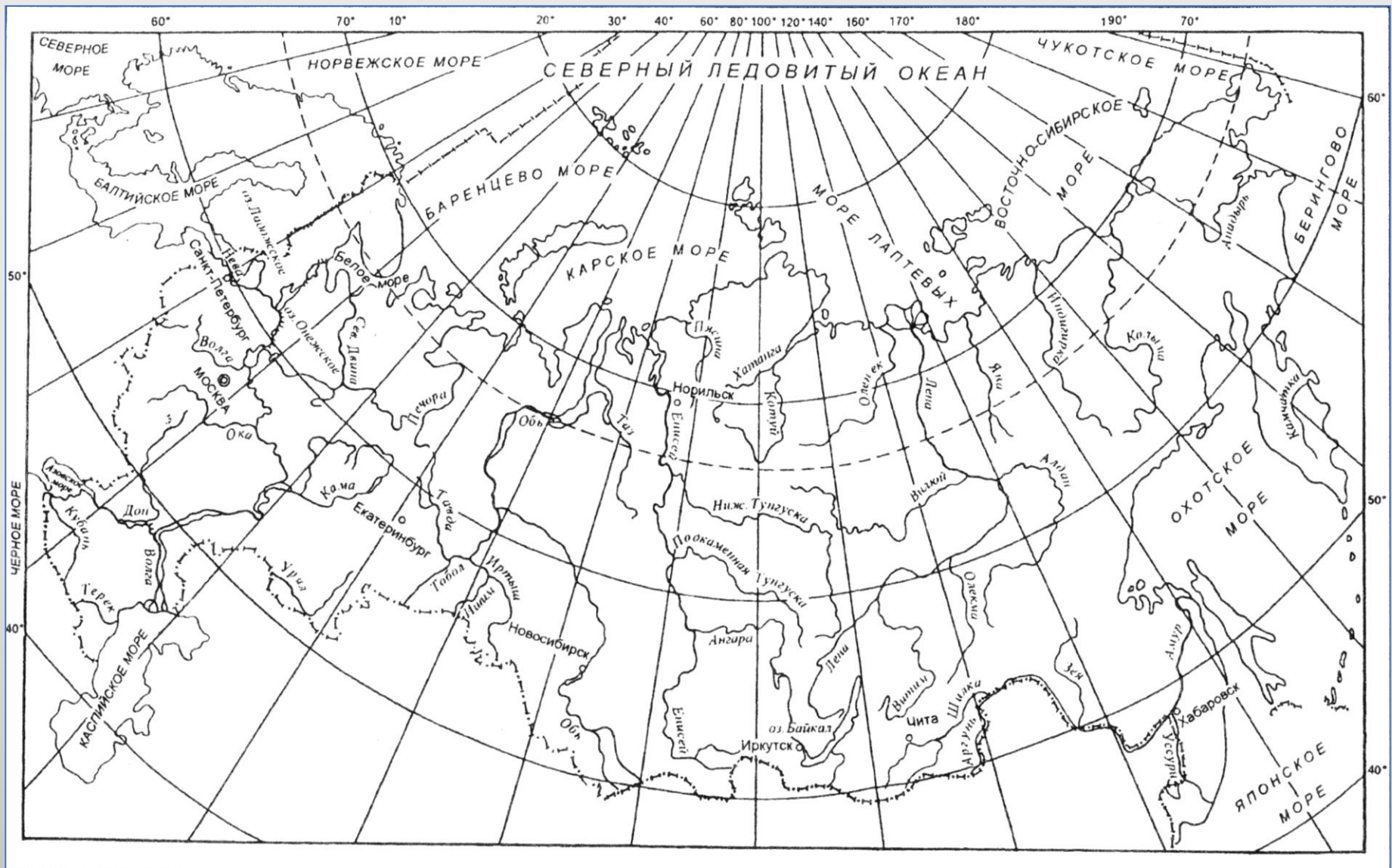
- 855 средних рек длиной от 200 до 500 км протяженностью 0,256 млн км;

- 210 больших рек длиной более 500 км протяженностью 0,189 млн км.

Большинство этих рек текут по азиатской территории страны.



Река в Сибири



Основные реки России



## Характеристики крупнейших рек севера и востока России

Река	Средне-многолетний сток, км <sup>3</sup> /год	Средне-многолетний расход в устье, м <sup>3</sup> /с	Площадь бассейна, тыс. км <sup>2</sup>	Длина, км	Куда впадает
Енисей	630	19 800	2 580	5 844	Карское море
Лена	532	15 140	2 490	4 337	Море Лаптевых
Обь	400	12 700	2 990	5 570	Карское море
Амур	344	10 900	1 855	2 824	Охотское море
Ангара	160,9		1 039	1779	р. Енисей
Алдан	161,1	5 110	729	2 300	р. Лена
Печора	126	4 000	322	1 809	Баренцево море
Колыма	123	3 900	681	1 988	Вост.-Сиб. море
Н.Тунгуска	116,6	3 700	483	2 900	р. Енисей
Сев. Двина	110	3 491	357	744	Белое море
Хатанга	105	3 320	364	1 636	Море Лаптевых
Иртыш	89,3		1 643	4248	р. Обь
Пясины	81,9	2 600	182	818	Карское море
Вилуй	72,2	2 290	454	2 654	р. Лена
Витим	69,4	2 200	241	1 823	р. Лена
Зея	59,9		233	1242	р. Амур
Индиگیرка	58,3	1 758	358	1 810	Вост.-Сиб. море
П.Тунгуска	55,2	1 750	249	1 832	р. Енисей
Анадырь	53	1 700	198	1 124	Берингово море
Оленёк	38,9	1 265	218	2 219	Море Лаптевых
Камчатка	32,5	1 030	55,9	704	Берингово море
Яна	31,5	1 000	232	856	Море Лаптевых

**Колыма** – река в Якутии и Магаданской области: длина 2129 км; впадает в Восточно-Сибирское море; на реке Колымская и Усть - Среднеканская ГЭС.



Река Колыма в среднем течении

Астрономической цифрой 2896 млрд. кВт·ч/год выражается валовой потенциал возобновляемых гидроэнергетических ресурсов России.

Страны-лидеры по гидроэнергетическим ресурсам и установленной мощности ГЭС

Страна	Гидроэнергетический потенциал, ГВт·ч/год		Установленная мощность ГЭС, МВт	Выработка на ГЭС, ГВт·ч/год	Выработка на ГЭС, % от общей по стране	Использование экономического потенциала, %
	технический	экономически целесообразный				
Бразилия	1 300 000	763 000	83 752	331 678	76,6	43,4
Индия	660 000	442 000	37 000	121 650	17,1	27,5
Канада	951 000	536 000	72 660	350 600	59	65,4
Китай	2 474 000	1 750 000	147 000	475 000	14	27,1
Россия	1 670 000	852 000	47 000	170 000	18	19,9
США	528 500	376 000	78 200	270 000	7	71,8

В ряде районов Сибири и Дальнего Востока гидроэлектроэнергия является основой электрификации промышленности, сельского хозяйства и быта. Но в целом гидроэнергетический потенциал российских рек недоиспользуется. В 1980-х гг. Минэнерго СССР располагало 104 исследованными створами для создания ГЭС на северо-востоке страны. Потенциал северных рек целесообразно использовать для гидроэлектрификации России [Ерахтин, 2007].

## План (генеральная схема) пуска гидроэлектростанций с установленной мощностью более 300 МВт в России

### Достройка:

Бурейская	1000 МВт, 2015 г.
Богучанская	3000 МВт, 2015 г.
Усть-Среднеканская	570 МВт, 2020 г.
Светлинская	360 МВт, 2020 г.

### Новое строительство:

Нижнеангарская	1082 МВт, 2030 г.
Мокская	1200 МВт, 2025 г.
Нижнебурейская	320 МВт, 2020 г.
Граматухинская	400 МВт, 2025 г.
Канкунская	1200 МВт, 2030 г.

[Лапин, 2011 ]



Строительство Нижнебурейской ГЭС на р. Бурея

# Климат России

Кто не знает что мы живем в самой холодной стране мира? Это знают все. Россия – единственная империя за всю историю человечества, возникшая в северных широтах. Западная Европа, по нашим понятиям, субтропики. В Лондоне растут пальмы и бамбук. Причина – Гольфстрим.

В России представлены четыре типа климата:

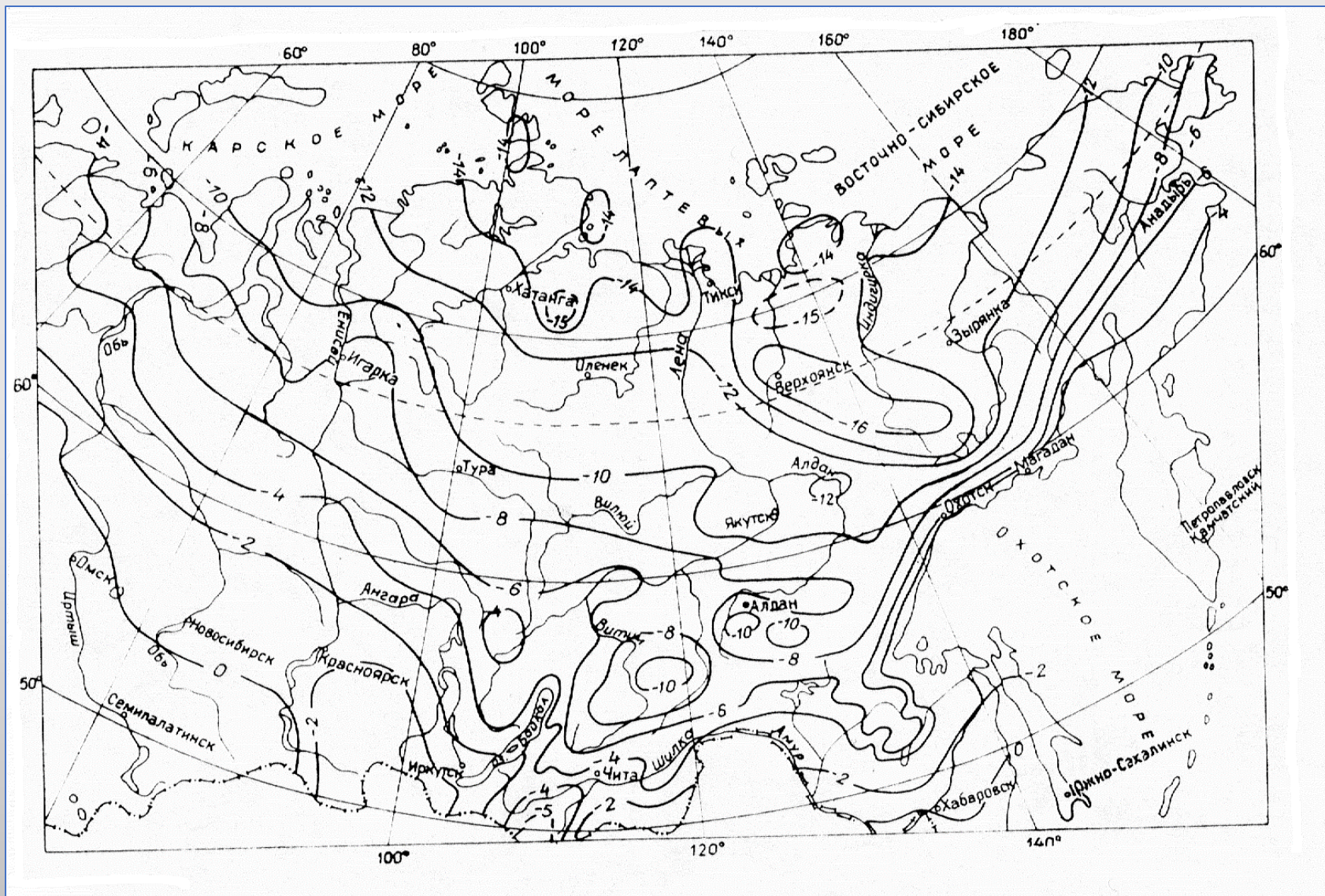
I – АРКТИЧЕСКИЙ – с очень холодной зимой и коротким теплым летом – крайние северные и северо-восточные районы;

II - СУБАРКТИЧЕСКИЙ – с холодной зимней погодой, но теплым летом – северо-западные и центральные районы;

III –УМЕРЕННЫЙ – с отрицательной зимней температурой воздуха, но обычно жарким летом – преимущественно районы в средней полосе и отчасти на юге и юго-востоке;

IV – СУБТРОПИЧЕСКИЙ – с короткой и неустойчивой зимой и длинным жарким летом – крайние южные и юго-восточные районы.

Особо суровым (арктическим) климатом отличается северо-восток страны.

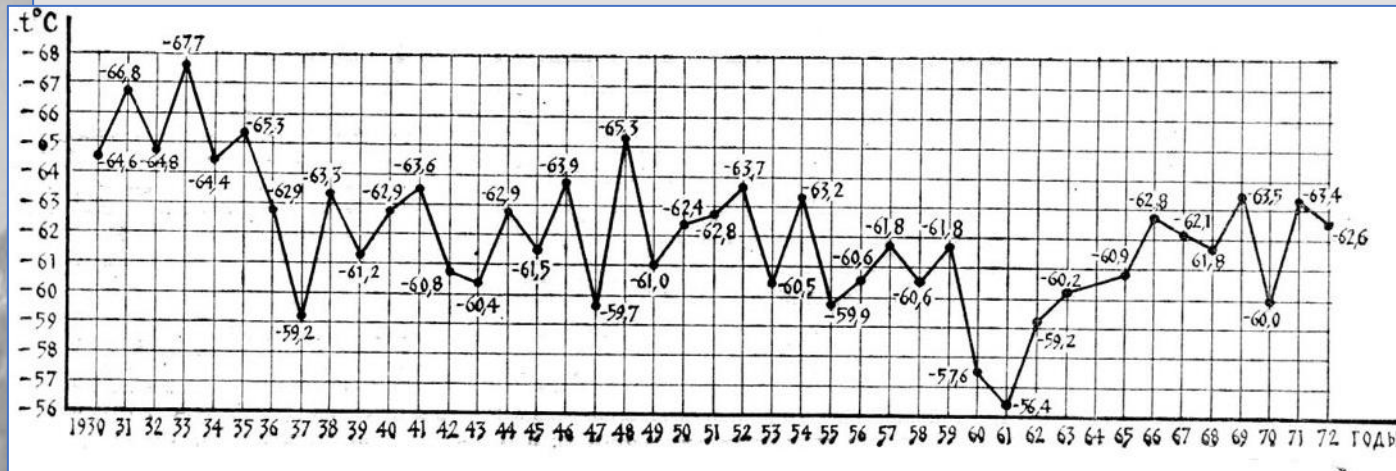
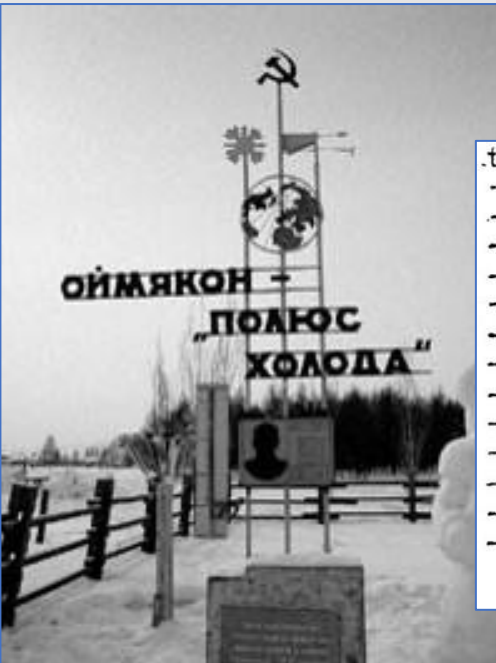


Средняя годовая температура воздуха на северо-востоке России



Поселок Оймякон в Якутии в долине р. Индигирки считается самой холодной точкой нашей страны и северного полушария Земли. Здесь в 1924 г. была зарегистрирована температура воздуха минус **71,2°С**.

Температуры ниже 60 градусов по Цельсию бывают здесь практически каждый январь, а в августе может быть как плюс 30°, так и минус 15°.



Наинизшие температуры приземного воздуха на метеостанции Оймякон

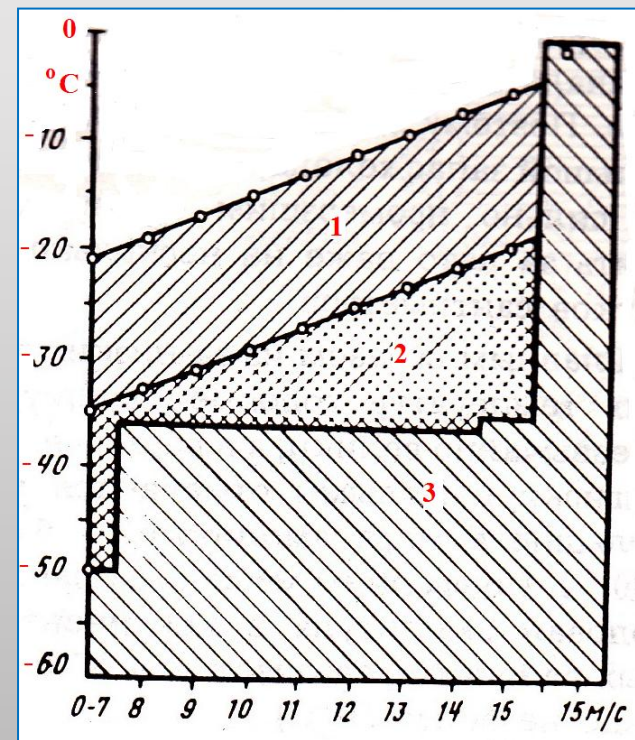
## Таблица ощущаемых температур при различных температурах окружающего воздуха и скоростях ветра

Действующая (эффективная, ощущаемая) температура (°C)									
Температура воздуха (°C)	Скорость ветра км/час								
	5	10	15	20	30	40	50	60	
	Скорость ветра м/с								
	1,4	2,8	4,2	5,6	8,3	11,1	13,9	16,7	
10	10	9	8	7	7	6	5	5	
5	4	3	2	1	0	-1	-1	-2	
0	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	
-5	-7	-9	-11	-12	-13	-14	-15	-16	
-10	-13	-15	-17	-18	-20	-21	-22	-23	
-15	-19	-21	-23	-24	-26	-27	-29	-30	
-20	-24	-27	-29	-30	-33	-34	-35	-36	
-25	-30	-33	-35	-37	-39	-41	-42	-43	
-30	-36	-39	-41	-43	-46	-48	-49	-50	
-35	-41	-45	-48	-49	-52	-54	-56	-57	
-40	-47	-51	-54	-56	-59	-61	-63	-64	

Смертельно опасно

Очень - очень холодно

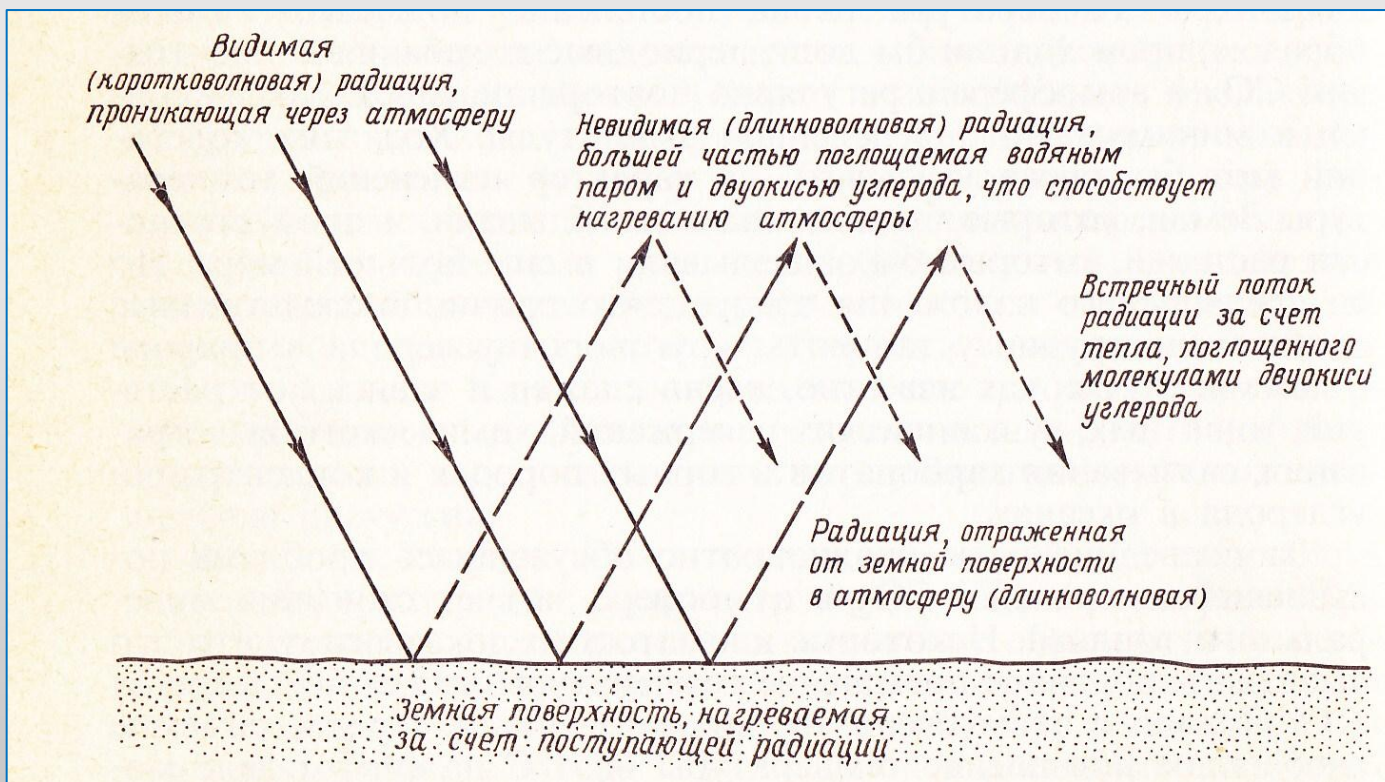
Суровые зимние условия неблагоприятно воздействуют на организм человека. При морозах  $-50^{\circ}\text{C}$  ощущение холода даже в меховой одежде очень велико. Привычные к холоду якуты и эвены избегают пускаться в дорогу при такой температуре, так как малейшая оплошность приводит к тяжким последствиям.



Влияние погодных условий на ведение наружных работ: 1 – перерывы на 10 мин. в час;  
2 – перерывы на 15 мин. в час; 3 – работы не ведут

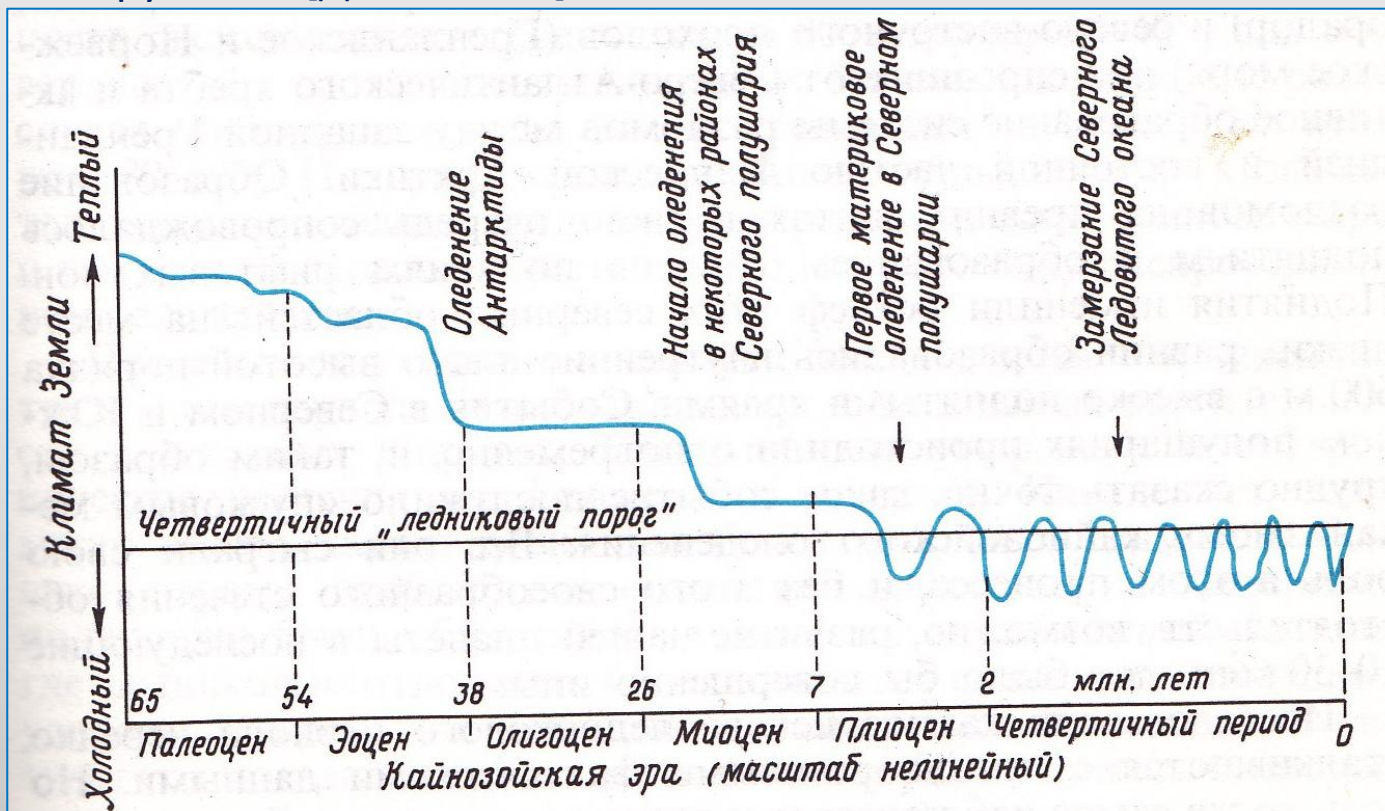


В последние десятилетия обсуждается проблема повышения содержания  $\text{CO}_2$  в атмосфере Земли за счет сжигания минерального топлива, что вызвало «парниковый эффект» и глобальное повышение температуры воздуха на  $1^\circ \text{C}$ . Однако, трудно доказать, что это потепление обусловлено антропогенным загрязнением атмосферы [Джон, 1982]. По данным ААНИИ Росгидромета, наблюдавшееся в процессе потепления сокращение площади арктических льдов прекратилось с 2007 г. и с тех пор эта площадь растет.



График, иллюстрирующий «парниковый эффект», при котором атмосфера Земли нагревается благодаря присутствию молекул двуокиси углерода

Климат Земли (следовательно и России) не остается постоянным во времени. Период, в котором мы живем, - типичный межледниковый. Он ничем не теплее межледниковый прошлого и продлится, вероятно, еще 5 – 10 тыс. лет. В любом случае никто не может быть уверен в том, как изменится климат Земли, а его кратковременные колебания – вероятно, нормальная особенность нашего природного окружения [Джон, 1982].

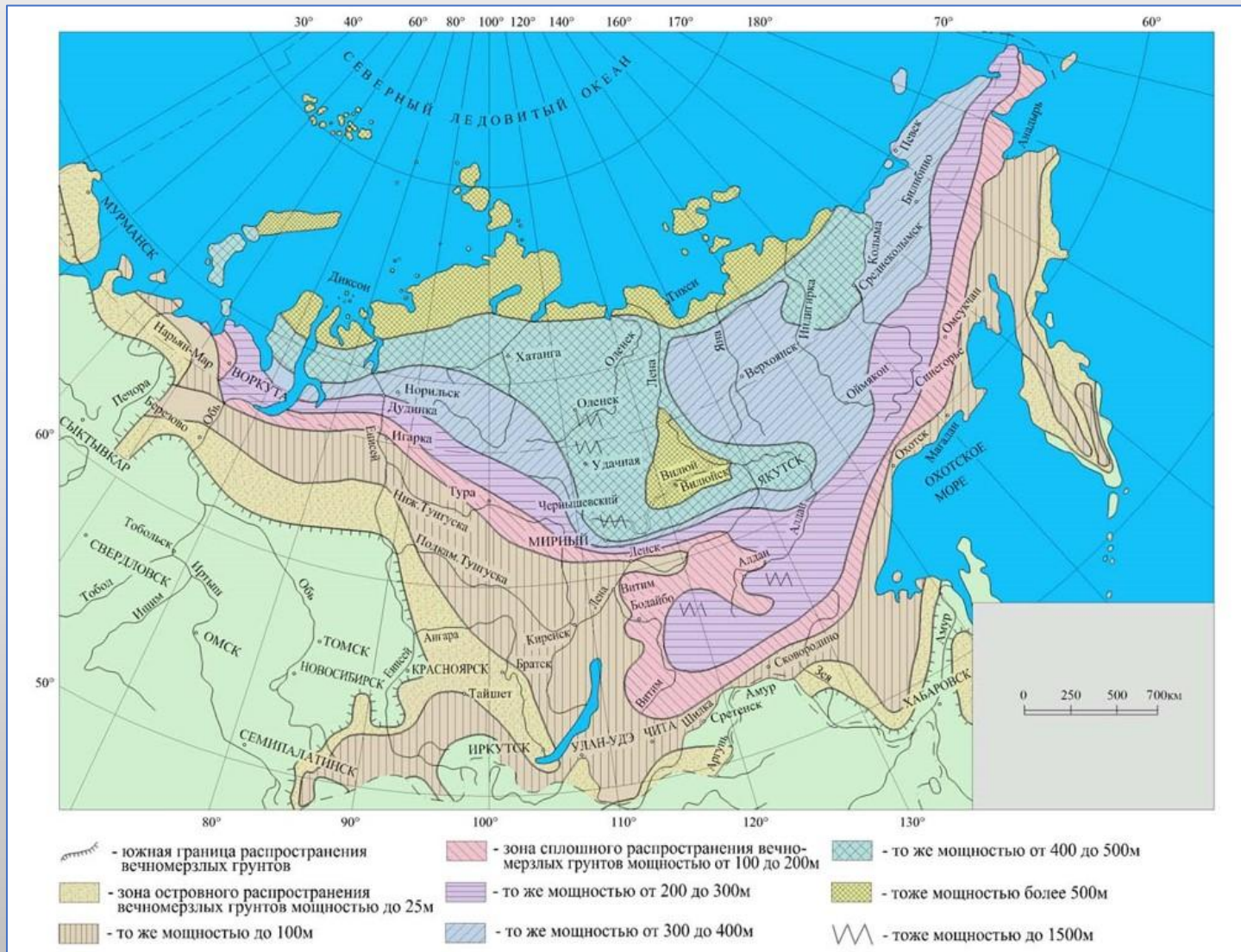


Предполагаемая тенденция развития климата Земли в третичном и четвертичном периодах, направленная к достижению «ледникового порога».

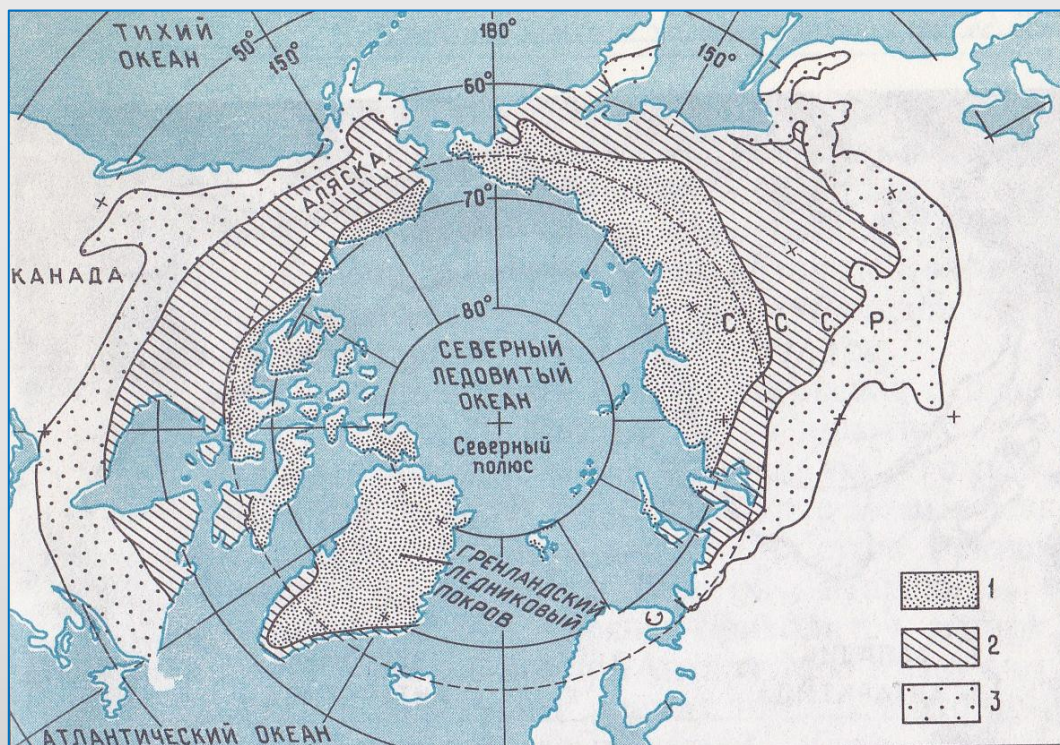
По крайней мере в течение последних 2 млн. лет происходили колебания климата относительно этого порога.

# Вечная мерзлота на северо-востоке страны

Территория России, занятая вечной мерзлотой (криолитозона), составляет около 10,5 млн. км<sup>2</sup> (64 % площади страны).



Территории, занятые вечной мерзлотой имеются, кроме России, в Швеции, Дании (Гренландия), Канаде, США (Аляска), а всего составляют около 14% суши земного шара [Джон, 1982].



Распространение вечной мерзлоты в Северном полушарии: 1 – сплошное; 2 – островное; 3 – редкоостровное

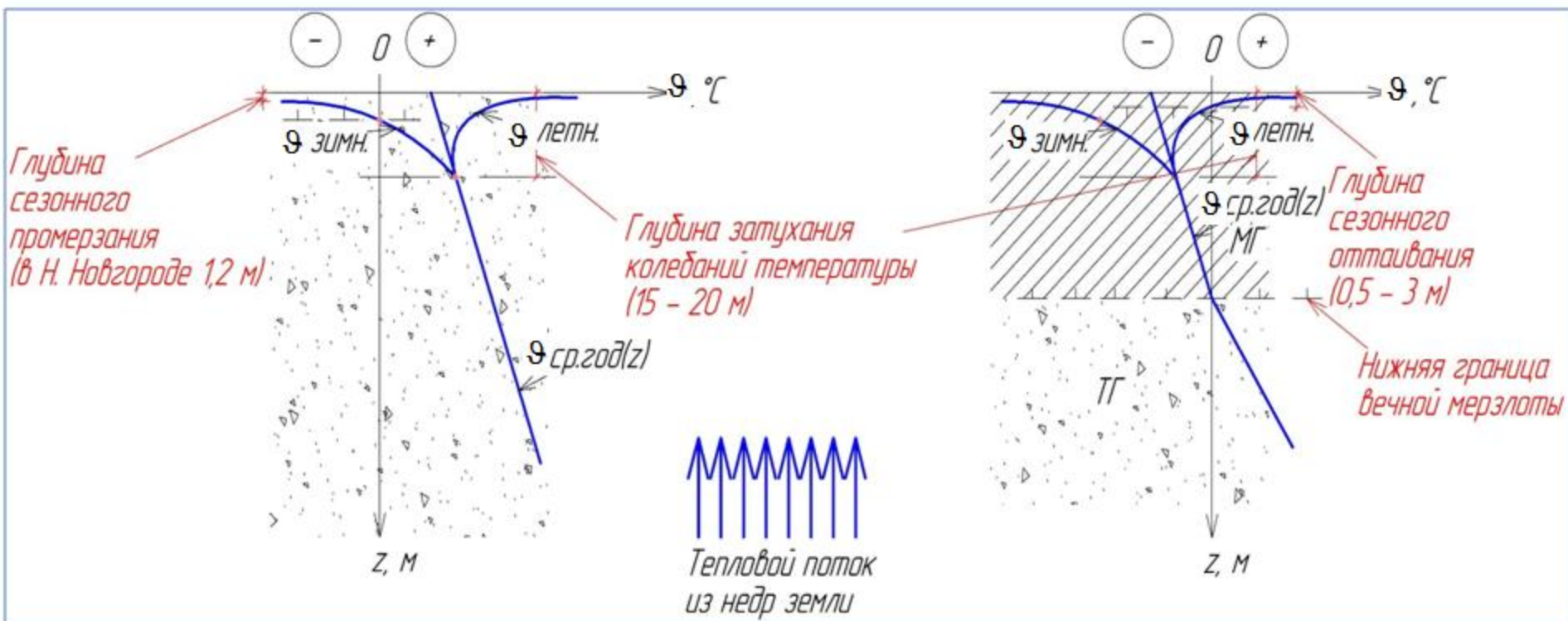
Страна, материк	Площадь распространения вечномерзлых грунтов	
	млн. км <sup>2</sup>	% от всей территории
Российская Федерация	10,5	64
Канада	5,7	52
США (Аляска)	1,5	79
Гренландия	1,6	70
Антарктида	13,5	100



# Характер температурного поля недр Земли (температурный режим грунта)

Средние широты

Районы вечной мерзлоты

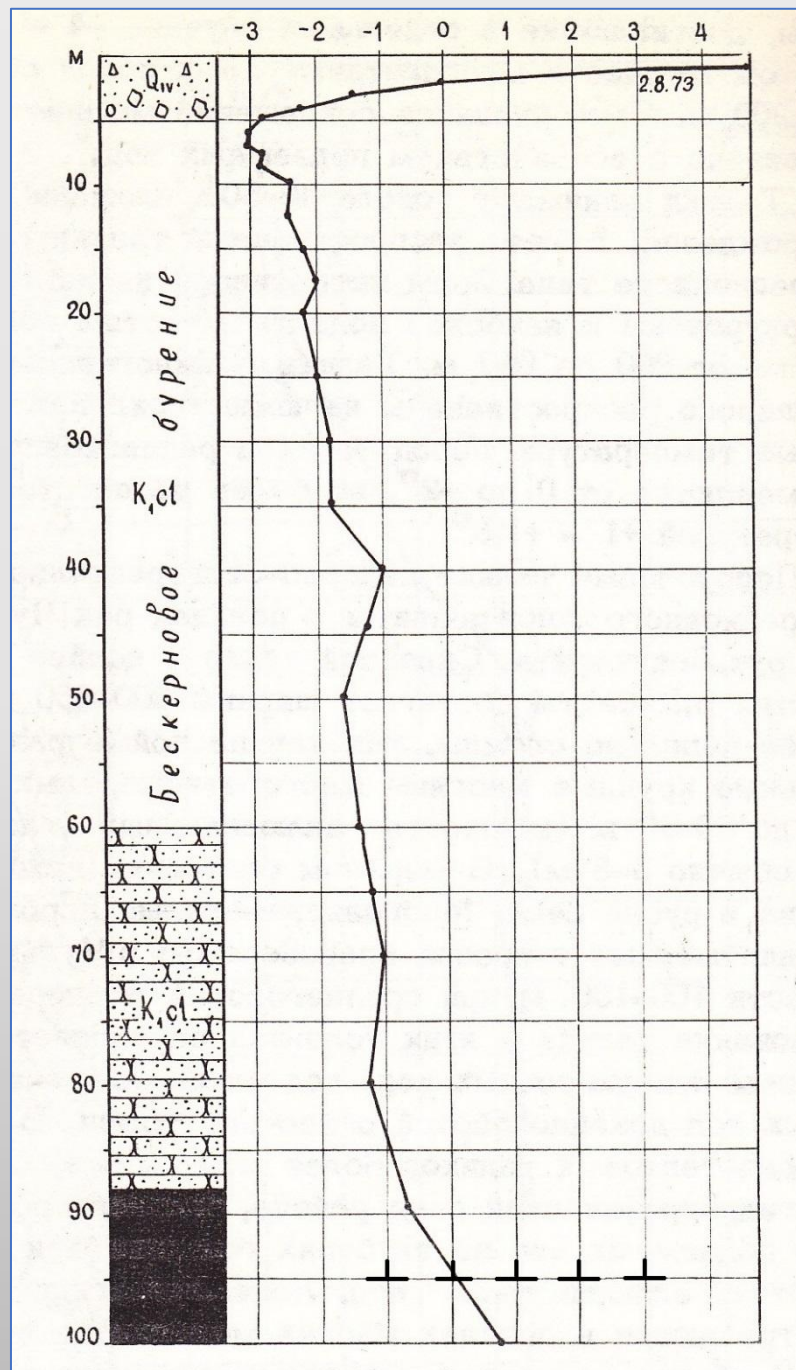


$\vartheta, ^\circ\text{C}$  – температура;

$\text{grad } \vartheta = \frac{\Delta \vartheta}{\Delta z}, \frac{\text{град}}{\text{м}}$  – градиент температуры (геотермический градиент);

G, м/град – геотермическая ступень.

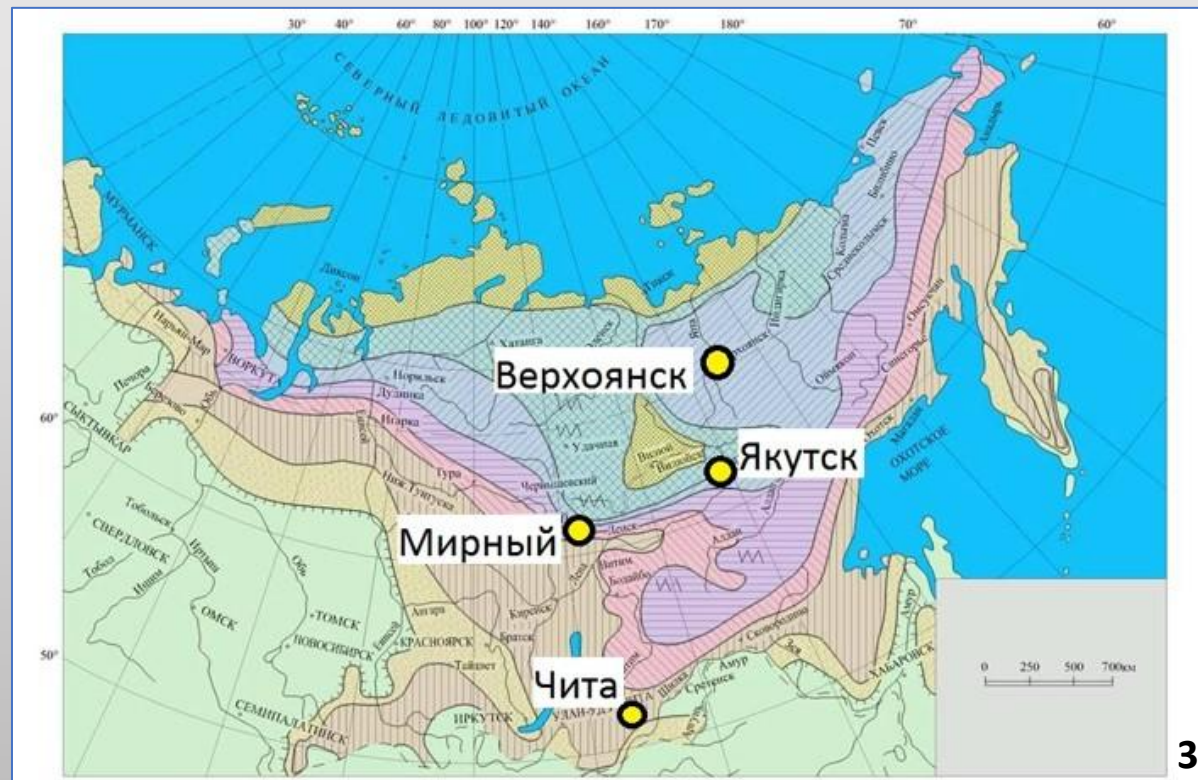
Температурное поле недр Земли по измерению температуры в скважине на Чульманском плато в Южной Якутии 02.08.1973 г. Мощность вечной мерзлоты 95 м [Общее мерзлотоведение, 1978]



## Примеры температурного режима грунта в криолитозоне

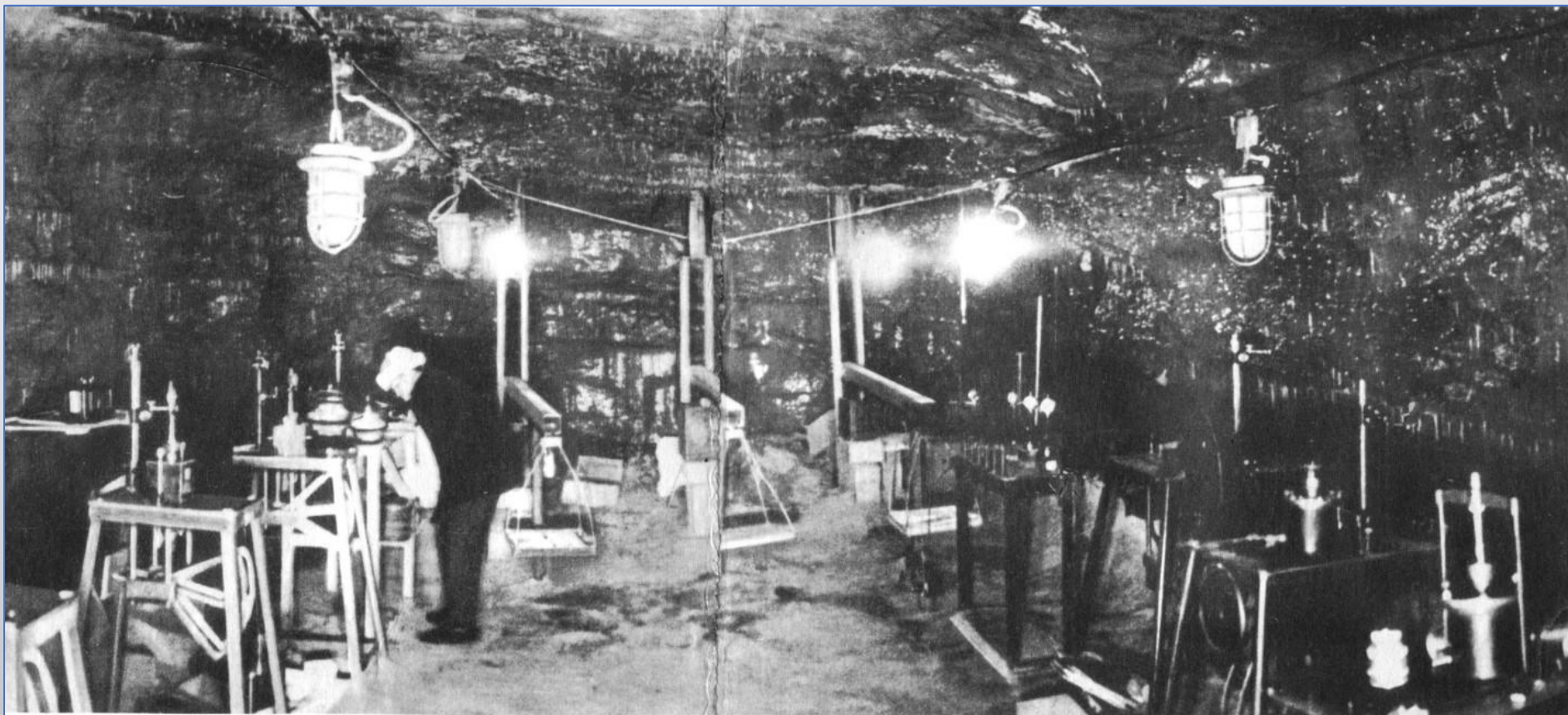
Пункт	Среднегодовая температура воздуха, °С	Мощность вечной мерзлоты, м	Глубина деятельного слоя, м	Температура на глубине годовых колебаний, °С	Геотермическая ступень, м/град
Якутск	-8,6	230	1,9	-7	33
Верхоянск	-9	180	1,6	-7	26
Мирный	-8,2	300	1,8	-6	50
Чита	+1,3	8-20	3,8	0	-

Тепловой поток из недр Земли в криолитозоне имеет средние значения  $0,030 - 0,070 \text{ Вт/м}^2$ . Его региональные изменения связаны с особенностями строения земной коры.



В области вечной мерзлоты различают грунты:

- ВЕЧНОМЕРЗЛЫЕ – находятся в мерзлом состоянии века;
- МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫЕ – находятся в мерзлом состоянии десятилетия;
- СЕЗОННОМЕРЗЛЫЕ – находятся в мерзлом состоянии в зимние сезоны;
- ТАЛЫЕ – находятся в талом состоянии постоянно или сезонно (сезонноталые).



Зал подземной лаборатории Института мерзлотоведения Сибирского отделения РАН в г. Игарка Красноярского края. Зал вырублен на глубине 14 м в вечной мерзлоте. 1972 г.

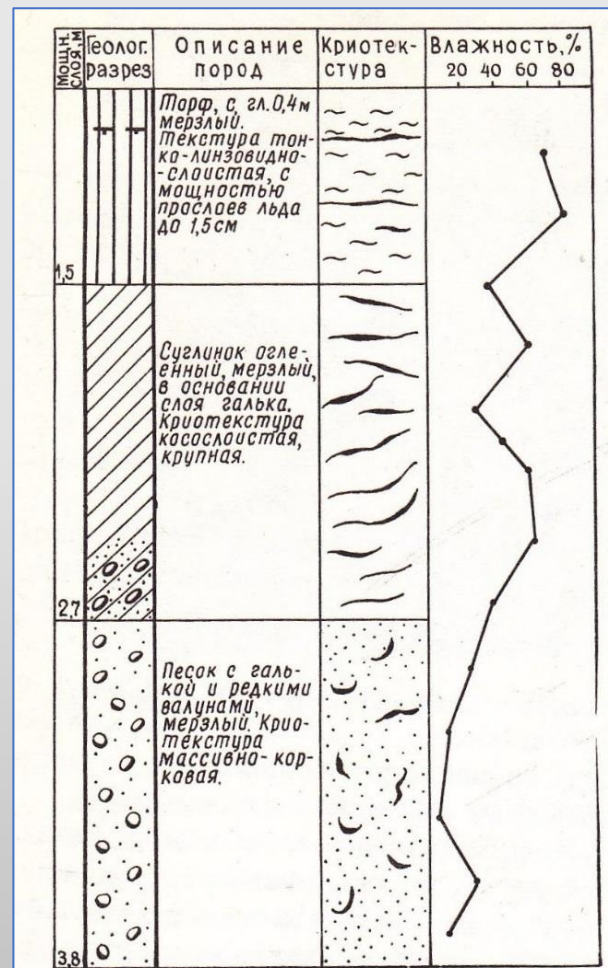


Мерзлый грунт представляет собой конгломерат льда и грунтовых частиц. Лед в дисперсном мерзлом грунте присутствует в различных видах.

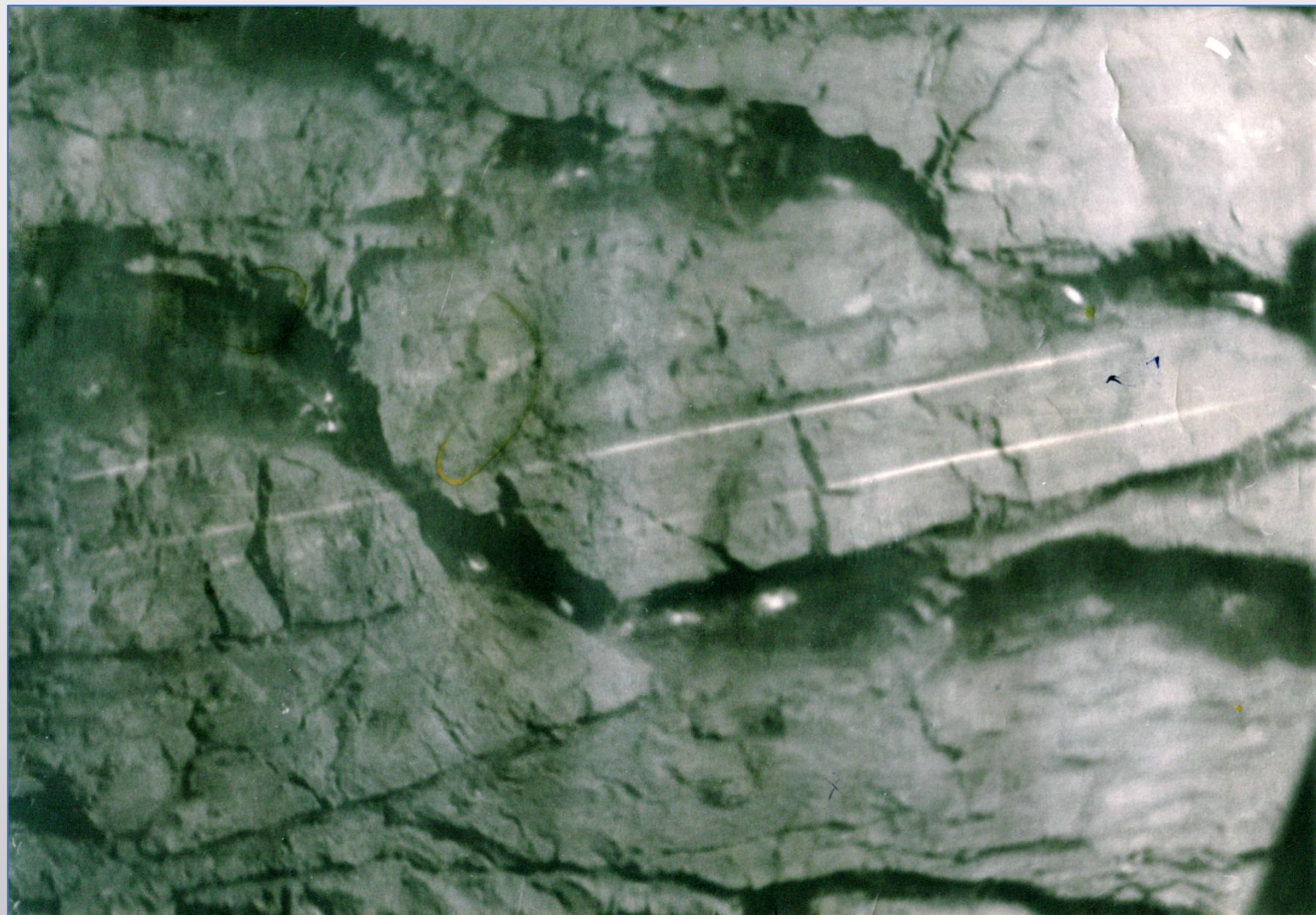
1. Лед в порах между зернами скелета, в виде прослоев, линз, других мелких включений.



Песчаный мерзлый берег р. Лены выше г. Олекминска у пос. Кыллах. 2010 г.



Криогенное строение и суммарная влажность (льдиность) аллювиальных отложений первой надпойменной террасы р.Тимптона



Вечномерзлый грунт с прослоями льда. Вид стены зала подземной лаборатории в г. Игарка на глубине 14 м от поверхности. 1972 г.

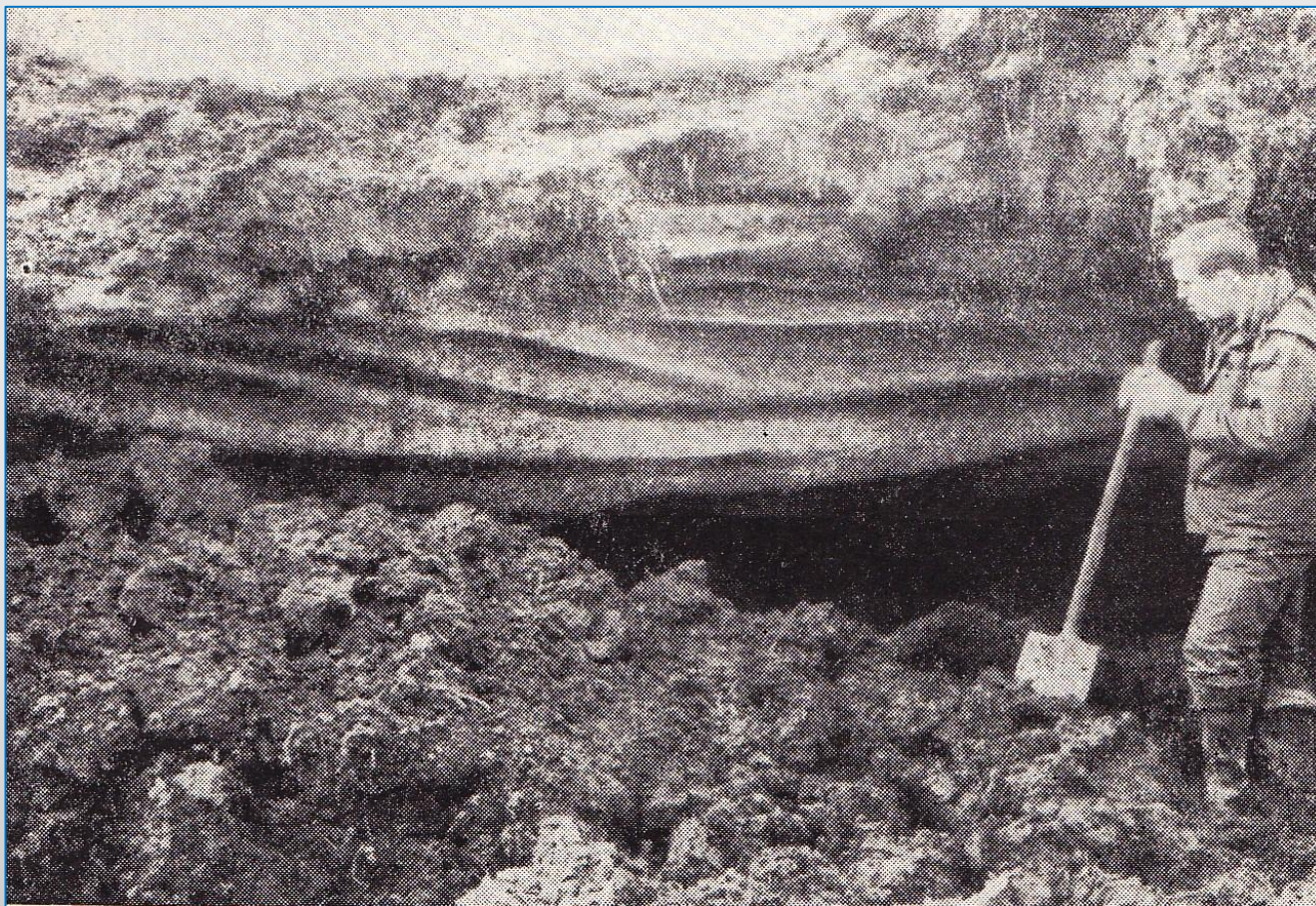
## 2. Крупные включения льда.

а) погребенные льды – лед на дне реки прикрытый аллювием.



Переотложение горных пород при вытаивании погребенных льдов на участке долины р. Эден в Восточном Саяне [Алексеев, 2010]

б) линзовидные льды – на границе талого и мерзлого грунта.



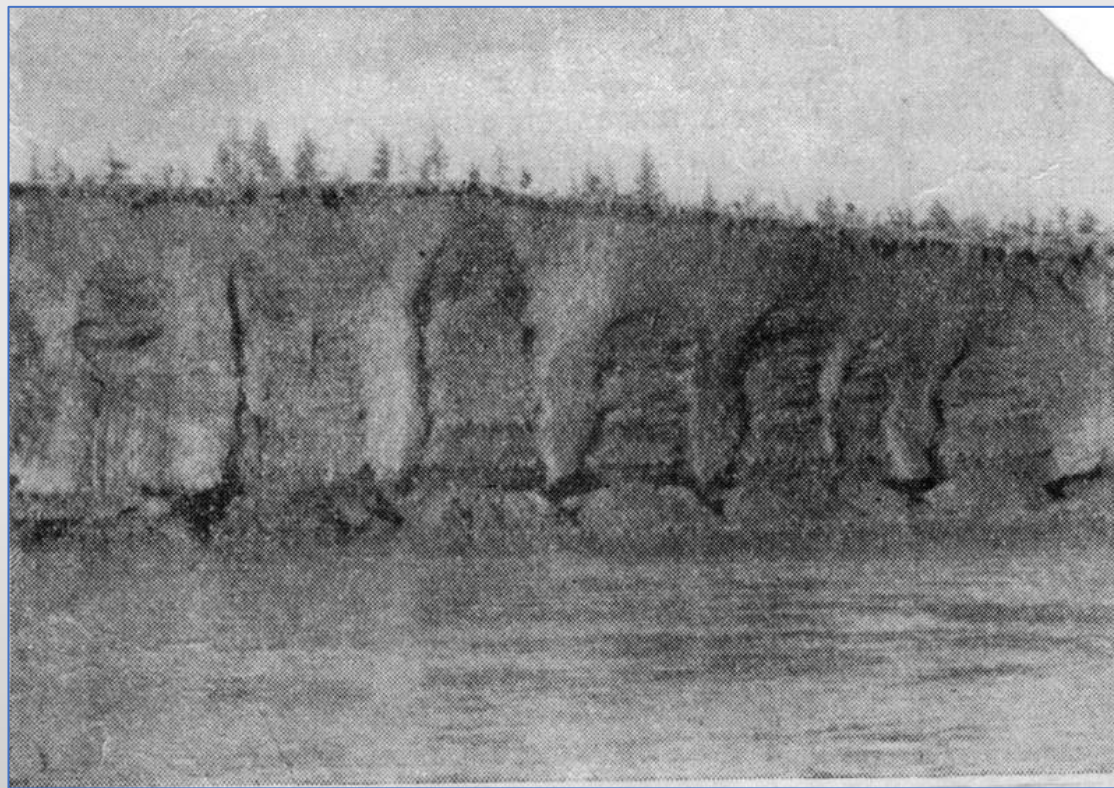
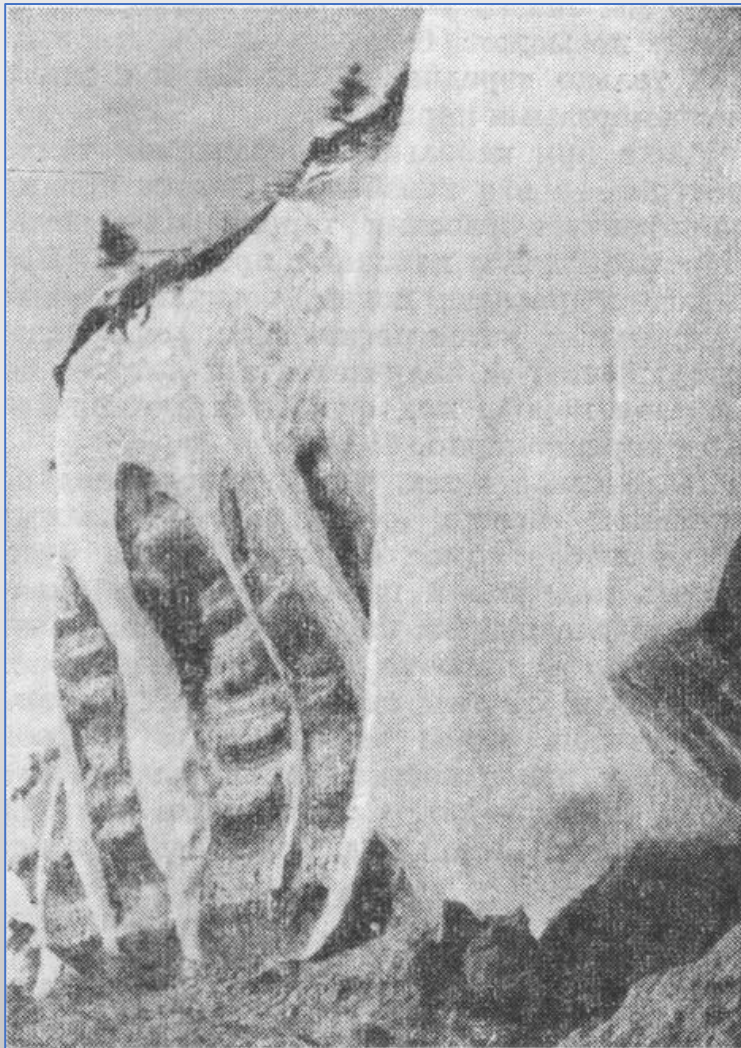
Криогенное строение делювиальной супеси. Видно сочетание «поясков» льда и грунта, фиксирующих бывшее положение подошвы сезонноталого слоя [Общее мерзлотоведение, 1978]

в) клиновидные льды – распространены в поймах рек.



Ледяная клиновидная жила в вечномёрзлом грунте на террасе р. Нерючи в Якутии [Алексеев, 2011]

Клиновидные льды в берегах р. Яны. Высота обрывов около 40 м



Клиновидные льды на севере Якутии. Правильные квадраты (полигоны) образовались в результате растрескивания почвы

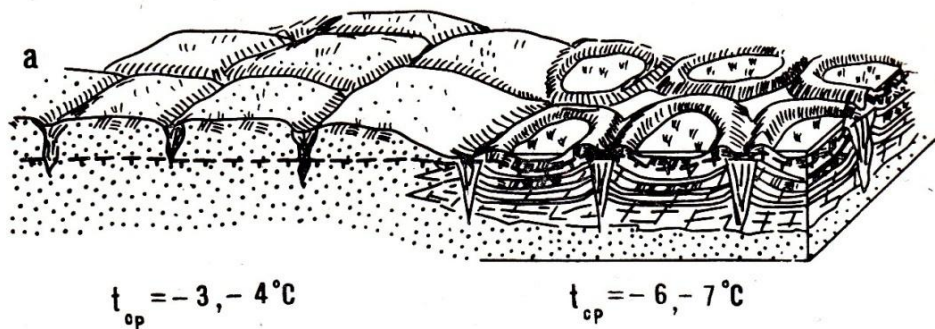
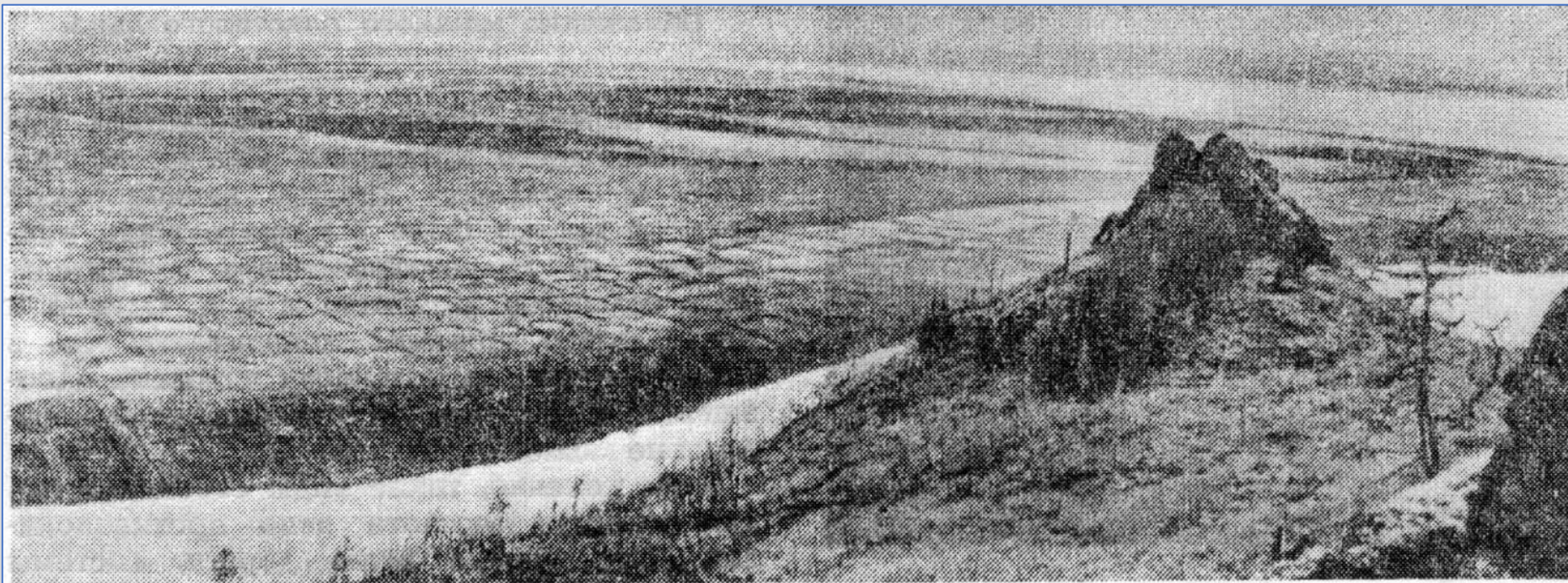
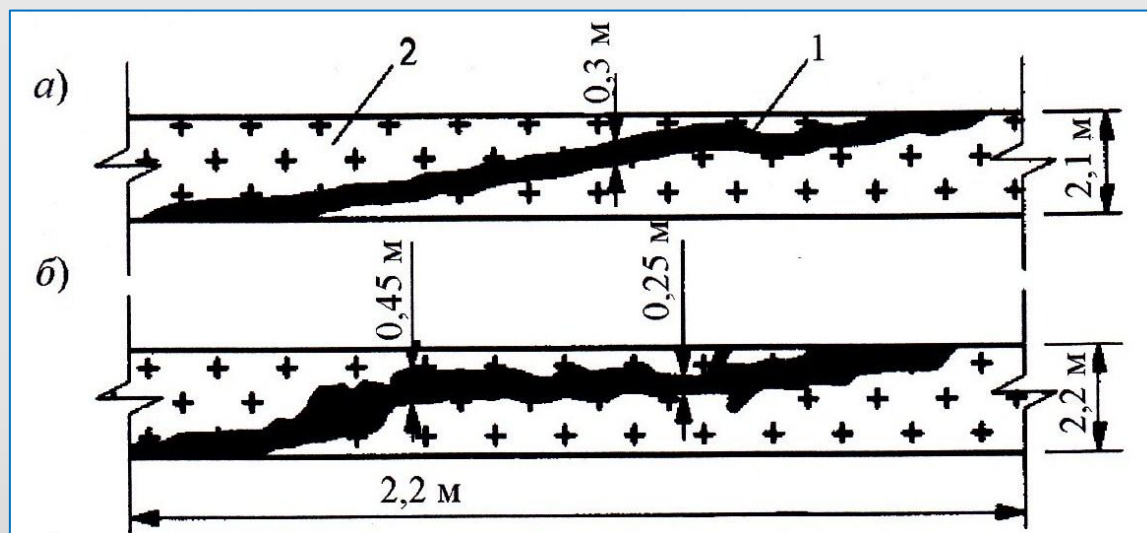


Схема ледяных жил в песчаных аллювиальных отложениях при глубоком сезонном оттаивании и в заторфованных пойменных супесях при мелком оттаивании [Общее мерзлотоведение, 1978]

**Лед в скальном грунте** сосредоточен в трещинах и полостях. Его объемное количество изменяется от 1 – 2 % в неветрелых слаботрециноватых гранитах и базальтах до 10 % в песчаниках, аргиллитах, известняках [Федосеев, 2009]



Зарисовка жилы льда мощностью 20 – 40 см, встреченной в горной выработке на глубине 25 – 30 м в гранитах правого берега р. Хениканджи (верховья р. Колымы):  
а, б – разрезы по стенке штольни; 1 – лед; 2 – гранит



# Температурное состояние долин северных рек

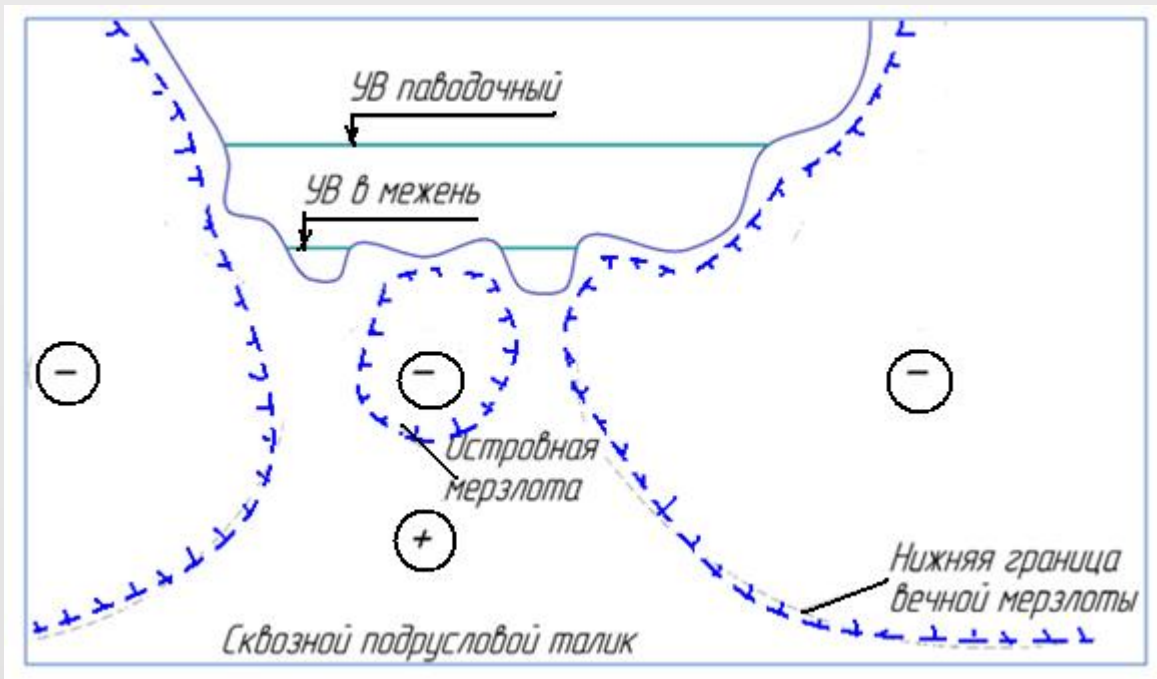


В силу тепляющего воздействия воды на горные породы под руслами рек в области вечной мерзлоты существуют **подрусловые талики**:

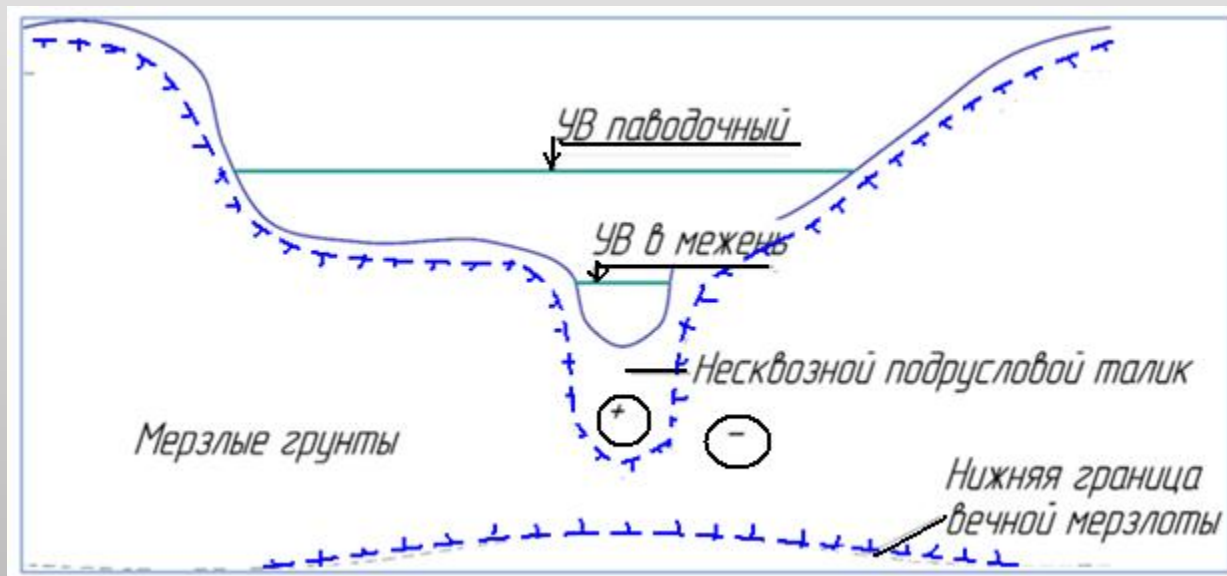
- 1) Сквозные талики – под руслами крупных рек, когда ширина реки сопоставима с мощностью мерзлой толщи.
- 2) Несквозные (замкнутые) талики – под руслами малых рек.

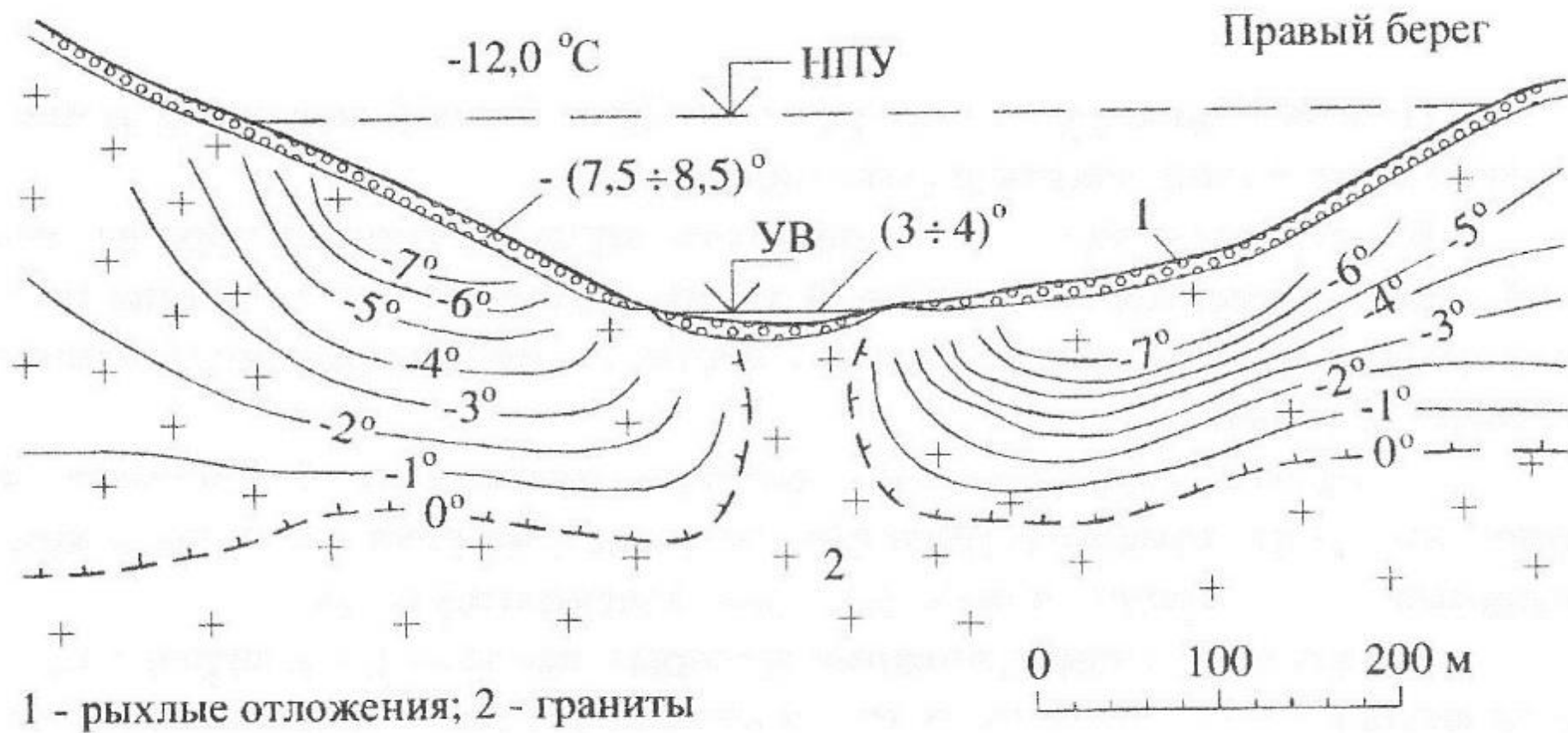
Когда донные отложения представлены хорошо фильтрующими песчаными и гравийно-галечниковыми грунтами, в них образуется поток воды, несущий с собой большое количество тепла. Даже при промерзании реки зимой на всю глубину талик продолжает функционировать.

# Температурное состояние долины крупной реки в криолитозоне

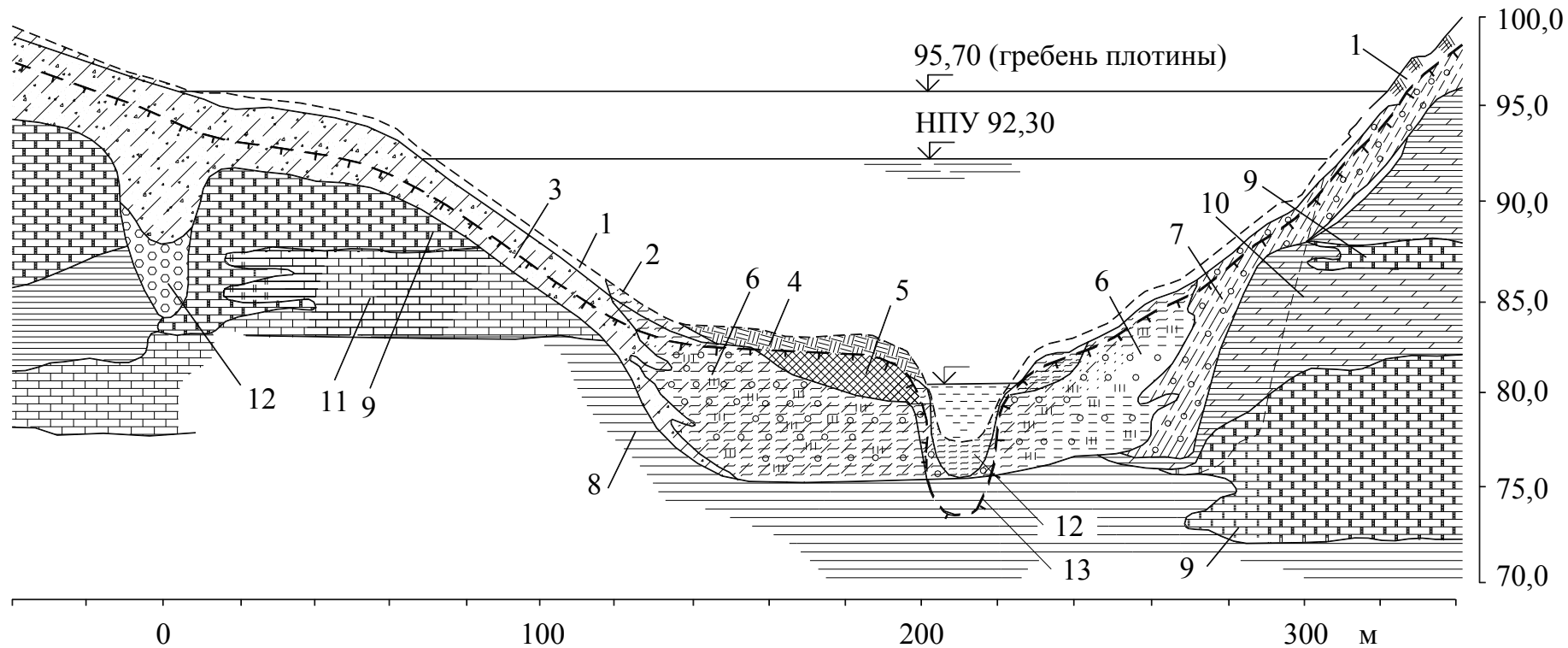


# Температурное состояние долины малой реки в криолитозоне





Геотермический разрез долины р. Колымы в створе Колымской ГЭС



- 1 - почвенно-растительный слой
- 2 - естественная поверхность земли
- 3 - граница сезонного оттаивания
- 4 - торф
- 5 - илы
- 6 - суглинки иловатые, льдистость 60%
- 7 - суглинки с дресвой и щебнем, льдистость 20-60%

- 8 - глины плотные (коренные породы)
- 9 - доломиты трещиноватые
- 10 - мергели трещиноватые
- 11 - известняки тонкоплитчатые
- 12 - старое русло реки, заполненное галечниками и гравием
- 13 - граница подруслового талика

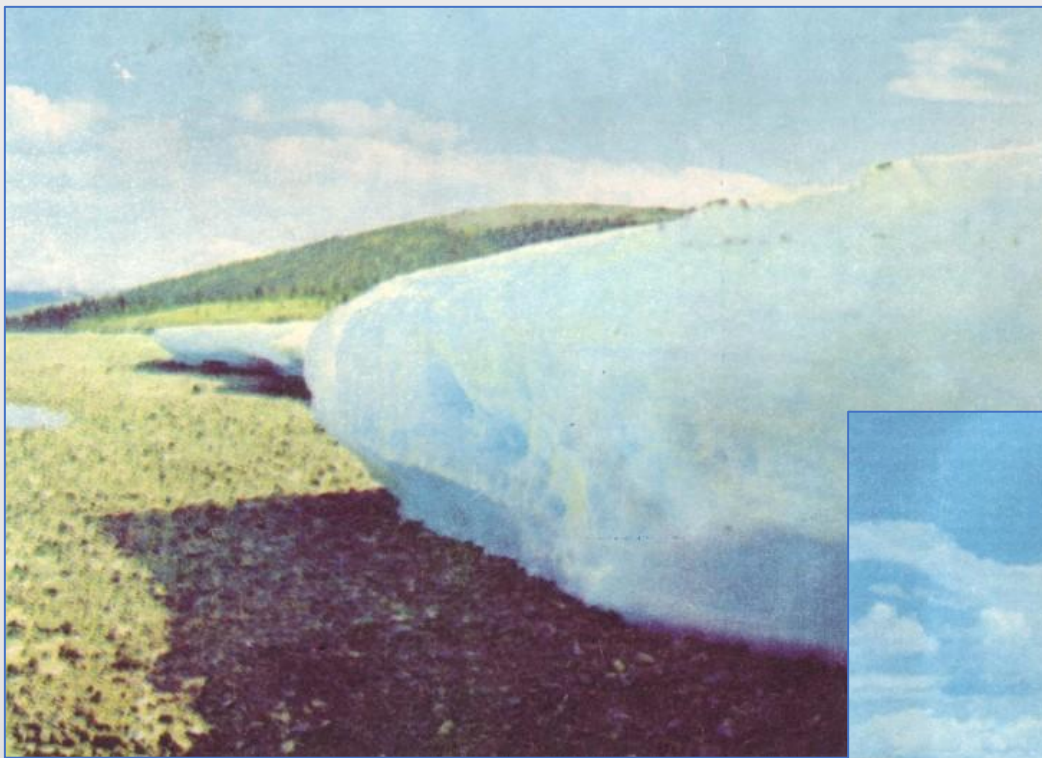
Геологический разрез долины р. Ирелях в створе Иреляхского гидроузла

## Мерзлотные явления в долинах рек

**Наледи.** Возникают в местах выхода на поверхность подземных вод; образуются в долинах рек при промерзании их русел [Алексеев, 2007].



Свежая наледь, заполнившая русло р. Унгры, притока р. Алдана



Долина в южных отрогах хребта Черского (горная система в Якутии и Магаданской обл. от нижнего течения р. Яны до верховьев р. Колымы). Часть долины заполнена огромной наледью. Фото сделаны в августе.



Гибель лиственного леса под воздействием наледей

**Термокарст.** Процесс состоит в вытаивании льда в грунте и оседании поверхности. Вызывается в местах локальных изменений теплообмена льдонасыщенных грунтов с воздухом и водой после пожаров, вырубки леса, прокладки коммуникаций и т. п. [Алексеев, 2007].



Термокарстовое болото поперечником около 300 м среди тайги в бассейне р. Чамбэ – правого притока р. Подкаменной Тунгуски



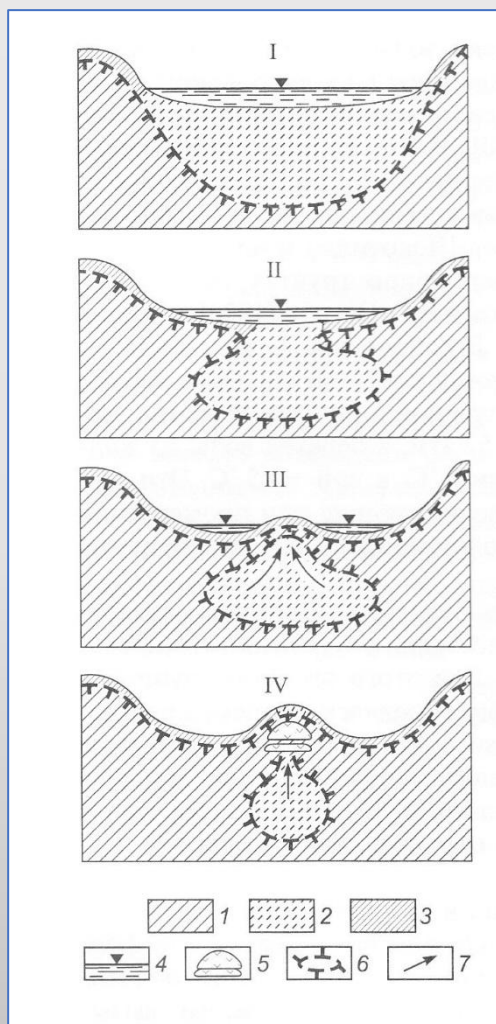


Формирование термокарстового озера на местности с полигональным повторно-жильным льдом. Снимок с вертолета



Эрозионно-термокарстовый провал на участке долины р. Тибельти у автодороги Култук – Монды в Южной Якутии

**Бугры пучения** (они же гидролакколиты, они же пинго, они же булгунняхы). Образуются на промерзающих таликах, от внутреннего давления разрушаются, зачастую взрывом [Алексеев, 2007].



Разрушающийся гидролакколит в бассейне р. Индигирки

Схема образования булгунняхы:

I – несквозной талик под озером; II – промерзание несквозного талика при уменьшении размеров озера; III – образование замкнутого промерзающего талика и начало роста булгунняхы; IV – зрелая стадия роста булгунняхы; 1 – вечномерзлые породы; 2 – талые водонасыщенные породы; 3 – сезонноталый слой; 4 – уровень воды в озере; 5 – инъекционный лед; 6 – граница мерзлых пород; 7 – направление движения воды под действием гидростатического криогенного давления

# Строительство зданий и сооружений в области вечной мерзлоты

«Все не так легко, как кажется»  
(следствие 1 из Закона Мерфи)

Посмотрите на последствия очередного урагана в США или Японии – по ветру летят стены, по капитальности сходные со стенами курятника. Причем, после улета такого особняка не остается печки и дымовой трубы. Как вы думаете, почему?

В домах россиян стены толстые. Со стороны кажется, что копка траншей – наша национальная забава, но это неизбежно, т. к. коммуникации и основания фундаментов должны лежать не мельче глубины промерзания грунта, чтобы не выперло на поверхность. Одноэтажный кирпичный дом в средней полосе России весит как английский трехэтажный.

В России нет предприятия или поселка без котельной – в отличие от почти всего остального мира [Паршев, 2003].



Фундамент и стены дома в условиях средней полосы России

В криолитозоне инженерные конструкции, возведенные без учета криогенных явлений (наледообразования, пучения грунтов, их осадки при вытаивании льдов) неизбежно деформируются или разрушаются [Алексеев, 2011].



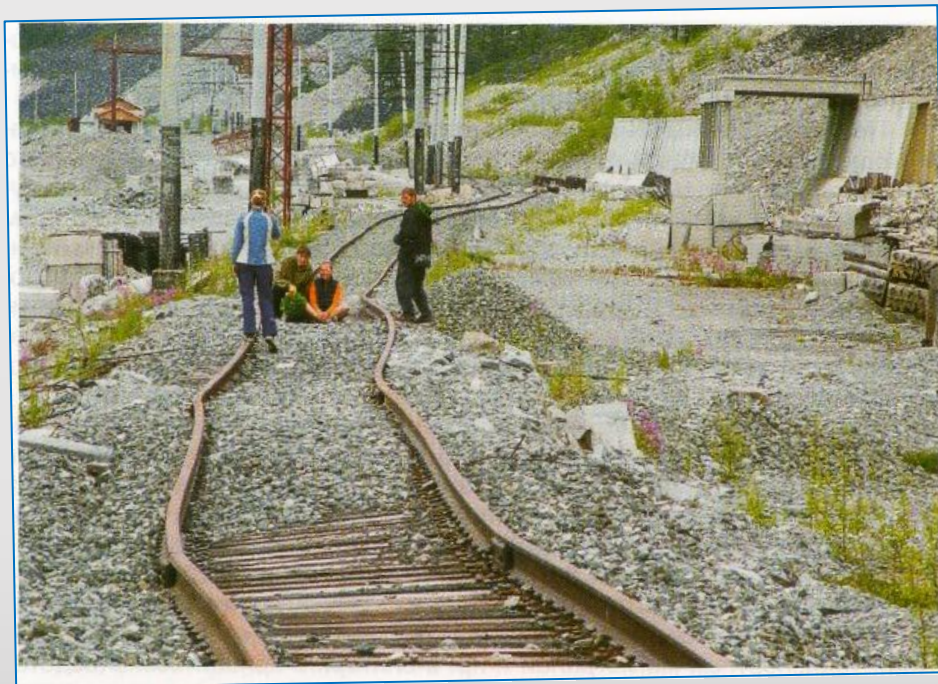
Наледь на автозимнике в Каларском районе Забайкальского края, испортившая дорогу



«Пьяные» столбы в пос. Батагай в Якутии. Явление обусловлено морозным пучением грунтов



Транспортный коллапс на федеральной трассе Невер-Якутск, вызванный протаиванием грунтов под дорожной насыпью



Криогенная деформация полотна железной дороги Удокан-Чина в Забайкальском крае

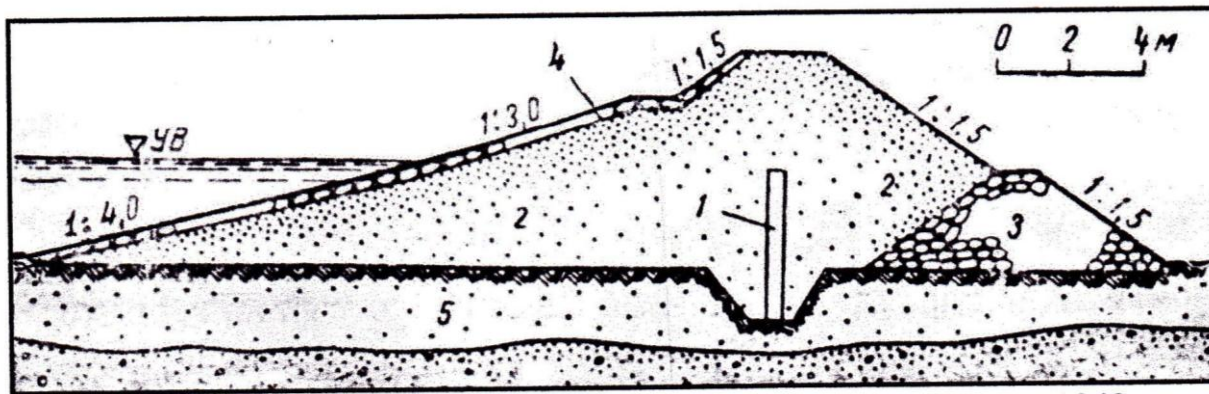


Вытаивание подземного льда на трассе газопровода в центральной Якутии





Прорыв подмерзлотных вод в строения с образованием наледей вследствие протаивания многомерзлотной толщи под зданиями  
[Общее мерзлотоведение, 1978]



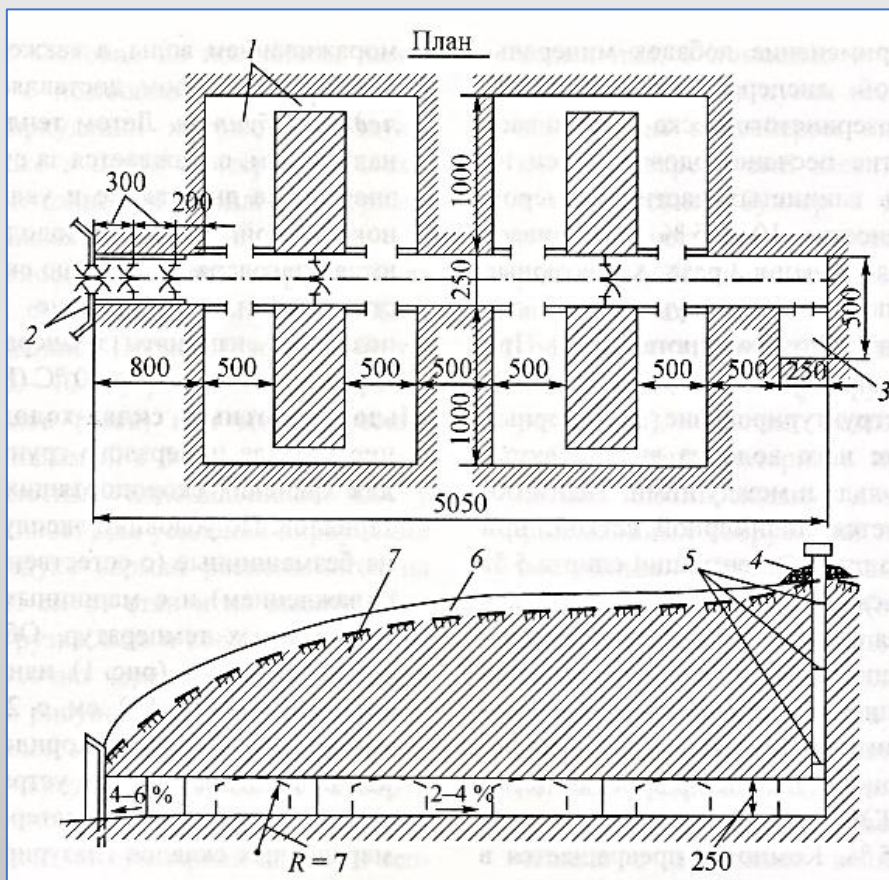
1 – деревянная диафрагма; 2 – призмы из супесчаного грунта; 3 – банкет;  
4 – отмостка; 5 – супесь



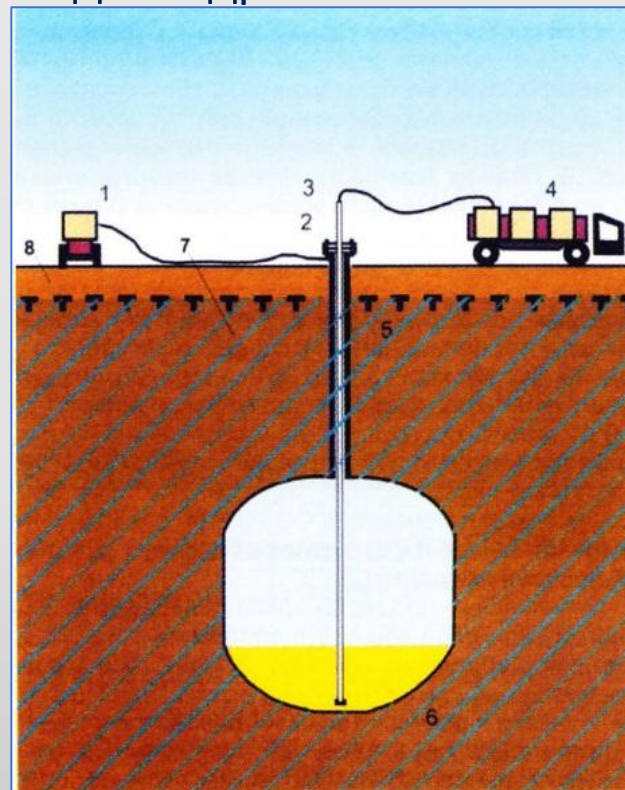
## Разрушение Верхне-Кумахской земляной плотины на р. Кумах в Якутии

Высота плотины 7 м. Построена в 1942 г. по талому варианту. Промерзла за счет естественного холода. Нормально эксплуатировалась. В 1956 г. разрушена вследствие вытаивания жильного льда в береговом примыкании и возникшей фильтрации [Кудояров, 1973] На снимке справа видны две жилы льда в береговом примыкании плотины.

Вечная мерзлота давно используется как своеобразный криогенный ресурс. В толще мерзлых пород сооружают склады для хранения продуктов питания, резервуары для нефтепродуктов, емкости для захоронения химических и радиоактивных отходов и др.



Льдомерзлотный подземный склад-холодильник:  
 1 – камеры; 2 – тамбуры; 3 – вентиляционный стояк;  
 4 – гидроизоляция; 5 – люки; 6 – сезонно-талый грунт;  
 7 – вечномёрзлый грунт



Подземное хранилище дизельного топлива на территории Института мерзлотоведения СО РАН в Якутске:  
 1 – компрессор; 2 – герметичная крышка;  
 3 – топливная труба; 4 – бензовоз; 5 – обсадная труба скважины; 6 – солярка; 7 – мерзлые горные породы; 8 – сезоннопротаивающий слой

В области вечной мерзлоты построены крупные территориально-производственные комплексы и современные города: Норильск, Якутск, Магадан, Мирный, Удачный и др.

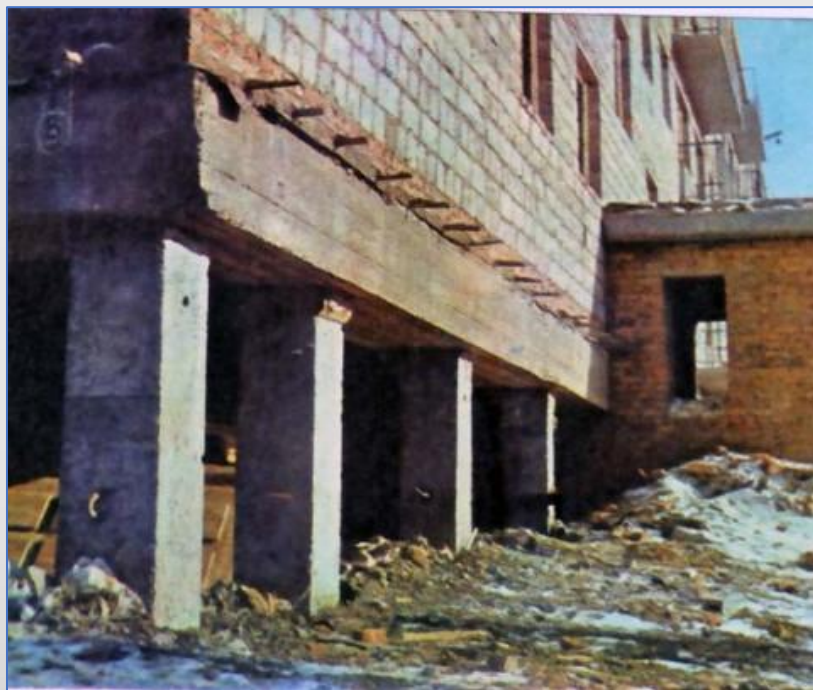


Начало г. Мирного в Якутии. 1955 г.



Город Мирный с 40 –тысячным населением. Центр. 2005 г.

В условиях сплошной вечной мерзлоты городские дома возводят на железобетонных сваях, вмороженных в грунт, с проветриваемыми зимой и закрываемыми летом подпольями.



Город Норильск. Дома на сваях, вмороженных в грунт, с проветриваемыми подпольями.

1973 г.



Город Мирный. Дом на сваях, вмороженных в грунт, с проветриваемым подпольем. 2011 г.



Поселок Айхал (Якутия). Дом на свайном фундаменте с проветриваемым подпольем.  
2011 г.

Суровые климатические условия требуют повышенной тепловой защиты зданий. На их обогрев расходуется в 3 – 3,5 раза больше топлива, чем в зоне умеренного климата. В результате стоимость строительства и эксплуатации зданий в условиях Севера в 3,5 – 5,5 раз выше, чем в центральных районах страны [Когодовский, 1996].

Коммуникации (теплотрассы, водоводы, газопроводы) проводят над землей в специальных коробах, или устраивают на сваях, вмороженных в грунт, теплоизолируют.



Теплотрасса в г. Тында Амурской области



Теплотрасса в г. Нерюнгри (Южная Якутия)





Теплотрасса в промышленной зоне г. Воркуты



Пульпопровод от обогатительной фабрики №3 Мирнинского ГОК в Якутии к хвостохранилищу, покрытый экспериментальной тонкослойной полимерной теплоизоляцией. 2005 г.

## Магистральный водовод р. Лена – р. Татта в Якутии

Плавучая насосная станция на р. Лена с водоподачей  $4 \times 1600 \text{ м}^3/\text{час}$  и 4 насосных станции по трассе водовода.

Водовод длиной 159,5 км диаметром 1220/1020 мм.

Снабжает водой 45 поселков с численностью населения 69,7 тыс. человек.

Эксплуатируется с 1994 г.

[Сальва, 2016]



Четыре трубопровода от насосной станции  
входят в один основной водовод

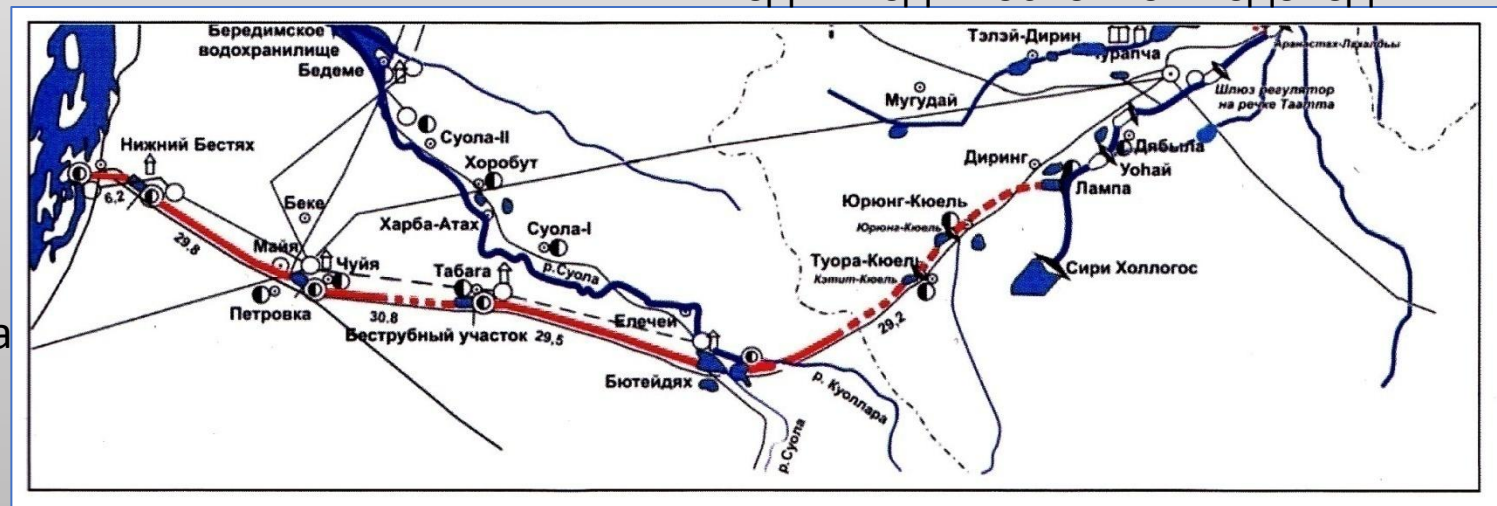
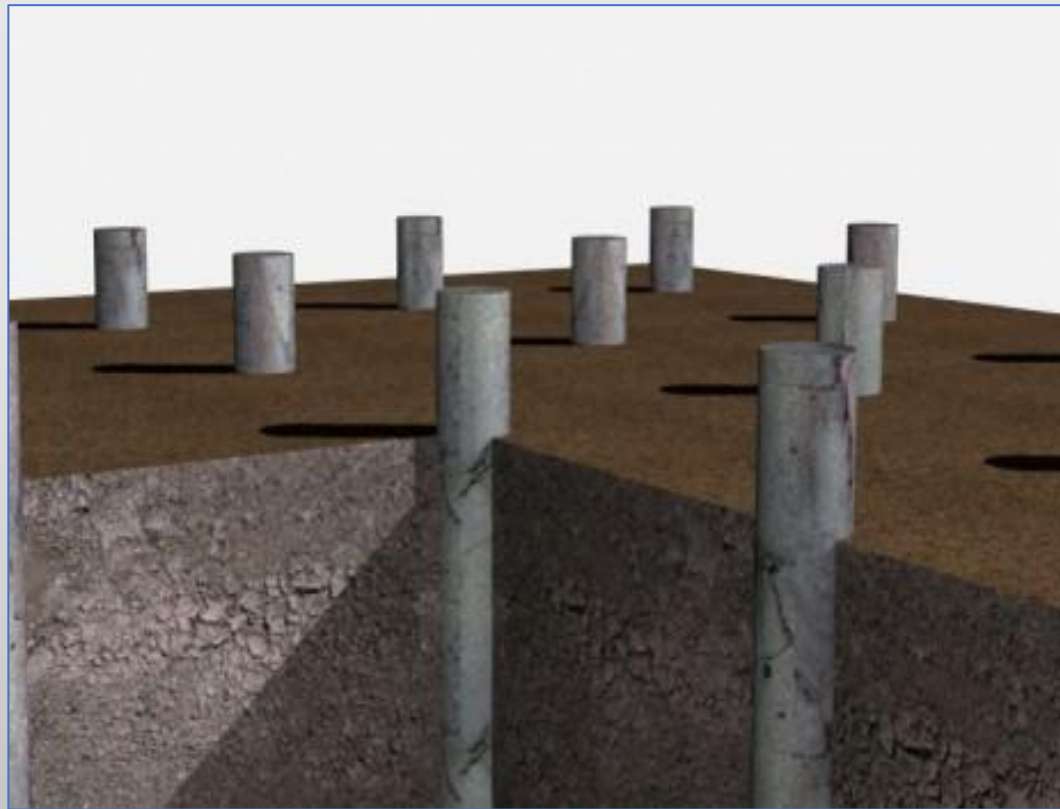


Схема  
магистрального  
водовода  
р. Лена – р. Татта  
в Якутии

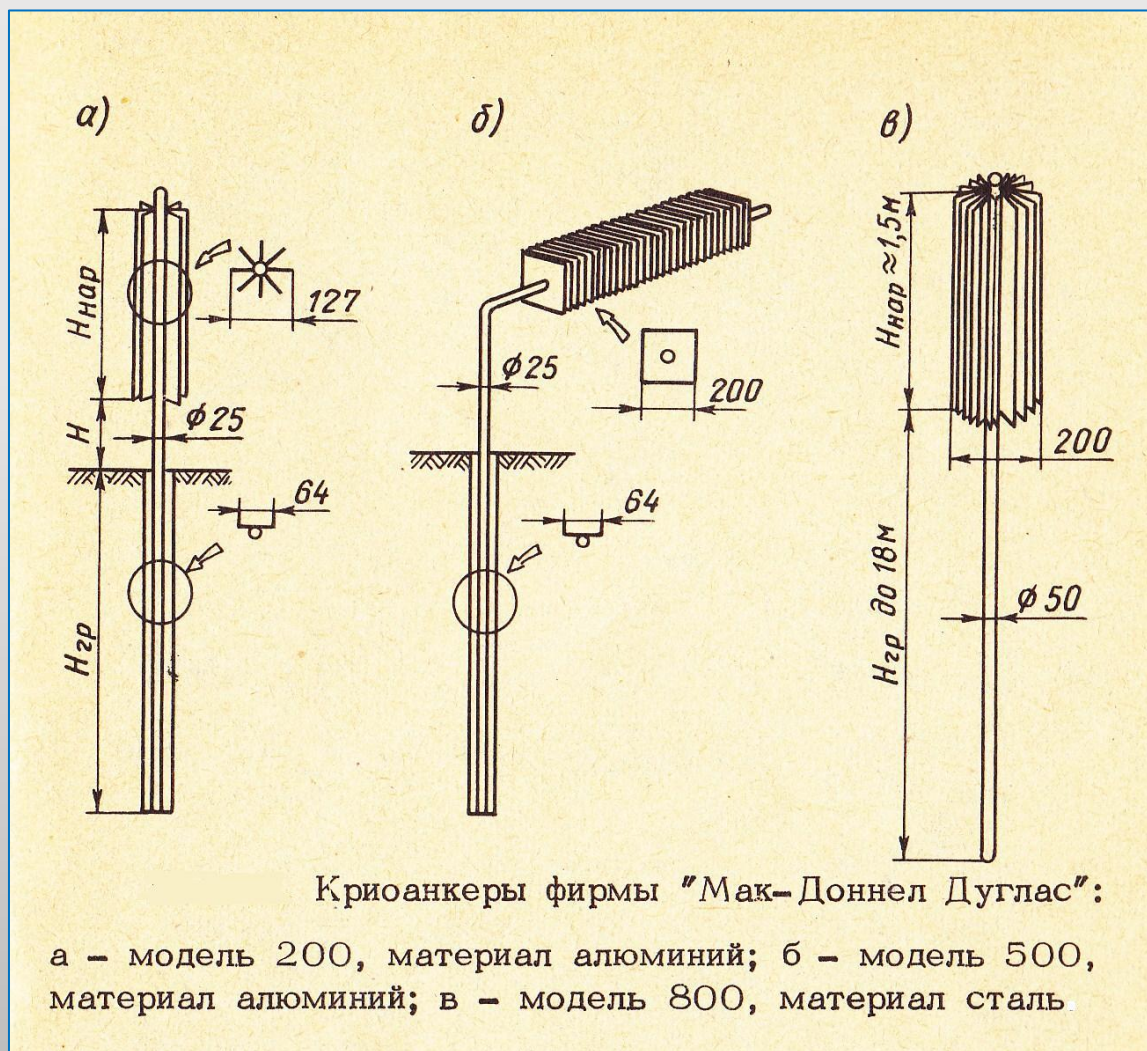
Свайные фундаменты, вмороженные в грунт, устраивают следующим образом: сваи погружают буроопускным способом в скважины диаметром на 10 см большим поперечного сечения сваи с заполнением пазух водопесчаным раствором; опирание свай на прослой торфа не допускается; вмерзание свай в грунт происходит под действием естественного холода.

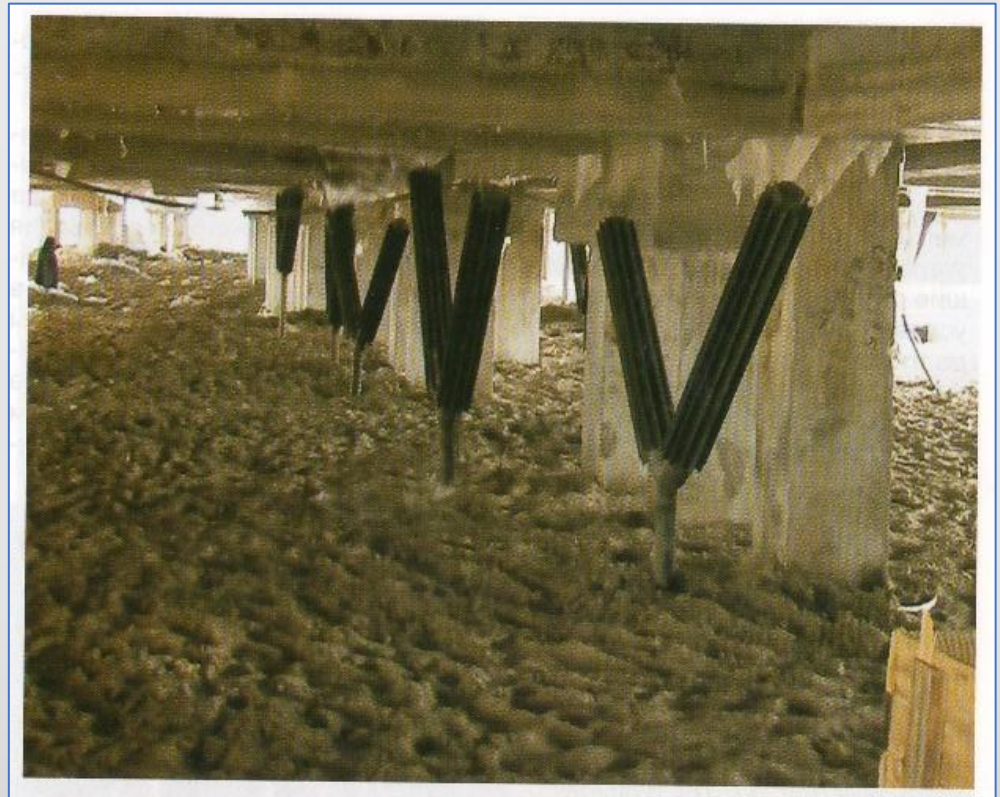
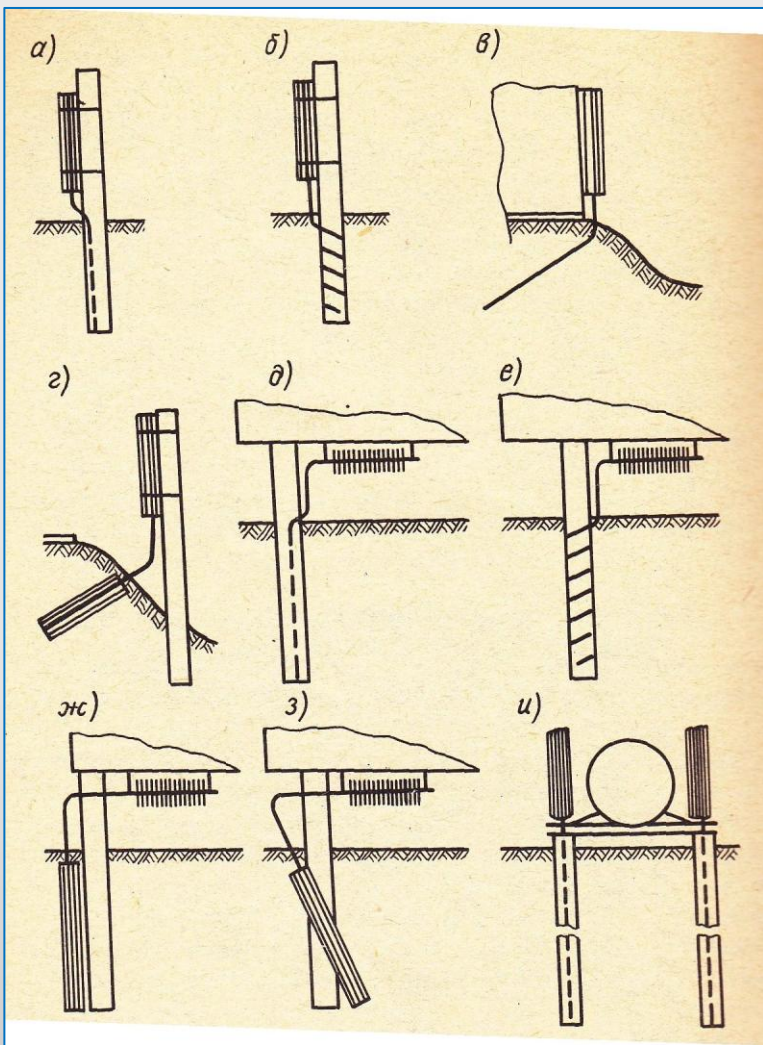


Модель свайного фундамента

Значительную сложность представляет сохранение мерзлого состояния грунтов основания в период эксплуатации зданий и сооружений.

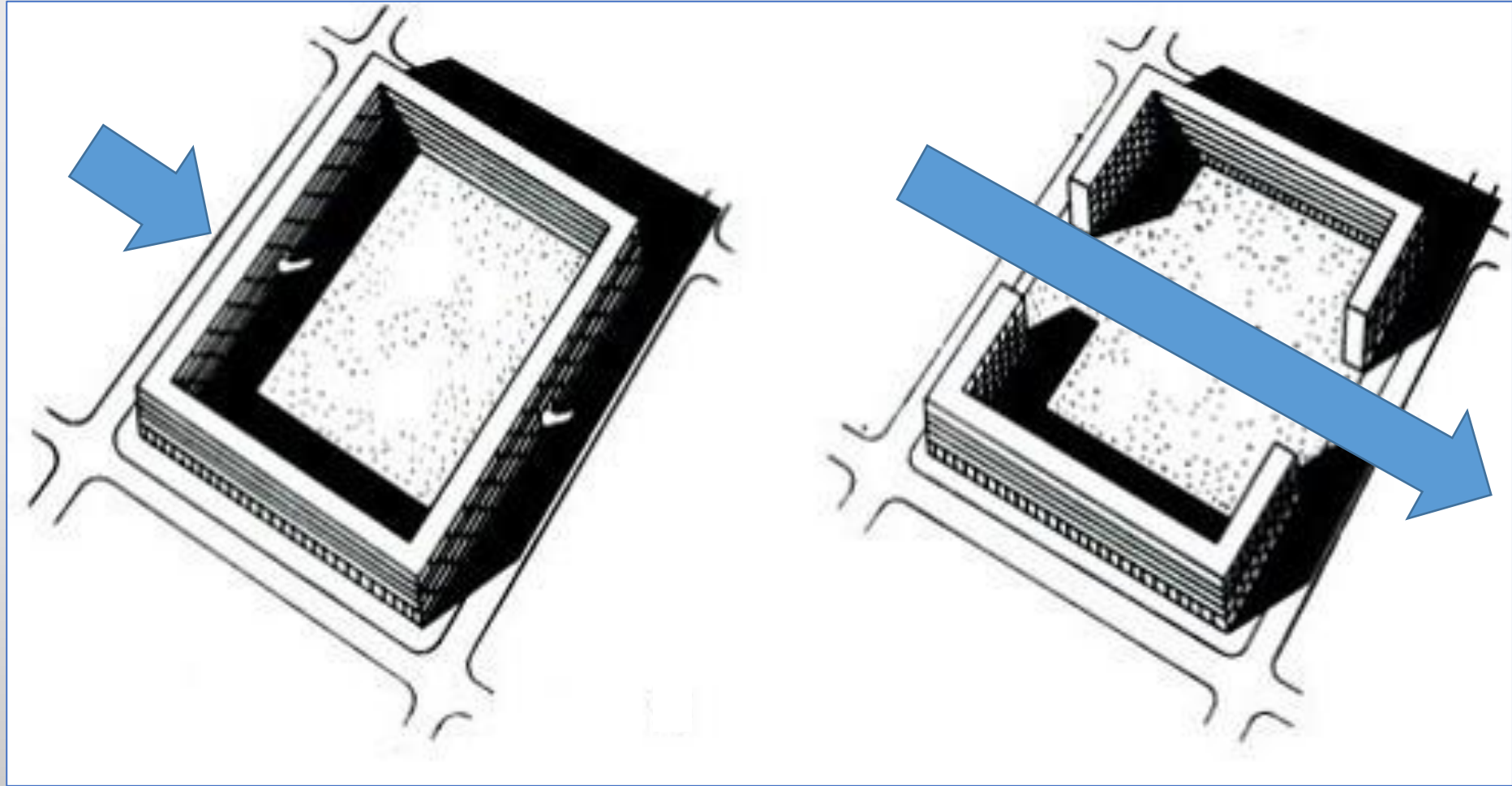
Для укрепления грунта вокруг свай в мерзлом состоянии применяют сезоннодействующие парожидкостные охлаждающие устройства (криоанкеры, термостабилизаторы) [Бучко, 1978].





Криоанкеры, укрепляющие мерзлое основание свайного фундамента

Схемы установки криоанкеров  
 а, б – криоанкеры из гибких труб у свайных опор; в – то же, под фундаментом здания; г – криоанкер с развитой поверхностью грунтового теплообменника; д, е, ж, з – криоанкеры с горизонтальными воздушными теплообменниками, установленными в подпольях зданий; и – криоанкеры в опорах трубопровода.



Улучшение зимней продуваемости подполий в квартале жилых домов  
посредством разрывов в застройке

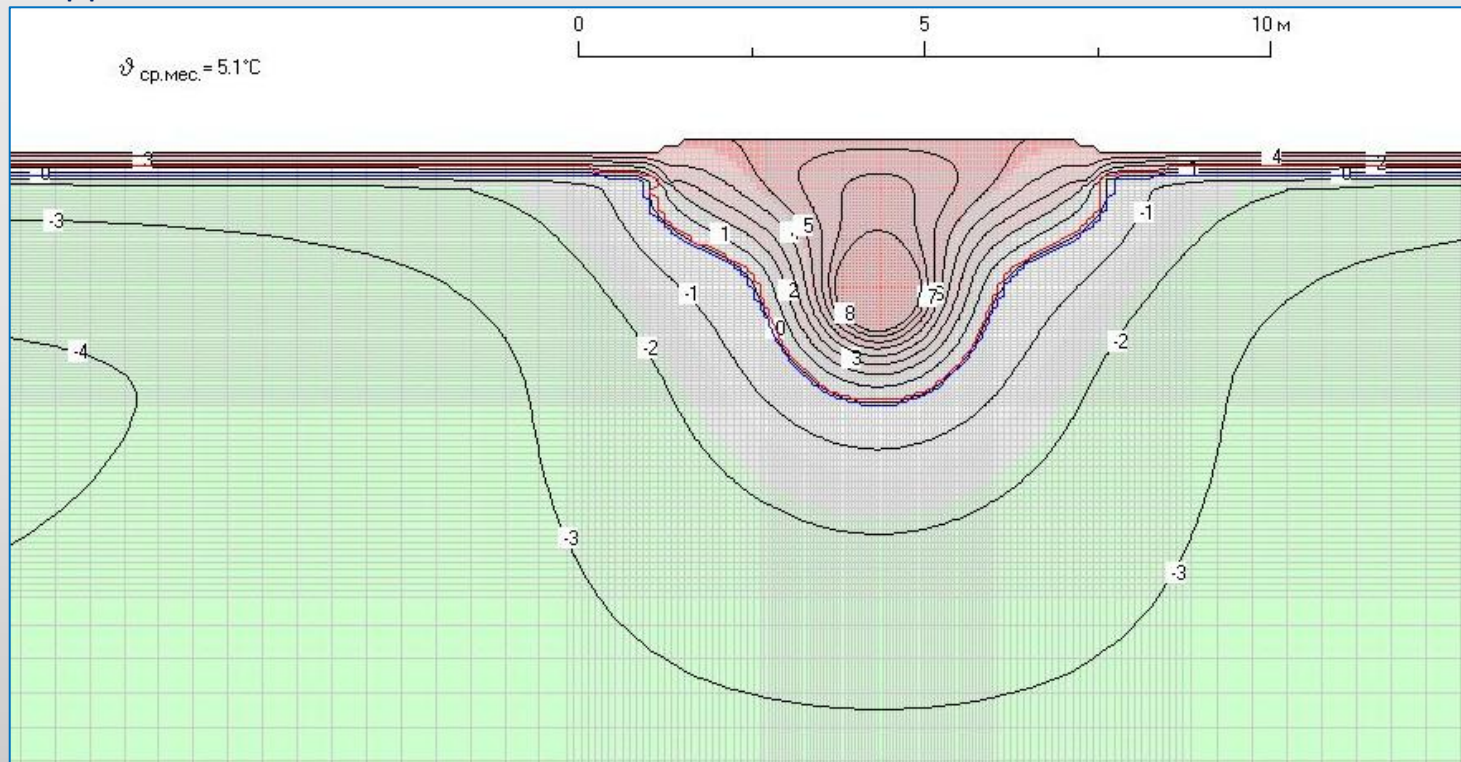
Нефтепроводы закладывают в траншеи, пригружая от всплытия.



Нефтепровод Харьяга-Возей в Республике Коми: проходит через тундровые болота, по вечной мерзлоте

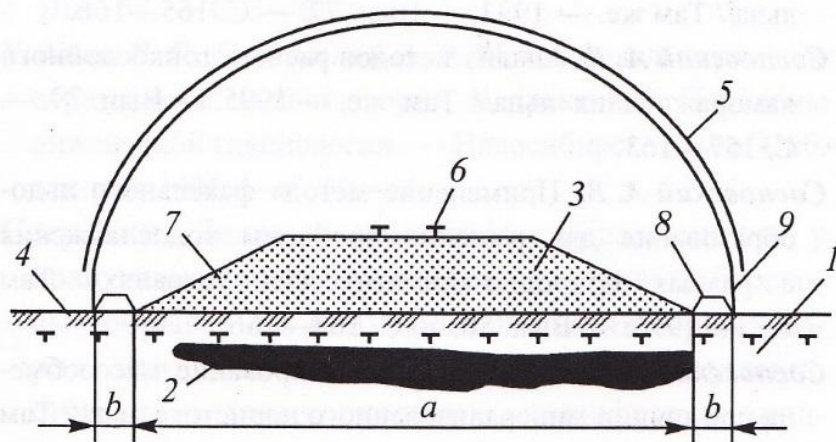


Во вмещающем нефтепровод мерзлом грунтовом массиве образуется ореол оттаивания, в пределах которого происходит тепловая осадка трубы, могущая стать причиной аварий. Это требует мероприятий по стабилизации температурного режима грунта вокруг нефтепровода: установки вдоль трубы с обеих сторон колонок сезоннодействующих парожидкостных охлаждающих устройств (СОУ); теплоизоляции трубопровода.



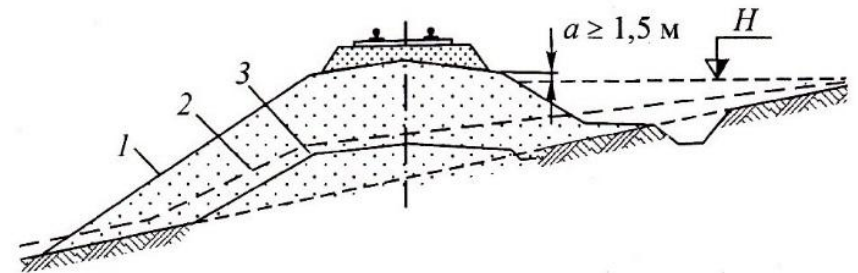
Участок Тайшет – Сковородино (2694 км) нефтепровода «Восточная Сибирь – Тихий океан»: введен в эксплуатацию в 2009 г.; 750 км проложено в вечномёрзлых грунтах; показано прогнозируемое температурное поле вокруг нефтепровода на ПК 20569+17 в сентябре 2038 г.; тепловая осадка трубы в различных грунтах составляет от 0,07 до 1,0 м [Горохов, 2011]

Автодороги и железные дороги устраивают на подсыпках, предотвращая оттаивание основания и его проседание, защищают от наледей [Алексеев, 2007].



**Принципиальная схема устройства железнодорожной насыпи:**

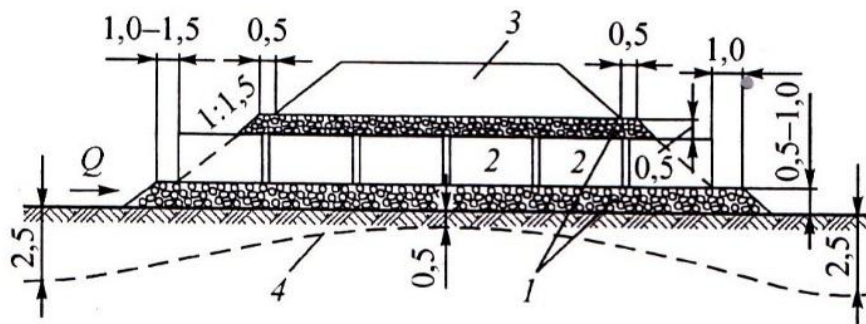
1 — основание из сильнольдистых грунтов; 2 — линза подземного льда; 3 — насыпь; 4 — почвенно-растительный покров; 5 — навес; 6 — рельсы; 7 — откос насыпи; 8 — водозащитный валик; 9 — продух;  $a$  — ширина насыпи;  $b$  — ширина водозащитного валика



**Схема поднятия земляного полотна дороги для защиты от наледи:**

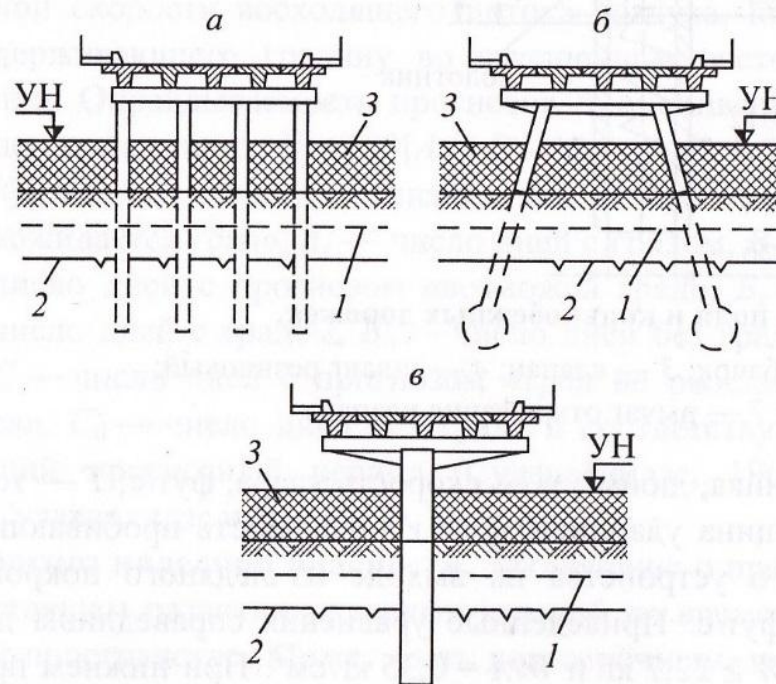
1 — очертание насыпи после реконструкции; 2 — верхняя граница наледи до реконструкции; 3 — полотно дороги до реконструкции;  $a$  — увеличение мощности наледного льда после поднятия насыпи;  $H$  — максимальный уровень наледи

В конструкциях водопропускных труб под дорогами и мостов учитывают наличие вечной мерзлоты и возможности образования наледей [Алексеев, 2007].



**Фильтрующая насыпь, совмещенная с водопропускной трубой:**

1 — фильтрующая насыпь; 2 — сборные длиномерные звенья бетонной трубы; 3 — земляное полотно дороги; 4 — граница сезонного промерзания грунтов.  $Q$  — расход наледообразующих вод. Размеры элементов указаны в метрах



**Рациональные типы опор мостов на водотоках с наледями:**

1 — граница сезонного промерзания грунтов; 2 — верхняя граница многолетнемерзлых горных пород; 3 — наледь; УН — максимальный уровень наледи. а—в — типы опор

## **2. Гидротехнические сооружения в области вечной мерзлоты**

# Типы плотин из грунтовых материалов в криолитозоне

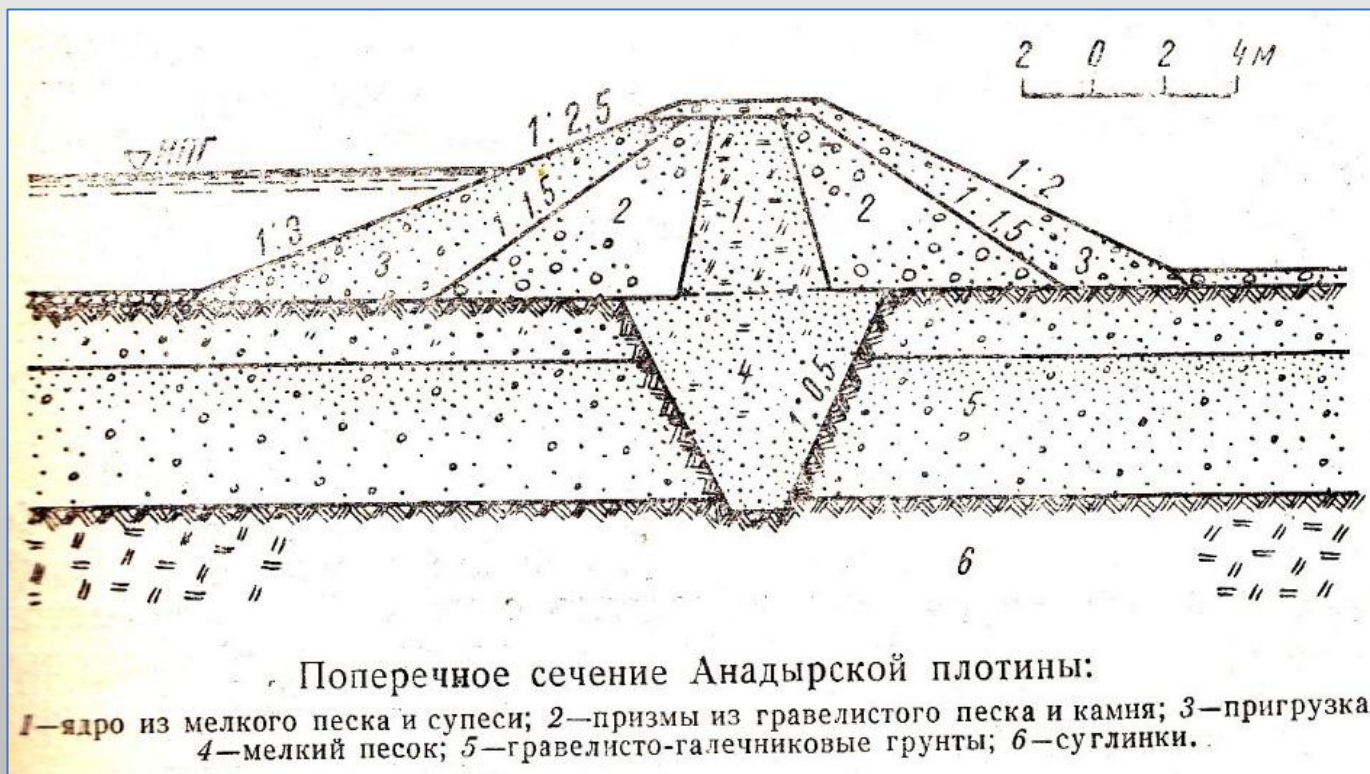
Грунтовые плотины являются единственным типом построенных плотин в речных гидроузлах криолитозоны.

Классификация по температурному состоянию	Талые плотины	Мерзлые плотины
Конструкции (типы) плотин	Земляные Каменно-земляные Каменнонабросные	Земляные Каменно-земляные
Условия, в которых возможно строительство плотин	а) на крупных реках со сквозными таликами; б) когда в основании залегает мерзлый грунт, не теряющий несущую способность при оттаивании	На малых реках с несквозными таликами, которые могут быть проморожены
Условия, в которых эксплуатируются плотины	Эксплуатируются в талом состоянии. Имеет место фильтрации воды через тело плотины и её основание. Плотины фильтрующие.	Промораживаются естественным холодом или с помощью специальных замораживающих систем. Эксплуатируются в мерзлом состоянии. Плотины нефильтрующие. Фильтрация не допускается.

# Талые земляные, каменно-земляные и каменнонабросные ПЛОТИНЫ

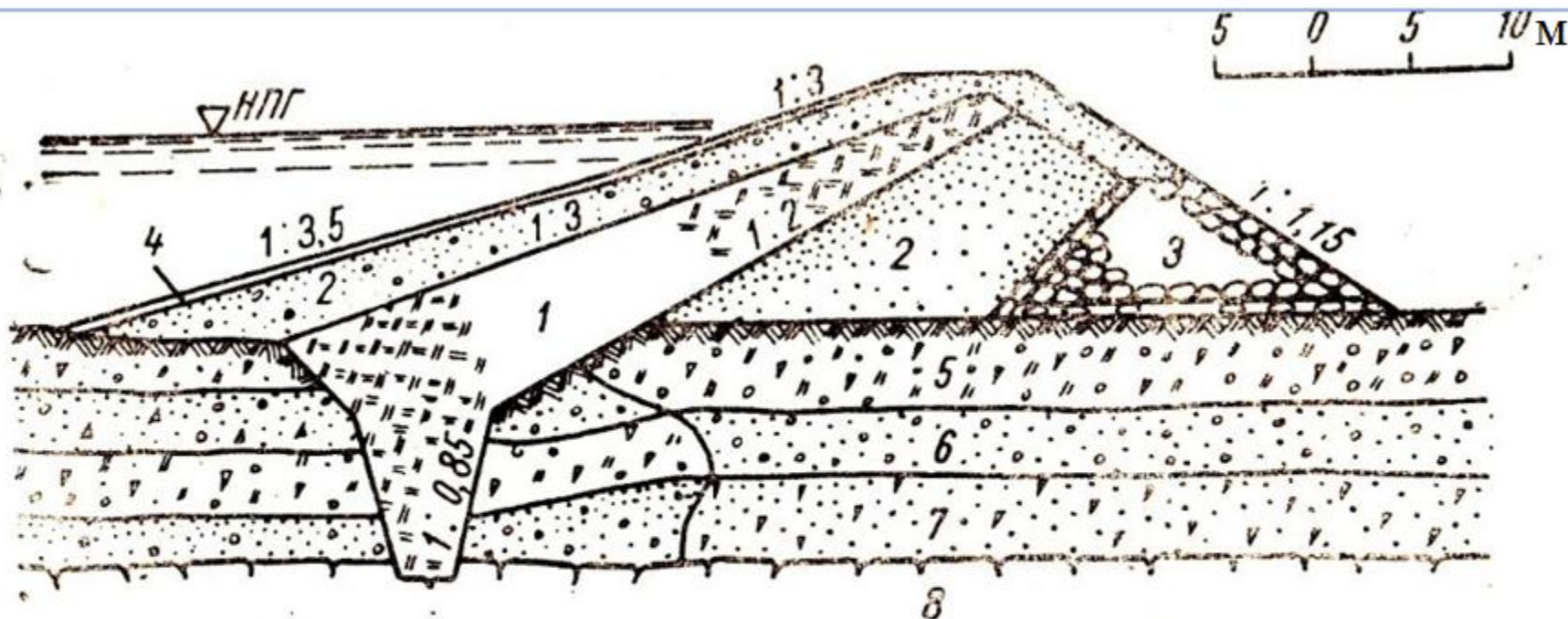
## Анадырская земляная плотина с ядром на р. Казачке

Длина плотины 500 м, высота 8,5 м. Год введения в эксплуатацию 1960. Среднегодовая температура воздуха – 7,7°C. Плотина, претерпев ряд деформаций, работала удовлетворительно. В 1970-х гг. высота плотины была увеличена до 16 м, длина по гребню до 1500 м. Водохранилище используется для водоснабжения г. Анадыря и Анадырской ТЭЦ [Кудояров, 1973].



## Земляная плотина с грунтовым экраном на р. Каменушке у г. Магадана

Длина плотины 222 м, высота 6 м. Год введения в эксплуатацию 1960. Среднегодовая температура воздуха - 2°С; в основании островная вечная мерзлота мощностью 0,4 – 4,0 м. Плотина успешно эксплуатируется в системе водоснабжения г. Магадана [Кудояров, 1973].

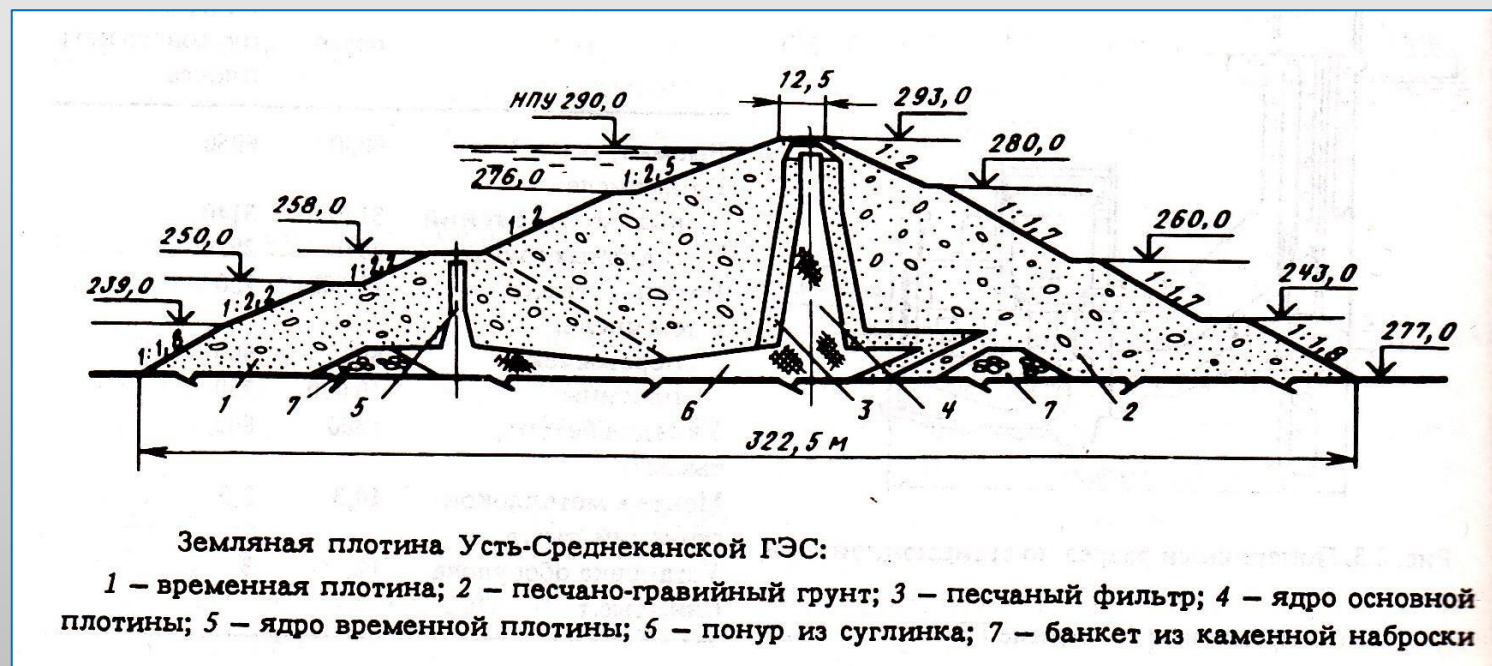


Поперечное сечение плотины на р. Каменушке:

1—экранный слой из суглинка; 2—гравелистые супеси или песчано-гравелистый грунт; 3—каменная наброска; 4—двойное мощение 0,3-м на слое гравия; 5—супесь со щебнем, дрсвой и плохо окатанными валунами или гравием; 6—галечниково-гравийный грунт с песком и валунами; 7—щебень с дрсвой, песком и глыбами; 8—гранодиориты, выветрелые с преобладанием трещиноватых разностей

## Земляная плотина с ядром строящегося Усть - Среднеканского гидроузла на р. Колыме

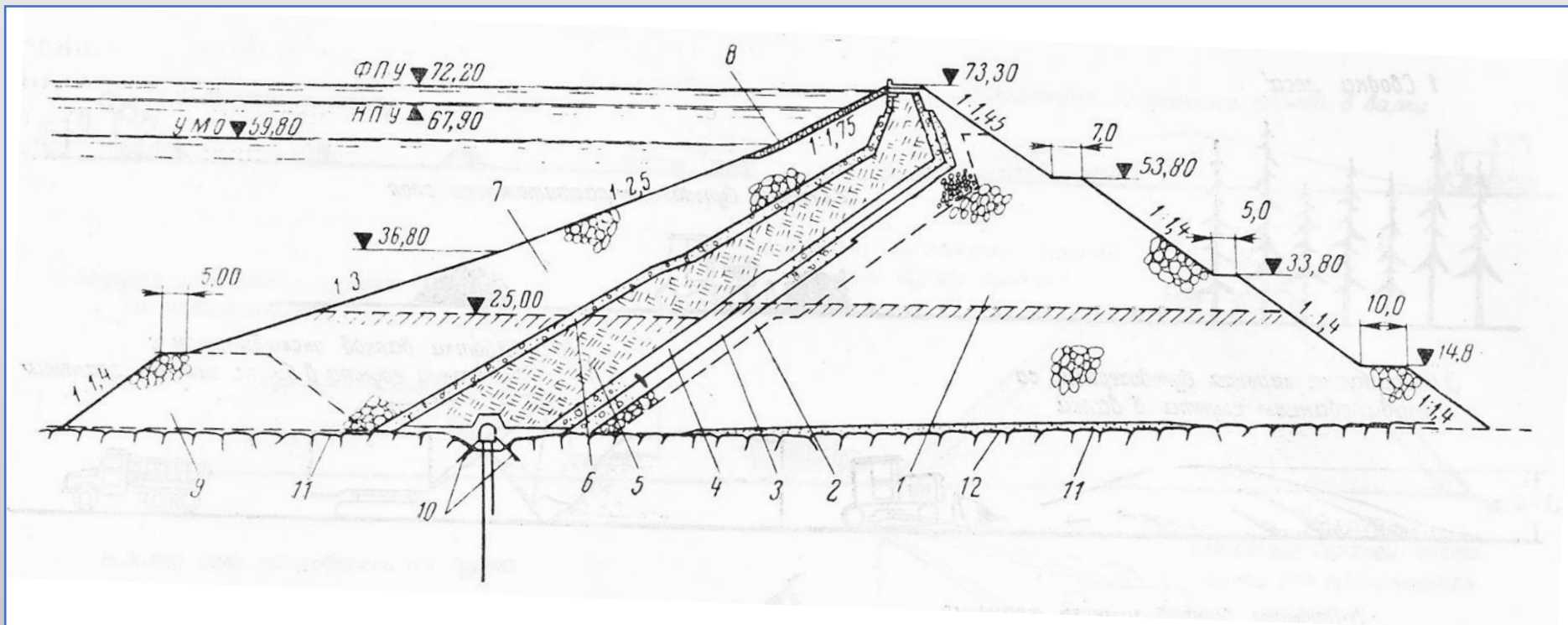
Протяженность напорного фронта гидроузла 2490 м, из которых 2075 м приходится на земляную плотину высотой 66 м, а 415 м на бетонные сооружения (водосливную и станционную плотину с приплотинным зданием ГЭС). Среднегодовая температура воздуха в районе – 12°С, мощность вечной мерзлоты до 300 м за исключением подруслового талика. В 1993 г. был закончен подготовительный период, в 1994 г. начаты бетонные работы в котловане основных сооружений [Когодовский, 1996], в 2016 г. стройка продвигалась к завершению.





## Каменно-земляная плотина с грунтовым экраном Вилюйского энергетического гидроузла на р. Вилюй

Длина плотины 700 м, высота 74,5 м. Годы постройки 1960 – 1969. Среднегодовая температура воздуха в районе гидроузла  $-8,2^{\circ}\text{C}$ . Объём суглинистого экрана 580 тыс.  $\text{м}^3$ .



Поперечное сечение плотины Вилюйского гидроузла:

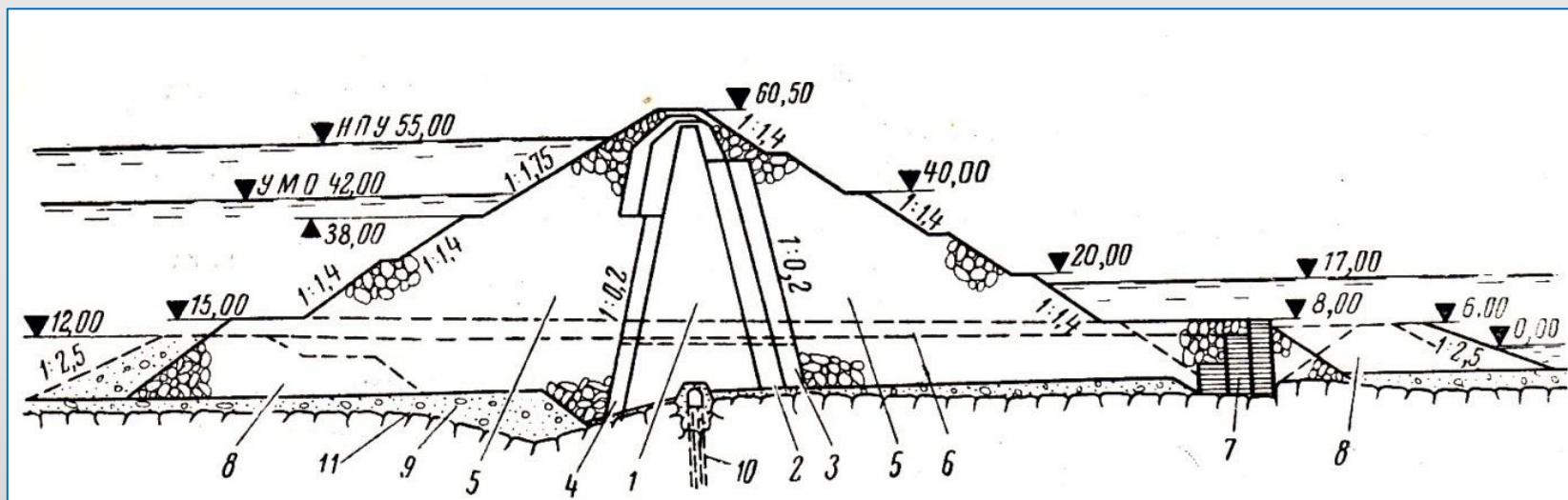
1 — каменная наброска; 2 — выравнивающий слой; 3 — слой фильтра из фракций щебня до 150 мм; 4 — то же до 40 мм; 5 — экран из дровяного суглинка; 6 — переходная зона из аллювиальных песчано-гравелистых грунтов; 7 — пригрузка из камня; 8 — крепление камнем средней крупности (0,6 м); 9 — каменный банкет; 10 — цементационная завеса, выполненная из галерей; 11 — крепление камнем диабазы; 12 — аллювий.



Вилюйский гидроузел на р. Вилюй с каменно-земляной плотиной

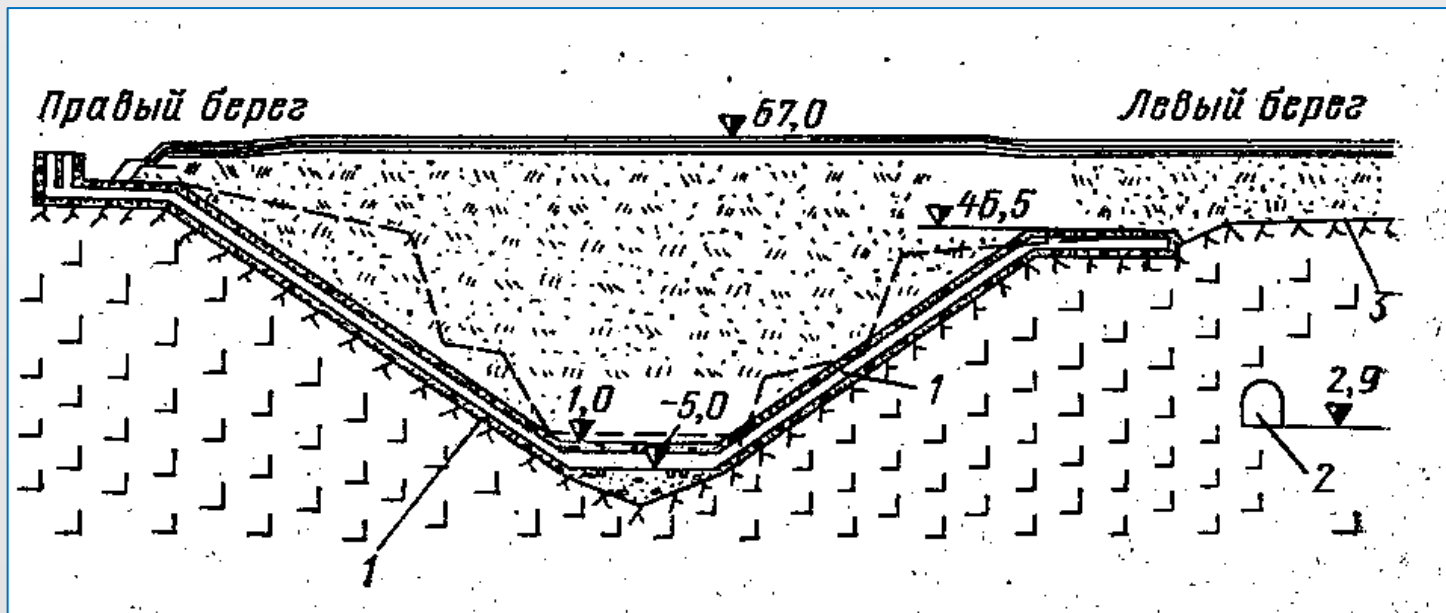
## Каменно-земляная плотина с грунтовым ядром Усть-Хантайского энергетического гидроузла на р. Хантайке

Высота плотины 67 м, длина 300 м. Строительство гидроузла завершено в 1975 г.



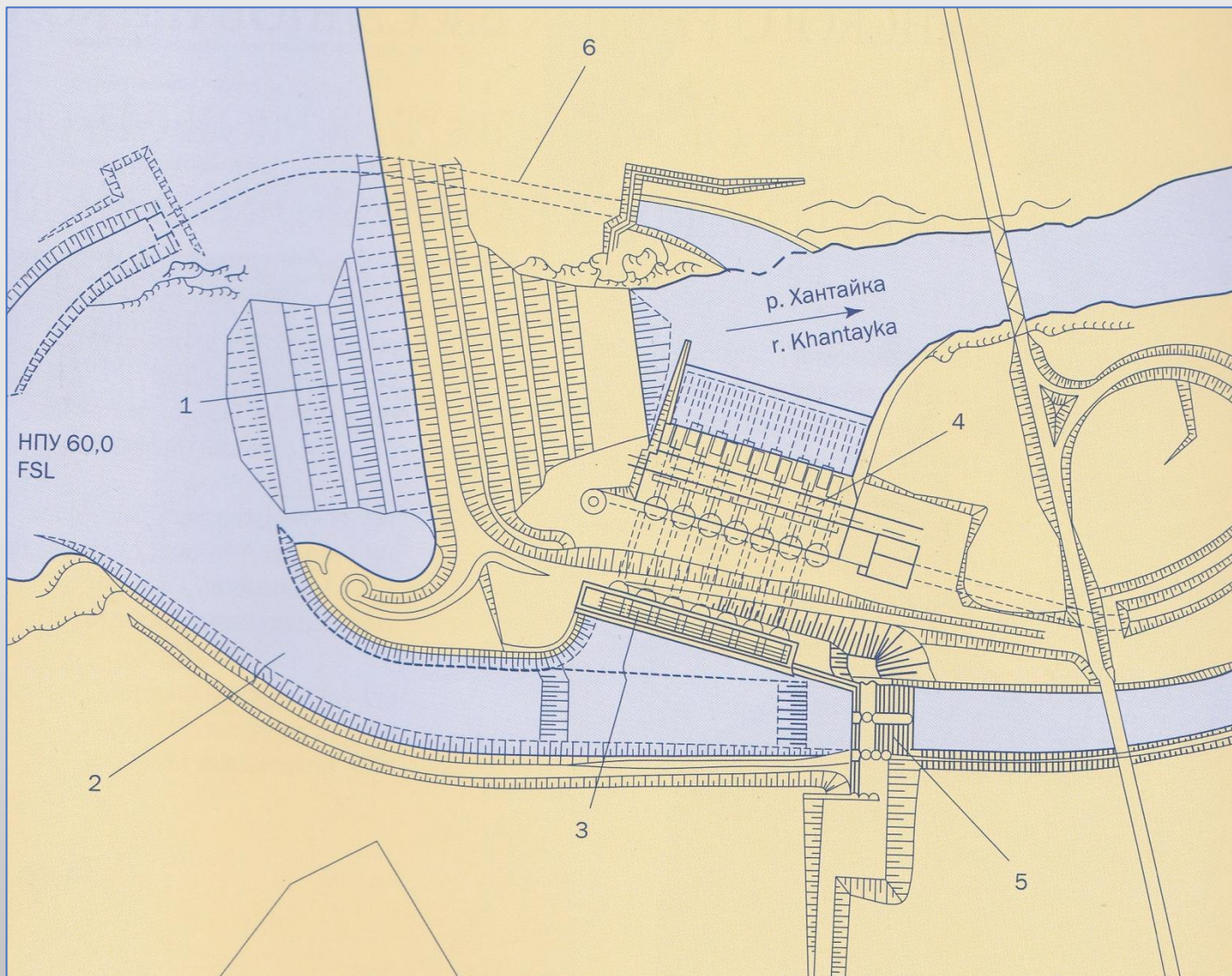
Поперечный разрез плотины Усть-Хантайского гидроузла:

1 — ядро из моренного грунта; 2 — первый переходный слой ( $d < 10$  мм); 3 — второй переходный слой ( $d > 10$  мм); 4 — аллювий; 5 — каменная наброска; 6 — временное крепление камнями весом 3,5–5 т для пропуска строительного паводка; 7 — деревянный ряж, покрытый сверху бетонной плитой; 8 — перемычка; 9 — аллювий; 10 — цементационная завеса, выполненная из галереи; 11 — долериты.



Продольный разрез по оси плотины Усть-Хантайского гидроузла:  
 1 – цементационная потерна; 2 – строительный туннель; 3 – контуры берегов

## Компоновка Усть-Хантайского гидроузла в узком створе с каменно-земляной плотиной и подземной ГЭС



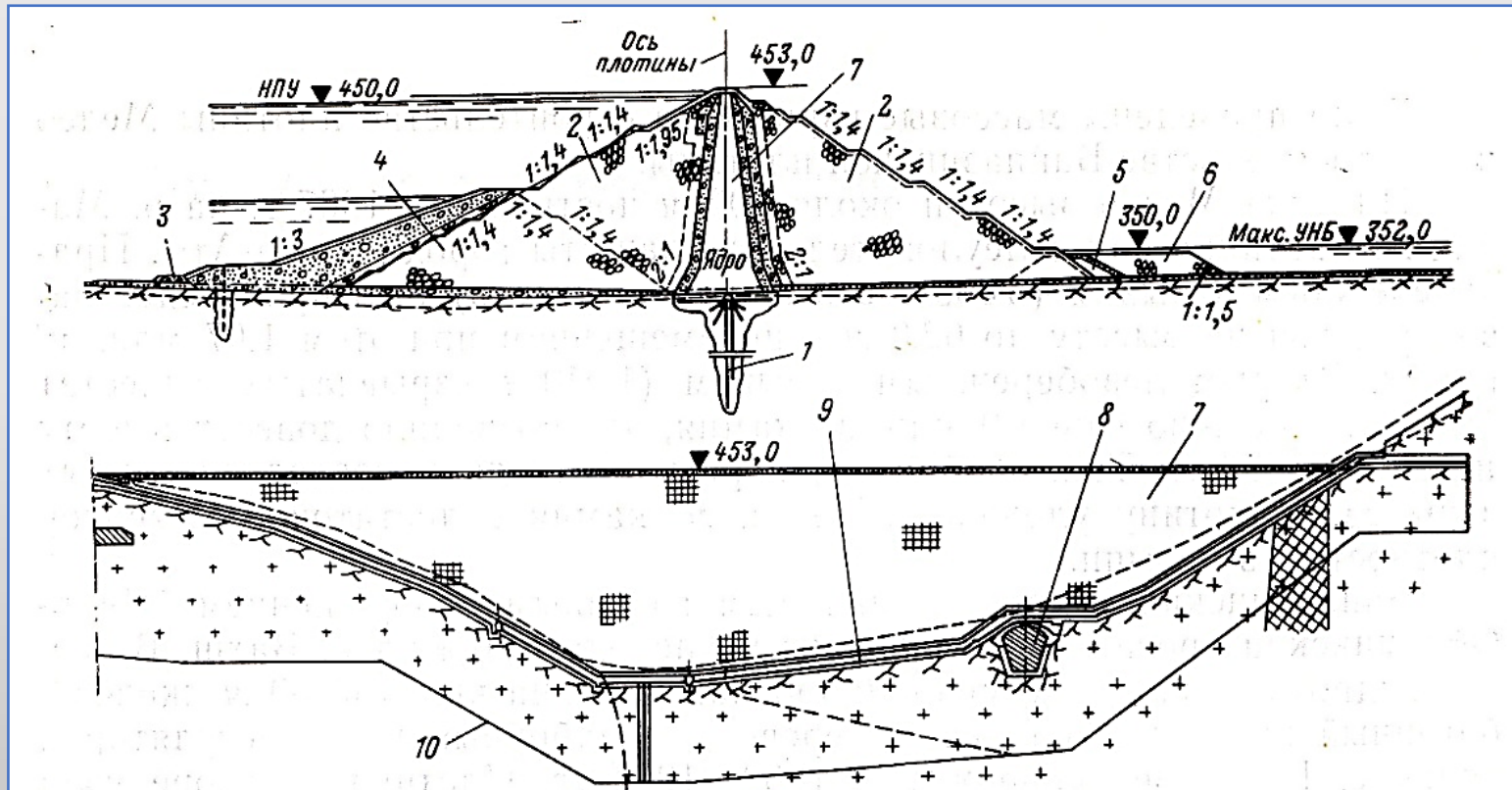
- 1 – каменно-земляная плотина; 2 – подводящий канал; 3 – водоприемник ГЭС; 4 – ГЭС;  
5 – водосброс; 6 – строительный туннель



Вид со стороны нижнего бьефа на ГЭС и плотину Усть-Хантайского гидроузла. На заднем плане – Усть-Хантайское водохранилище

## Каменно-земляная плотина с грунтовым ядром Колымского энергетического гидроузла на р. Колыме

Высота плотины 130 м, длина 780 м, ширина гребня 15 м. Построена в 1979 – 1988 гг.



Поперечный и продольный разрезы плотины Колымского гидроузла:

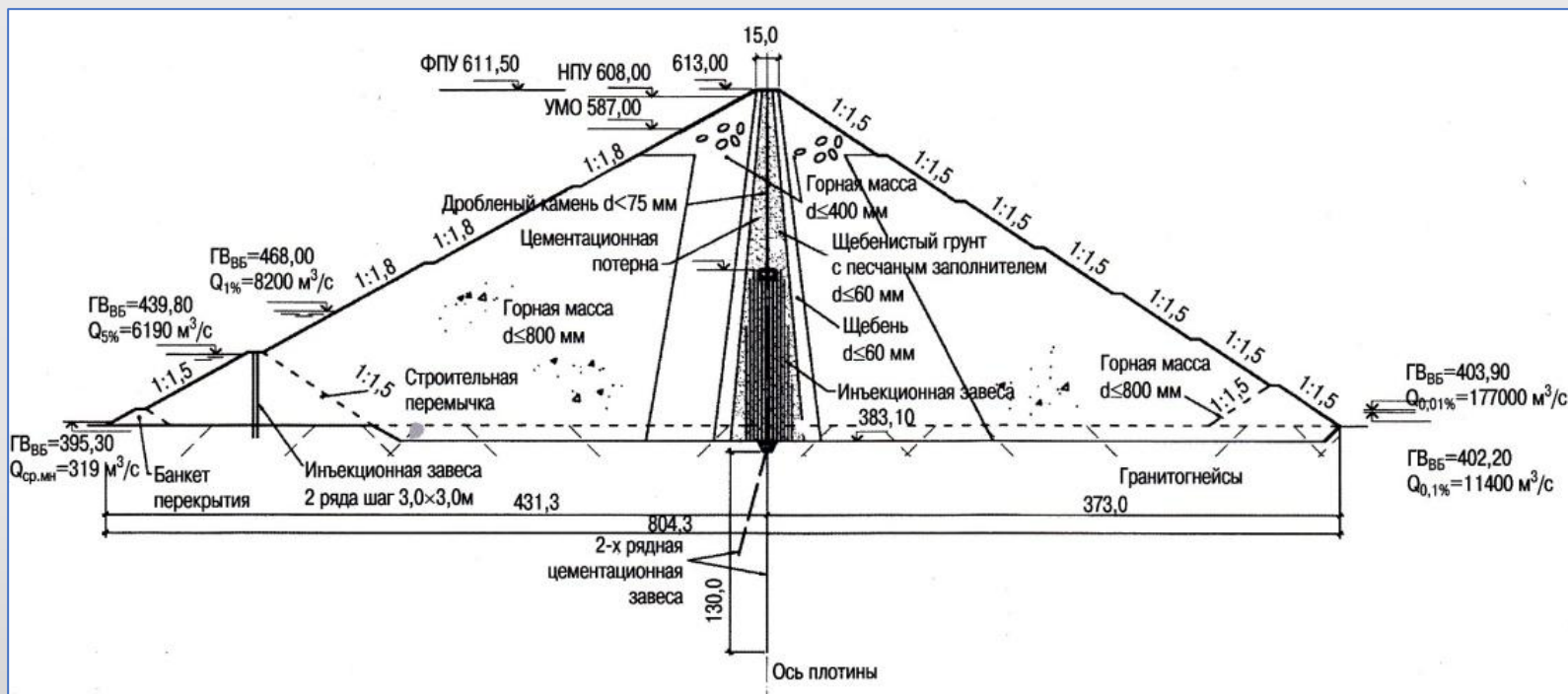
1 — цементационная завеса; 2 — наброска горной массы; 3 — верховая перемычка; 4 — временная плотина; 5 — низовая перемычка; 6 — отвал скального грунта; 7 — ядро из щебенисто-дресвяного суглинка; 8 — временная водосбросная труба; 9 — цементационная штольня; 10 — граница глубокой цементации.



Колымский гидроузел с каменно-земляной плотиной

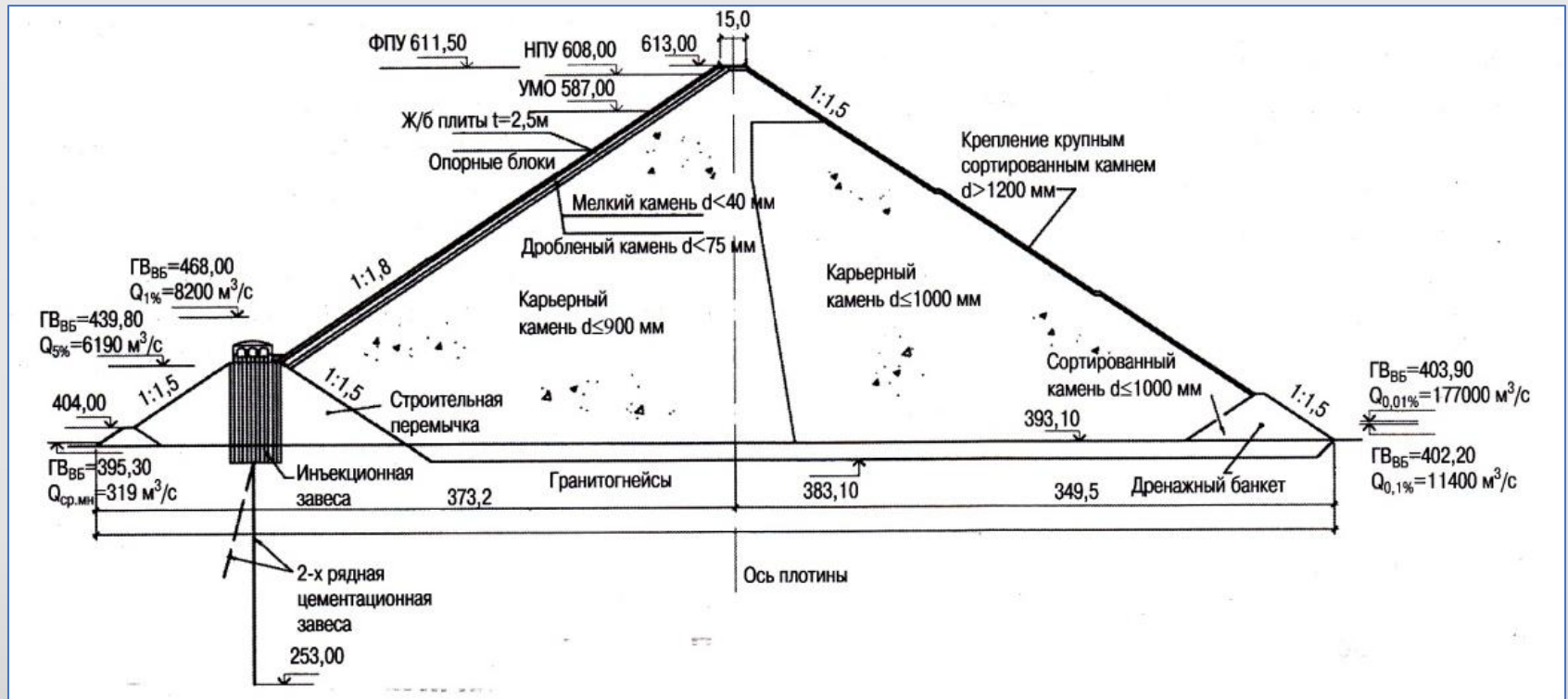


# Варианты каменнонабросной плотины высотой 230 м для проектируемого Канкунского гидроузла на р. Тимптон в Якутии [Заирова, 2010 г.]



Поперечное сечение плотины с комбинированным противофильтрационным устройством:

верхняя часть противофильтрационного устройства – диафрагма из асфальтобетона,  
нижняя часть – инъекционная завеса, в основании – цементационная завеса

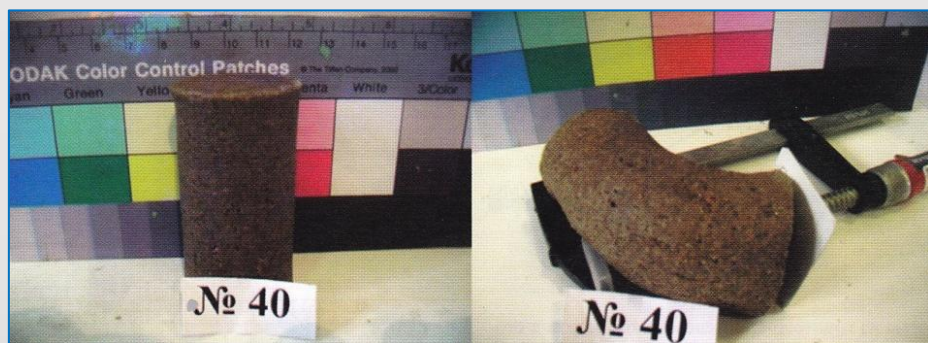


Поперечное сечение плотины с железобетонным экраном: толщина железобетонного экрана 2,5 м

# Применение грунтово-криогелевых композитов в водоупорных элементах каменно-земляных плотин

( предложение ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева) [Васильев, 2013]

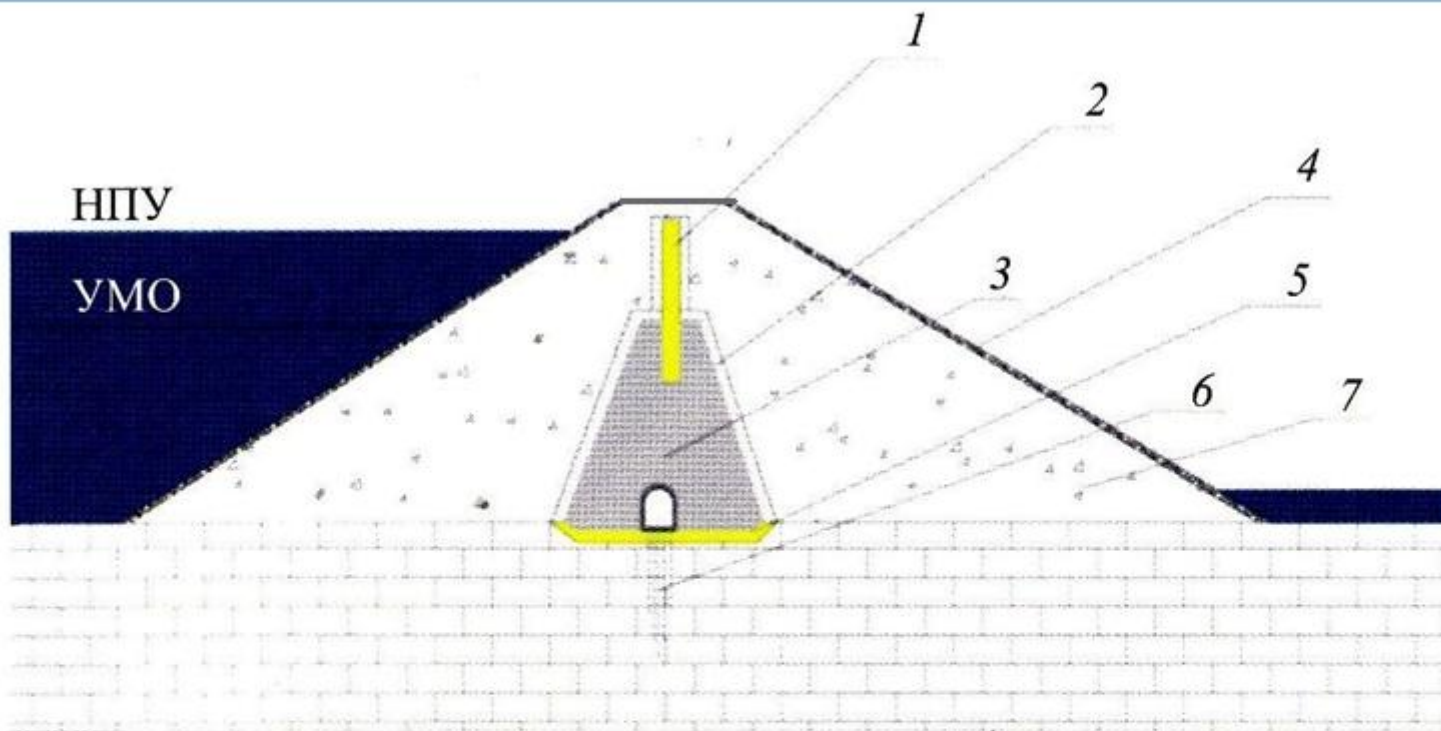
Грунтово-криогелевые композиты получают из смеси водного раствора поливинилового спирта (ПВС) с грунтом (супесью, песком, золой и т.п.) путем замораживания – оттаивания.



Пластичные свойства грунтово-криогелевого композита

Характеристики грунтово-криогелевых КОМПОЗИТОВ

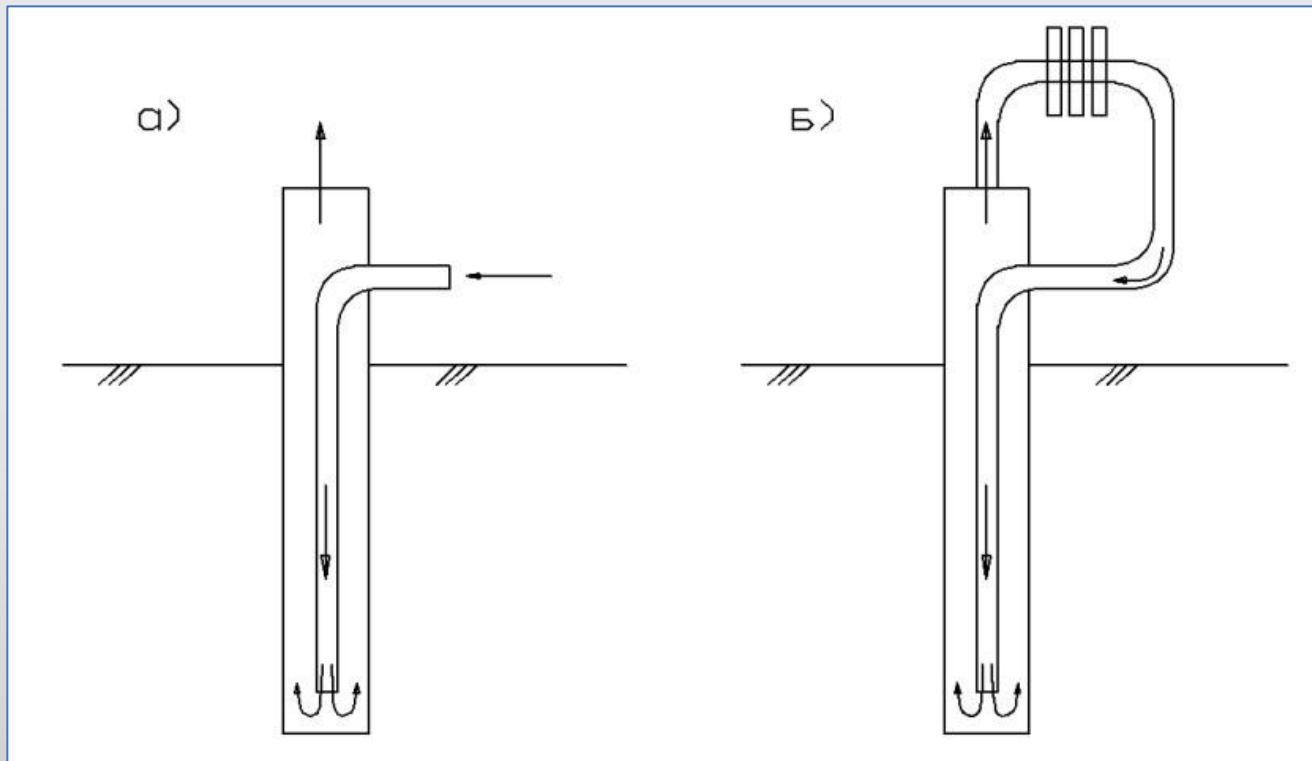
Свойства	Мерзлое состояние	Оттаявшее состояние
Прочность при срезе, МПа	0,7 – 1,2	–
Угол внутреннего трения, град	–	22 – 30
Сцепление, МПа	–	0,01 – 0,05
Модуль деформации, МПа	2000 – 3000	0,5 – 5,0
Водопроницаемость, м/с	–	$10^{-8}$ – $10^{-11}$
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1240 – 1650	1240 – 1650
Плотность скелета, кг/м <sup>3</sup>	990 – 1440	990 – 1440
Теплопроводность, Вт/м град	0,25 – 1,1	0,3 – 0,5



Диафрагма из грунтово-криогелевого композита в оголовке плотины талого типа: 1 – диафрагма; 2 – обратный фильтр и защитный слой; 3 – ядро; 4 – крепление откоса; 5 – подстилающий слой грунтово-криогелевого композита в основании ядра; 6 – инъекционная завеса из раствора ПВС; 7 – низовая призма из каменнонабросного материала

# Замораживающие системы для грунтовых плотин

## Замораживающие устройства Монбейга



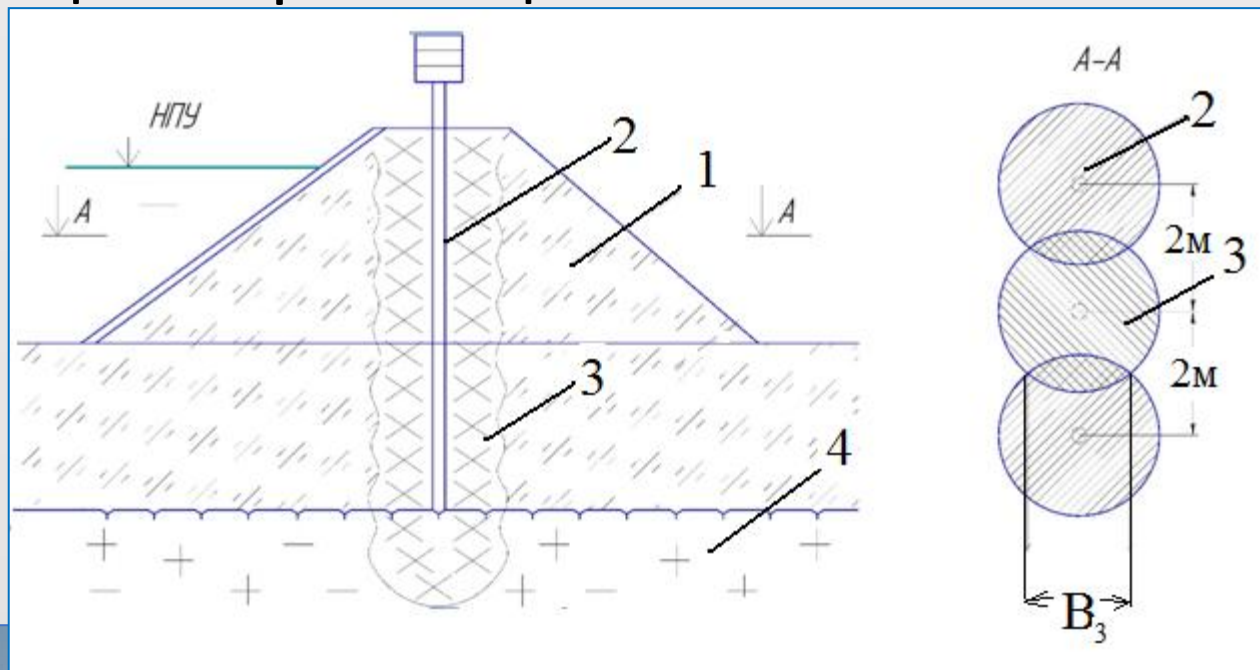
а) газовое устройство с естественной конвекцией атмосферного воздуха;

б) жидкостное устройство с естественной конвекцией однофазной жидкости.

*[Monbeig M.H. Dispositifs pour l'utilisation de la difference de temperature entre les couches inferieures de l'atmosphere. Patent №475226, 1915, France]*

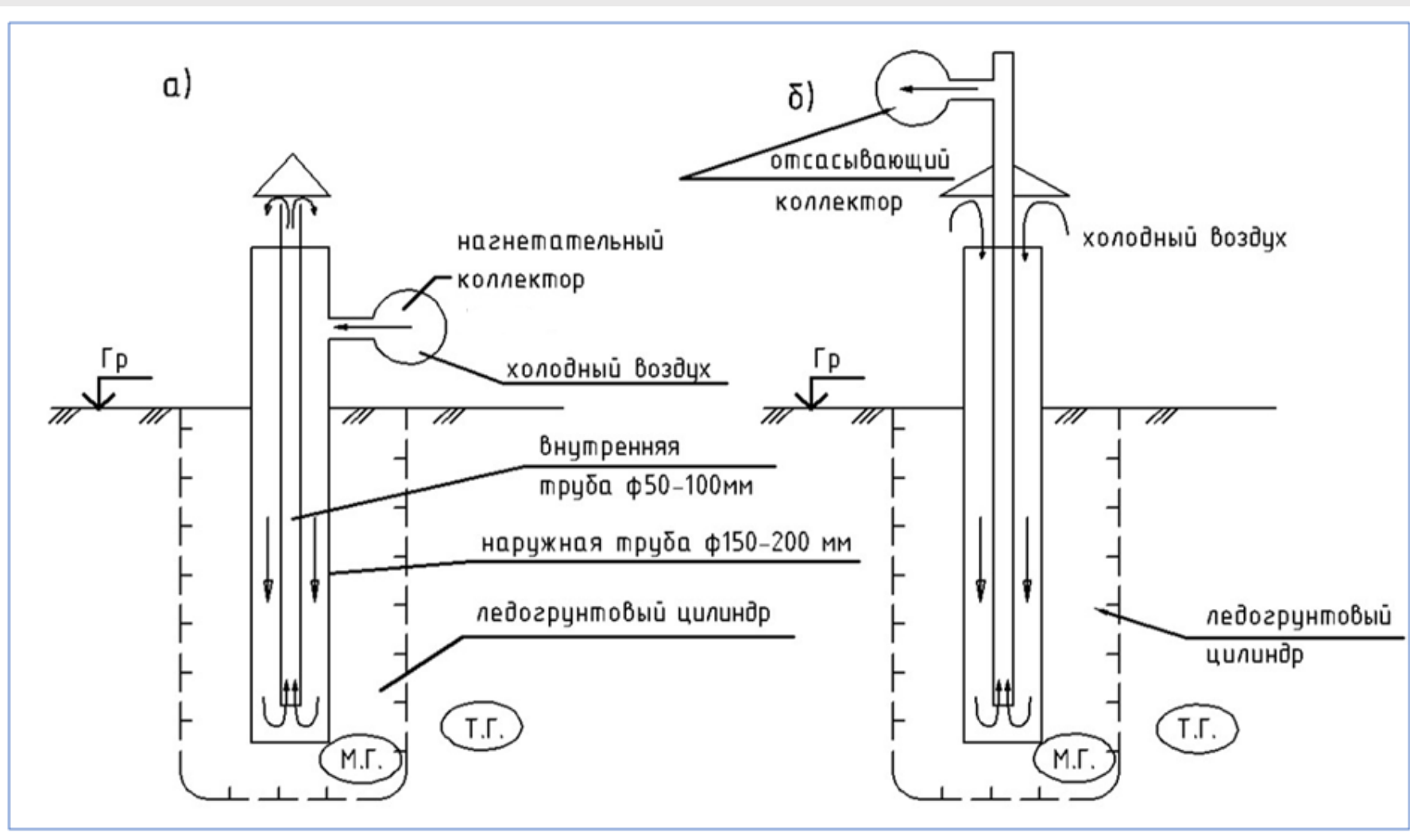
# Мерзлотная противофильтрационная завеса в плотине, создаваемая с помощью замораживающей системы

- 1 – тело плотины;
- 2 – сезоннодействующие охлаждающие устройства (СОУ);
- 3 – ледогрунтовая мерзлотная завеса;
- 4 – мерзлый (водонепроницаемый) грунт в основании



Земляная насыпная плотина с мерзлотной завесой, образующая водоперехватывающее водохранилище (маневровую емкость) обогатительной фабрики №12 Удачинского ГОК в Якутии

## Воздушные замораживающие системы



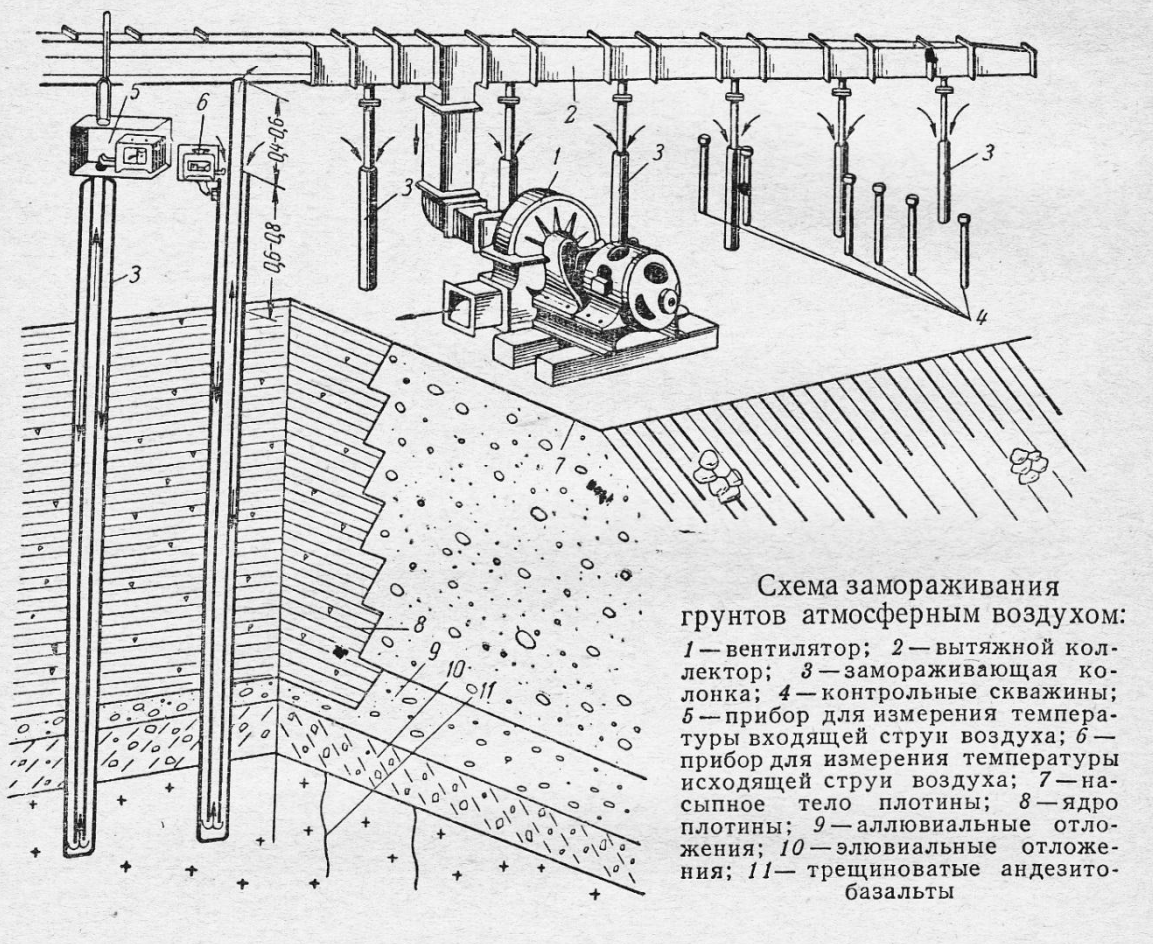
а) система с нагнетанием воздуха;

б) система с забором воздуха.

Воздушная замораживающая система с забором воздуха была реализована в плотине пруда-охладителя Аркагалинской ГРЭС на р. Мяундже, построенной в 1952-1959 гг. в районе со среднегодовой температурой воздуха  $-12,7^{\circ}\text{C}$  [Трупак, 1970].

Параметры системы:

- протяженность по оси плотины 899 м;
- колонки двухтрубные диаметром 100мм и 51 мм;
- расстояние между колонками 1,5 – 2 м;
- глубина колонок 16 – 25 м;
- вытяжной коллектор сечением 350x350 мм;
- вентилятор производительностью по воздуху 10 000 м<sup>3</sup>/час;
- 1 вентилятор обслуживал от 32 до 101 колонок в зависимости от их глубины;
- система работала при температурах воздуха ниже минус  $15^{\circ}\text{C}$  обычно с 15 октября до 10 апреля.

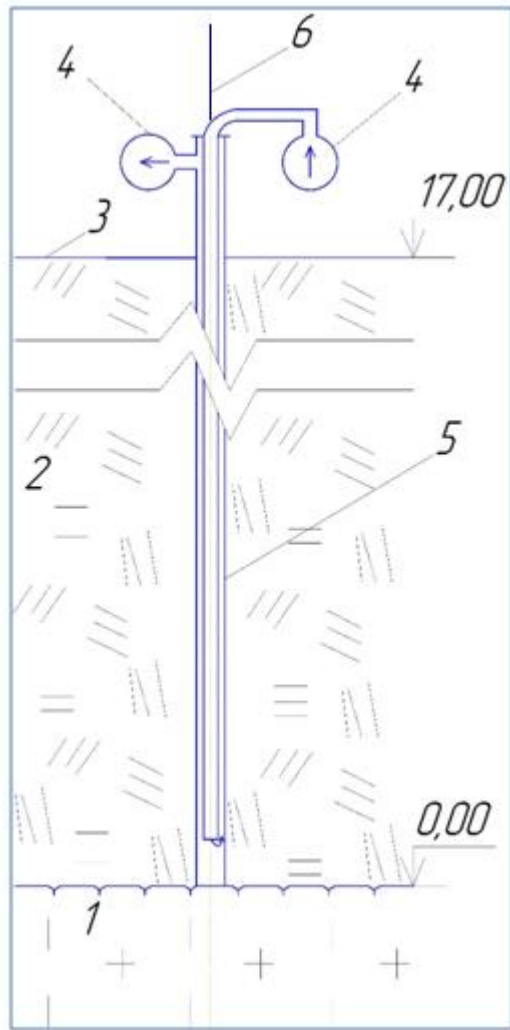


Проявившиеся недостатки: не удалось остановить процесс оттаивания грунтов на фильтрующем участке плотины; в летний период в колонки поступал теплый воздух, из него выпадали сконденсированные пары воды, конденсат замерзал, образуя ледяные пробки.

В 1957 – 1962 гг. в плотине была смонтирована жидкостная замораживающая система. 103



## Воздушная замораживающая система с нагнетательным и отсасывающим коллекторами



Вид системы с гребня плотины

1 – скальное вечномёрзлое основание, 2 – тело плотины; 3 – гребень плотины; 4 – нагнетательный и отсасывающий коллекторы; 5 – замораживающие внутренняя и наружная трубы; 6 – ось плотины

В колонки такой системы тёплый летний воздух не поступает и ледяные пробки в них не образуются.

## Жидкостные замораживающие системы

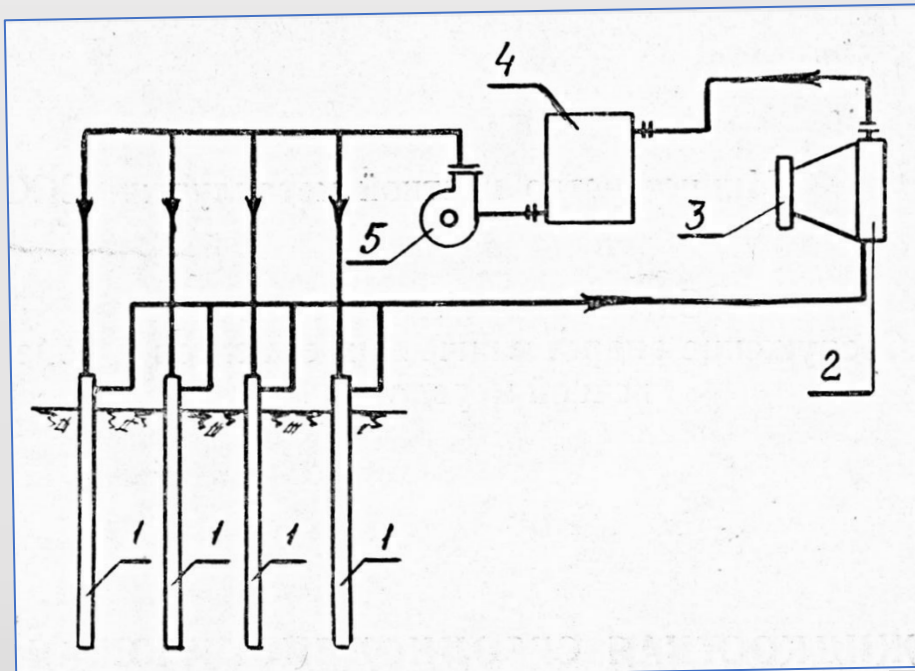


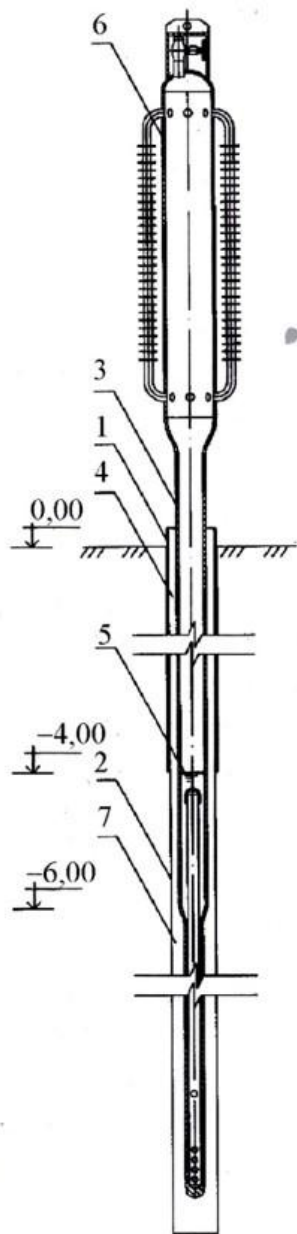
Схема системы (хладоноситель-керосин):

- 1 – двухтрубные замораживающие колонки;
- 2 – калорифер, для охлаждения хладоносителя-керосина наружным воздухом;
- 3 – вентилятор, обеспечивающий движение воздуха через калорифер;
- 4 – расширительная емкость; 5 – насос для забора хладоносителя из расширительной емкости в подающий коллектор (Магадан: Дальстройпроект, 1983 г.)



Вид системы (хладоноситель-рассол): смонтирована в 1957 – 1962 гг. в плотине пруда-охладителя Аркагалинской ГРЭС на р. Мяундже; два ряда рассольных замораживающих колонок с подводным и отводящим коллекторами, резиновыми соединителями. 1968 г.

# Замораживающие системы из парожидкостных сезоннодействующих охлаждающих устройств (ПЖ СОУ)



Замораживающая колонка типа ПЖ СОУ (заполненная):

1 – кондуктор из трубы 127x4 мм;

2 – скважина диаметром 112 мм;

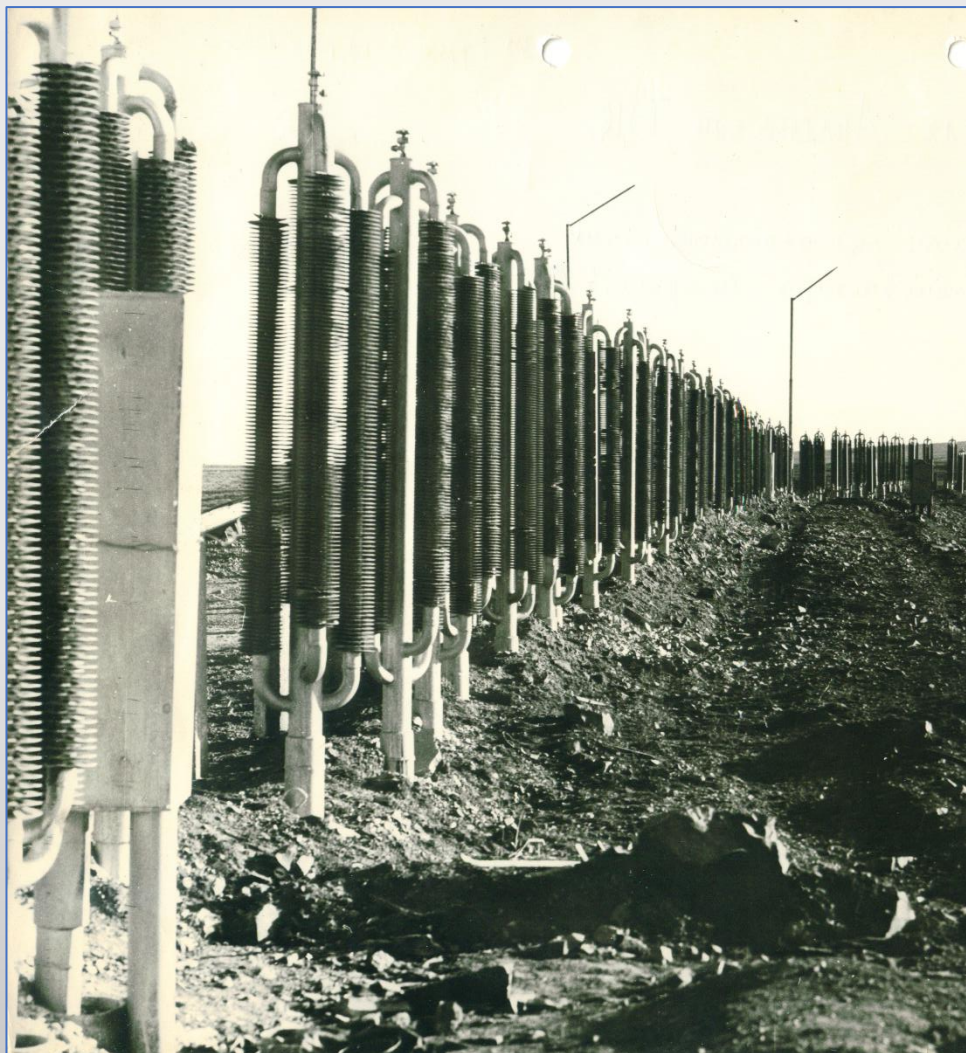
3 – ПЖ СОУ конструкции НПО «Фундаментстрой аркос» (г.Тюмень);

4 – парообразная углекислота;

5 – жидкая углекислота;

6 – конденсатор с оребрением;

7 – лед, образующийся после заливки скважины водой



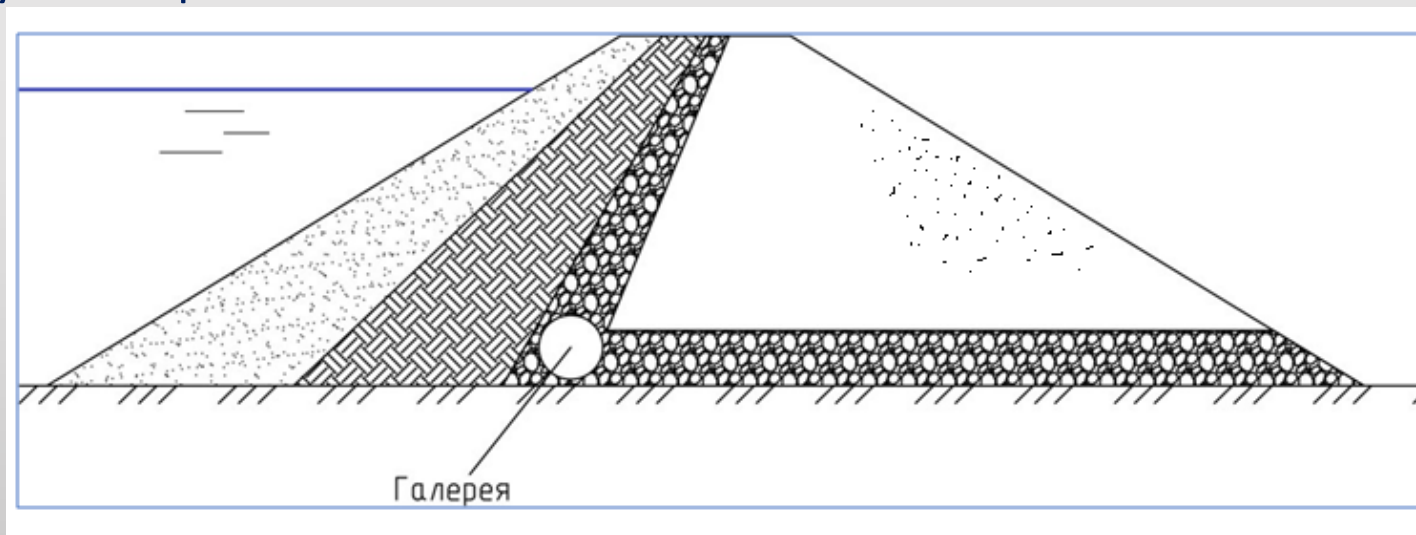
Вид замораживающей системы из ПЖ СОУ на перестроенной в 1970-х гг. плотине пруда-охладителя Анадырской ТЭЦ: хладоноситель фреон. 1986 г.

## Предложения по промораживанию грунтовых плотин

В архивах авторских свидетельств и патентов на изобретения можно найти много нереализованных предложений замораживающих систем в грунтовых плотинах. Здесь представлены два из них.

D. Krynine, W.R. Judd (1957); О.П. Орел (1968).

Охлаждение путем нагнетания холодного воздуха в галерею и фильтрация его по наклонному подэкрану и горизонтальному дренажу из крупного гравия.

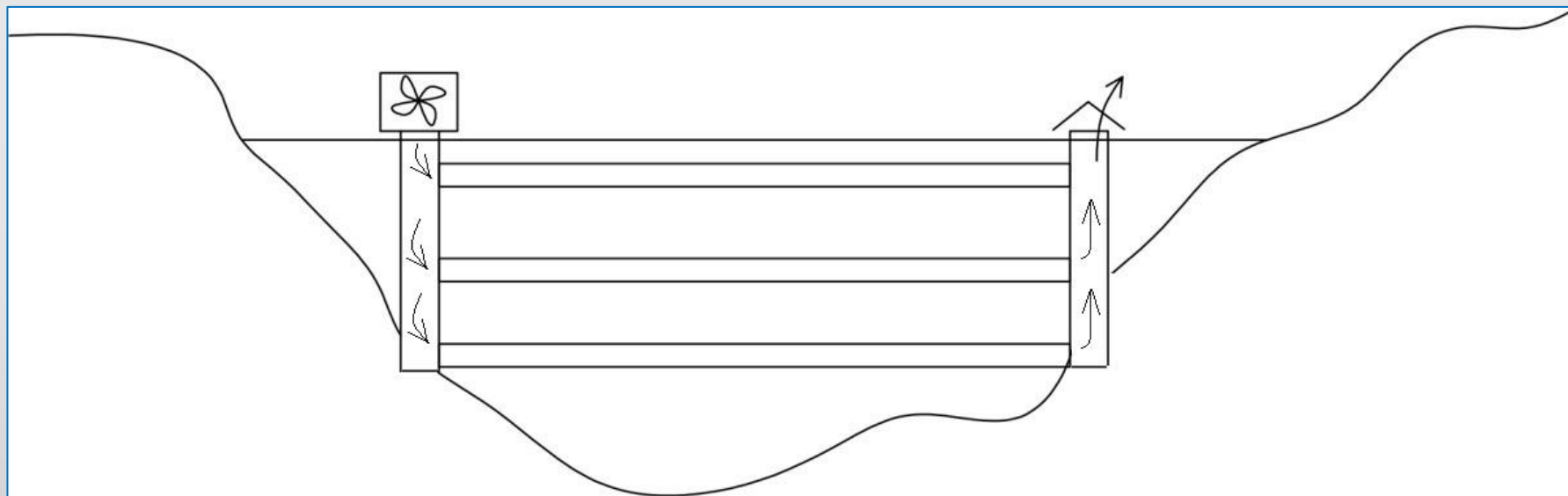


+ Простота конструкции системы и возможность использования местных строительных материалов.

- Сложность расчетов при проектировании и невозможность ремонта.

С.В. Соболев, А.В. Февралев (1987).

Промораживание путем принудительной вентиляции холодного воздуха через горизонтальные охлаждающие трубы с вертикальными коллекторами.



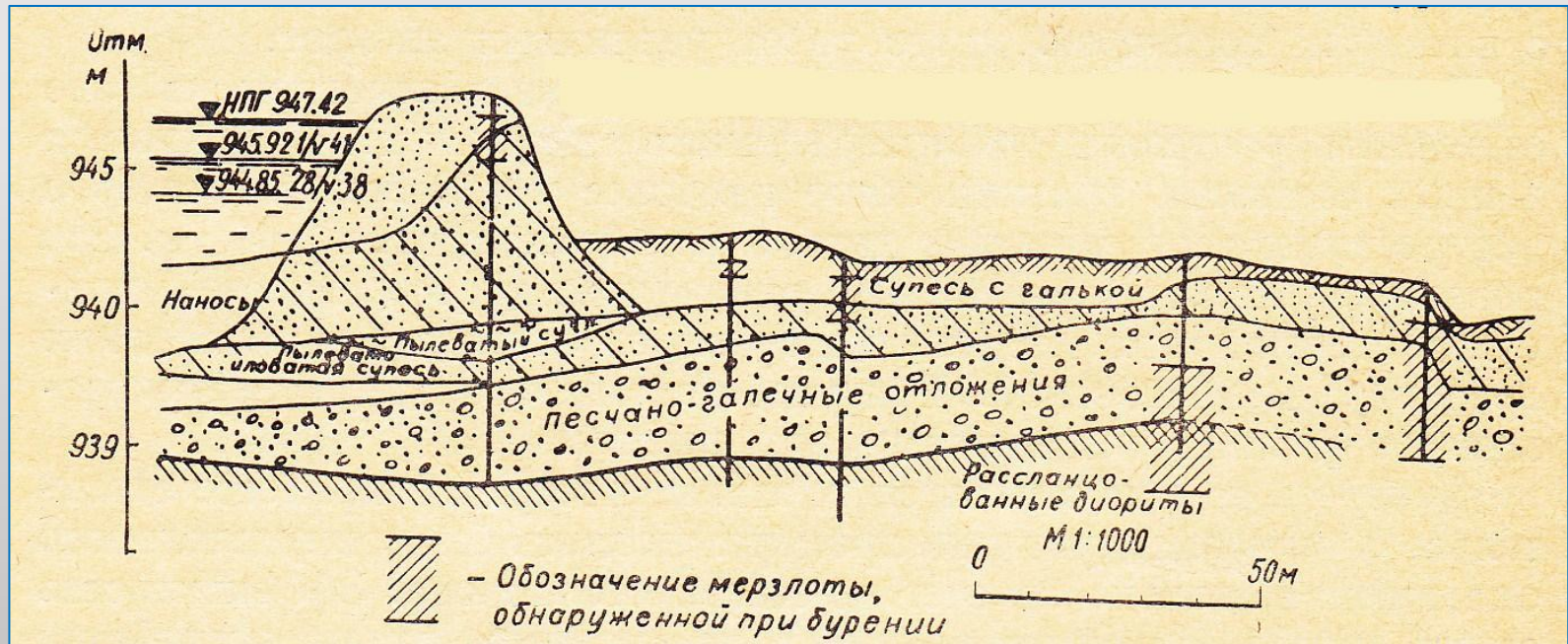
Продольный разрез по оси плотины

- + Можно возводить и промораживать плотину одновременно.

# Мерзлые земляные и каменно-земляные плотины

## Первая мерзлая плотина

Первой мерзлой плотиной была плотина на р. Мыкырт в бассейне р. Селенги в г. Петровске-Забайкальском на Транссибирской железной дороге. Высота плотины 9,5 м, длина 910 м. Укладка грунта шла 12 зим, тело плотины промораживали естественным холодом при среднемесячной температуре января – 27,1°C. Строительство было закончено в 1792 г. Имелся деревянный водосброс.



Поперечный разрез плотины на р. Мыкырт в г. Петровске-Забайкальском по данным бурения и съемки 1934 г.

До 1929 г., т.е. 137 лет, мерзлая плотина на р. Мыкырт работала нормально. В 1929 г. во время ремонта водосброса возникла фильтрация, к 1937 г. плотина оттаяла, к 1938 г. деревянные конструкции водосброса сильно деформировались. В 1945 г. плотина и водосброс были построены заново по талому варианту [Цытович, 1972].



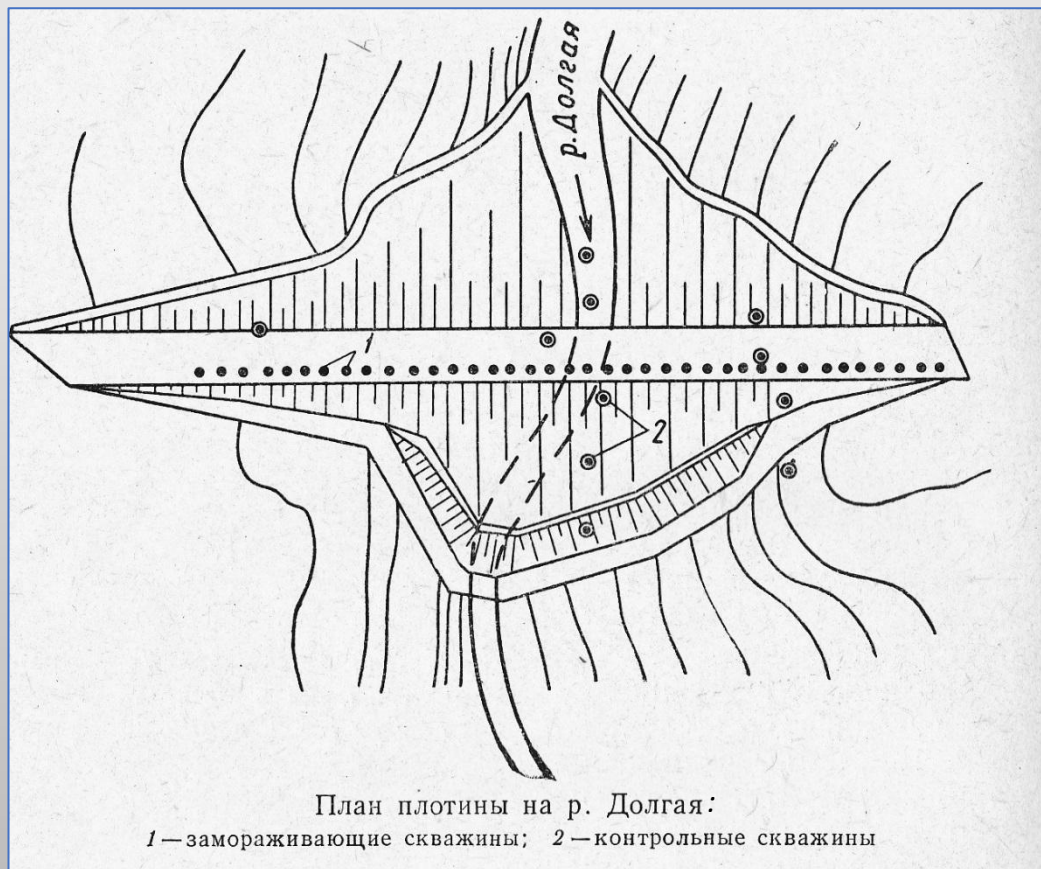
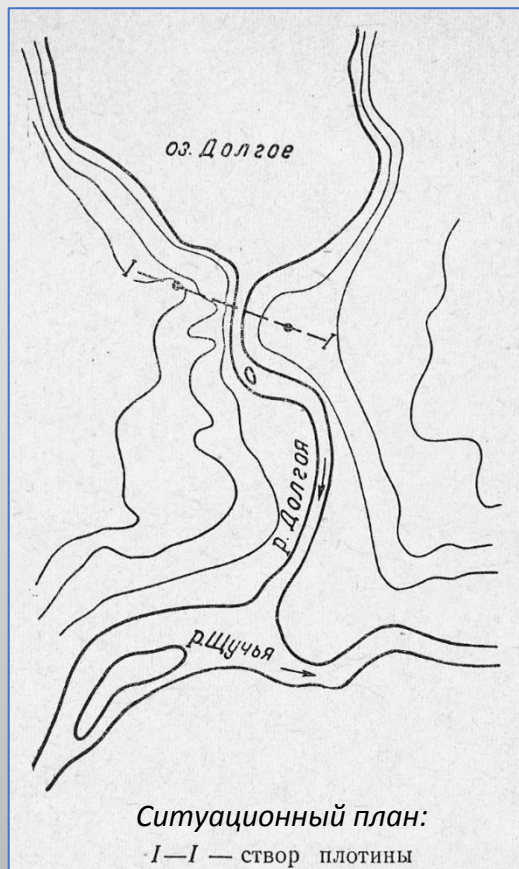
Современный вид плотины на р. Мыкырт в г. Петровске-Забайкальском с правого берега водохранилища

## Мерзлая земляная плотина на р. Долгая в г. Норильске

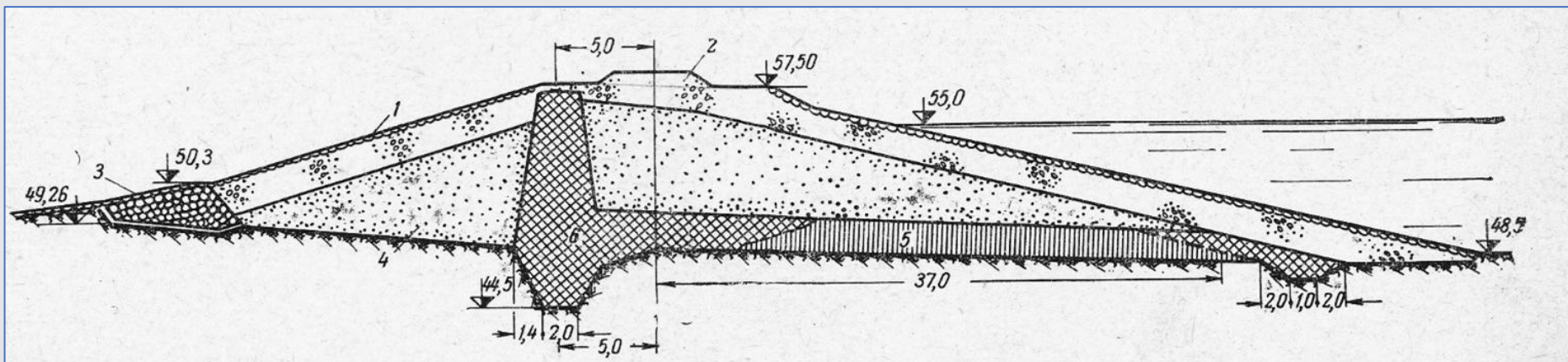
Плотина пересекла р. Долгую в ее истоке из одноименного озера и образовала пруд-охладитель Норильской ТЭЦ.

Среднегодовая температура воздуха  $-9,7$  С, воды в пруду  $+7,5$  С.

Высота плотины 8 м, длина 150 м. Построена в 1942 г. с воздушной замораживающей системой. В 1954 г. на низовом откосе устроили ледник, а систему отключили. В 1979 г. ледник разобрали, к 1983 г. в плотине смонтировали замораживающую систему из колонок СОУ. Плотина безаварийно эксплуатируется более 75 лет.







Поперечный разрез плотины на р. Долгая:

1 – каменная отсыпка на мху; 2 – крупнозернистый песок с галькой; 3 – обратный фильтр; 4 – мелкозернистый песок; 5 – суглинки; 6 – глинобетон





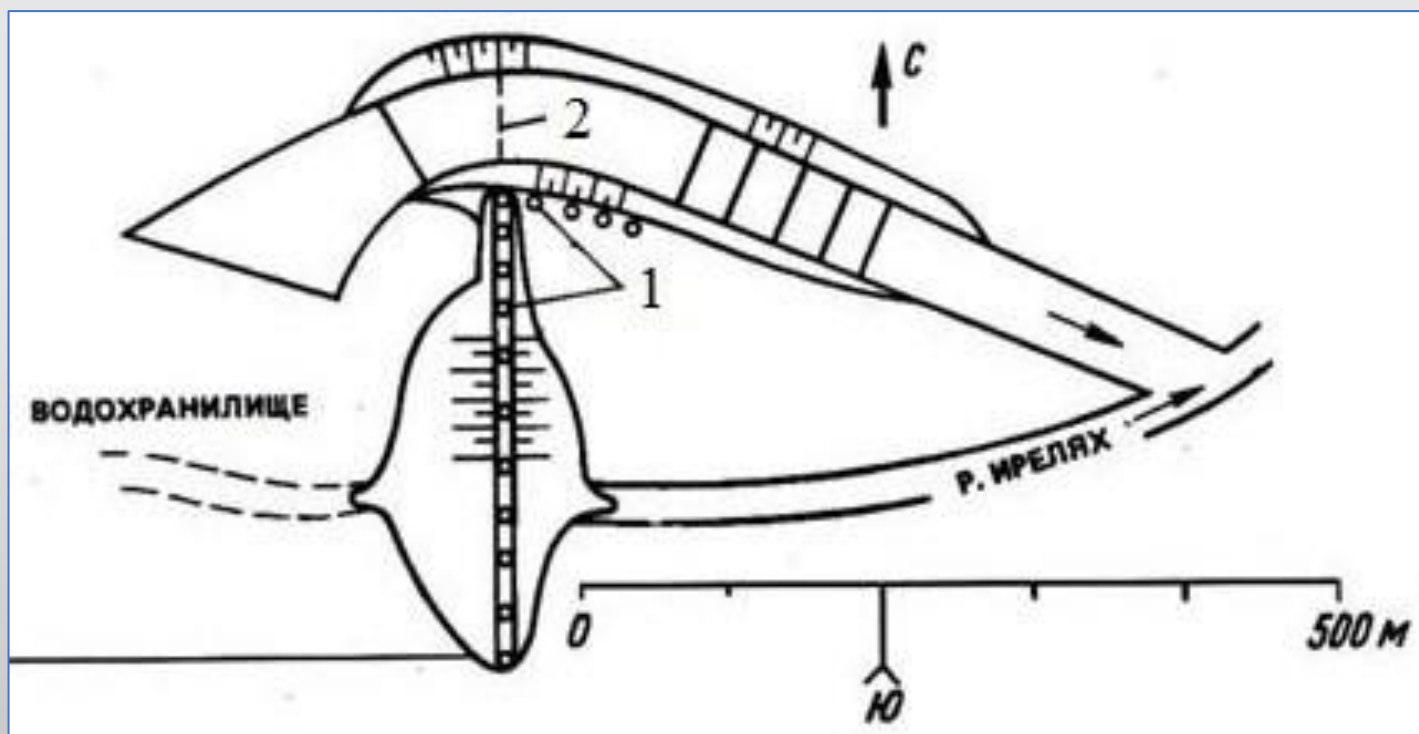
Мерзлая плотина на р. Долгая: вид с правого берега со стороны верхнего бьефа. 1971 г.



Мерзлая плотина на р. Долгая: 1 – ледник на низовом откосе; 2 – вытяжные короба из ледника; 3 – гребень плотины; 4 – деревянная галерея над замораживающими колонками. 1971 г.

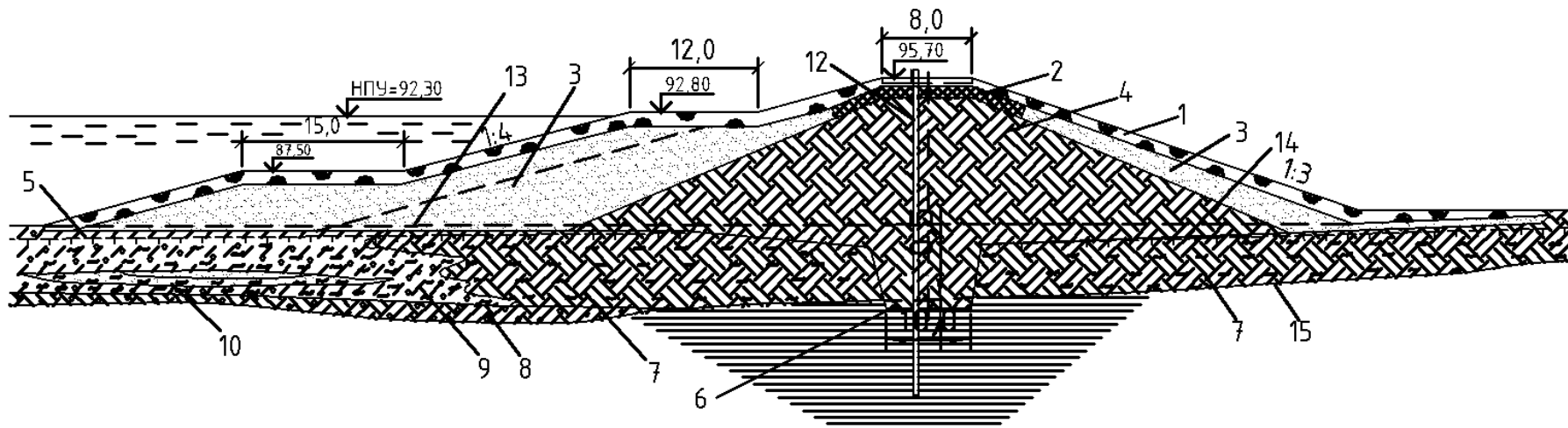
## Земляная насыпная плотина с мерзлотной противофильтрационной завесой Иреляхского гидроузла на р. Ирелях у г. Мирный в Якутии

Строительство гидроузла закончено в 1965 г. Длина плотины 320 м, высота 20 м. Плотина была построена из талых грунтов и заморожена воздушной замораживающей системой из 207 колонок глубиной от 8 до 26 м с шагом 1,5 м. В 1990-х и в 2000-х гг. замораживающая система реконструировалась.



Схематичный план Иреляхского гидроузла:

1 – ряд скважин-колонок для замораживания ядра плотины; 2 – горизонтальные замораживающие трубы под водосбросом

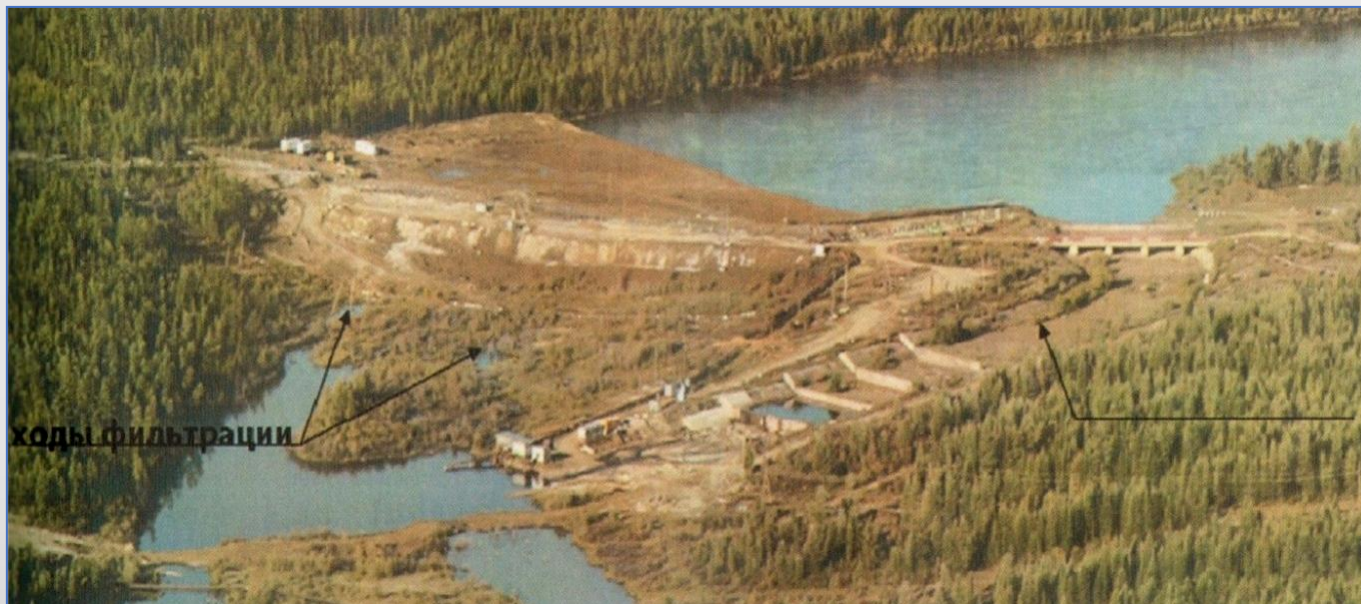


Проектный поперечный разрез плотины Иреляхского гидроузла на р. Ирелях:  
 1 - крепление откоса камнем; 2 - мохо - торфяной теплоизолирующий слой; 3 - песчаная пригрузка; 4 - суглинистое ядро плотины; 5 - граница вечной мерзлоты; 6 – суглинистый зуб плотины; 7 - суглинки иловатые, льдистость до 60%; 8 - пески с растительными остатками; 12 - скважины мерзлотной завесы; 13 – естественная поверхность земли; 14 - граница съема илов, торфов и почвенно - растительного слоя; 15 - верхняя граница коренных пород



Вид плотины Иреляхского гидроузла на р. Ирелях со стороны водохранилища.  
2011 г.

Из-за ненадлежащей работы мерзлотной завесы в основании и теле плотины Иреляхского гидроузла возникали очаги сосредоточенной фильтрации с выносом грунта, что привело к необходимости реконструкции замораживающей системы.



ходы фильтрации

Места выходов сосредоточенной фильтрации у подошвы плотины



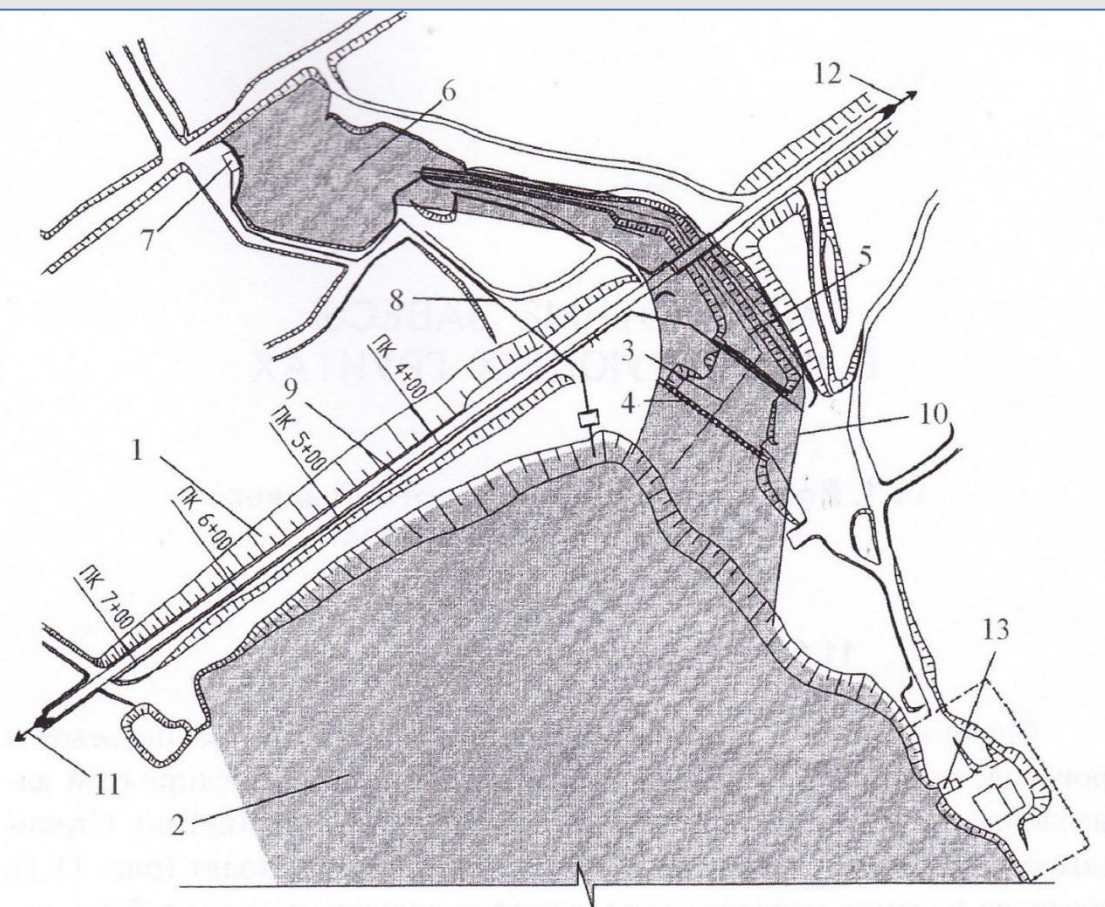
Аварийная ситуация в плотине, связанная с возникшей фильтрацией [Панов, 2011]





Конденсаторы парожидкостных СОУ на плотине Иреляхского гидроузла после реконструкции замораживающей системы в 2000-е гг.

## Плотина с мерзлотной завесой Сытыканского гидроузла на р. Сытыкан у г. Удачный в Якутии



Схематичный план Сытыканского гидроузла  
(по состоянию на декабрь 1995 г.):

- 1 – земляная плотина; 2 – водохранилище; 3 – ось подводящего канала водосброса; 4 – ледоудерживающее сооружение; 5 – отводящий канал водосброса; 6 – емкость сбора профильтрованной воды; 7 – насосная возврат профильтрованной воды; 8 – магистраль возврата профильтрованной воды; 9 – замораживающая система воздушного типа; 10 – граница талика; 11 – дорога в пос. Полярный; 12 – дорога в города Удачный и Мирный; 13 – насосная водоснабжения жилых населенных пунктов и предприятия

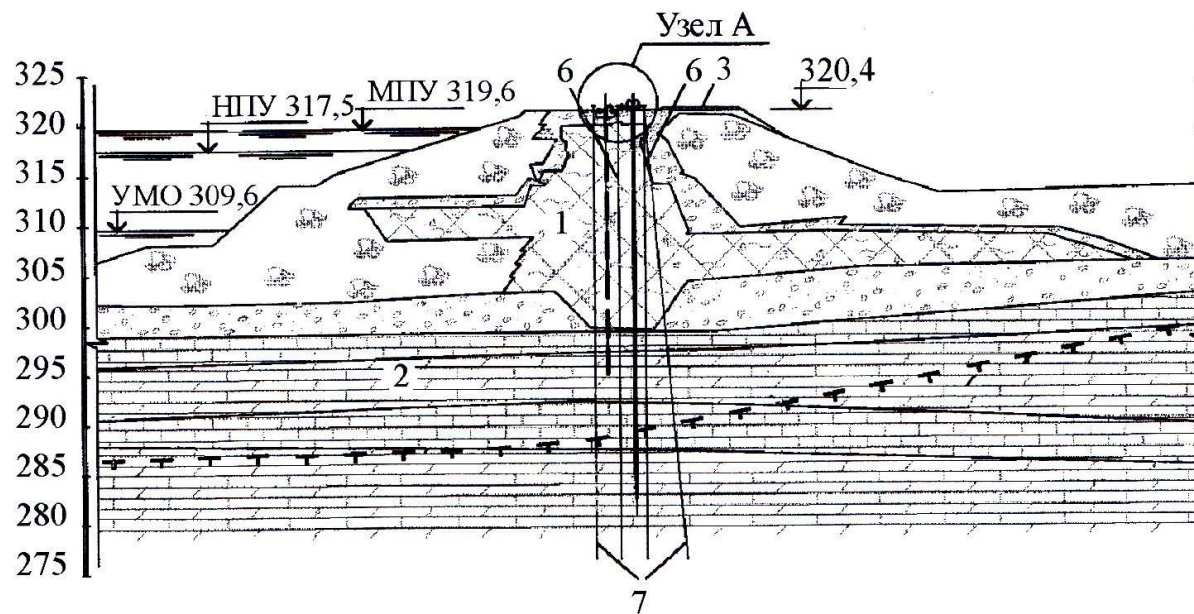
Среднегодовая температура воздуха в районе  $-12,7$  С.

Строительство гидроузла завершено в 1977 г. Длина плотины 600 м, высота 21 м, ширина гребня 16 м. Ядро из суглинка со щебнем до 45 %, призмы из вскрышных пород.

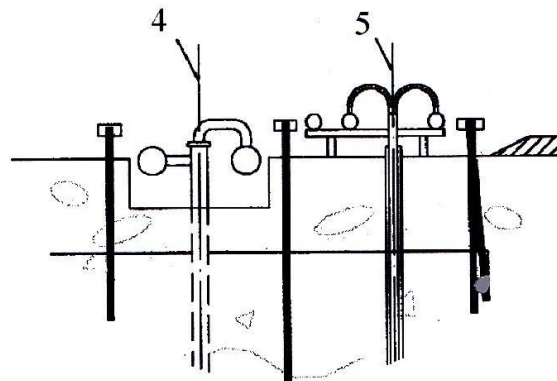
Система замораживания воздушная (ВВК). На правобережном участке в 2000-е гг. добавлена жидкостная замораживающая система с вынужденной циркуляцией хладоносителя – керосина (ЖВК) [Федосеев, 2009].



Вид плотины Сытыканского гидроузла на р. Сытыкан со стороны водохранилища.  
2011 г.



Узел А. Замораживающие системы

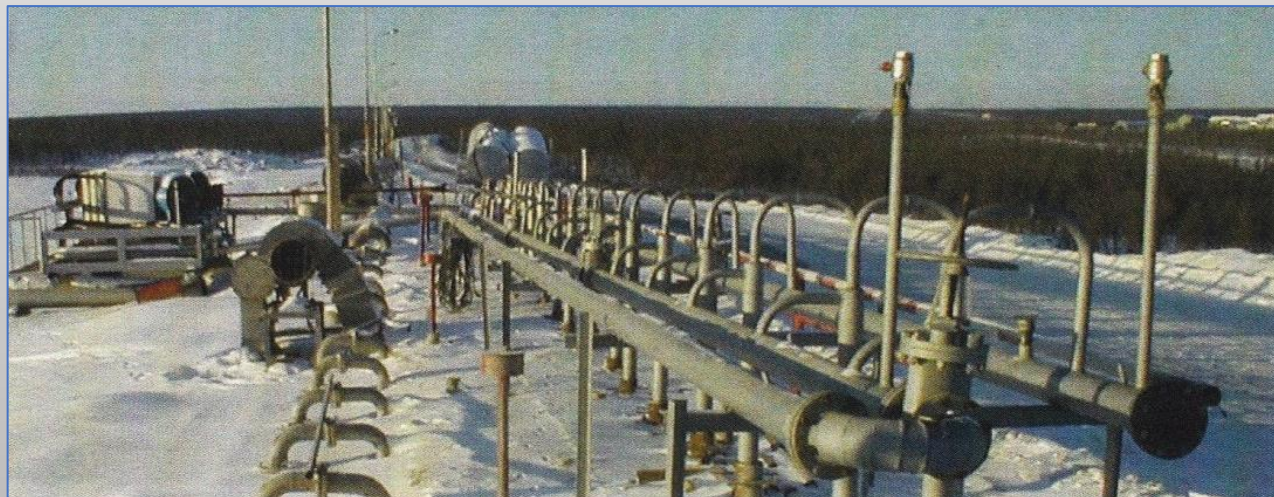


Поперечный разрез плотины Сытыканского гидроузла:

- 1 – ядро; 2 – грунты основания; 3 – автодорога по гребню;
- 4 – ось существующей замораживающей системы типа ВВК;
- 5 – ось новой замораживающей системы типа ЖВК;
- 6 – цементационные скважины, переоборудованные в термоскважины;
- 7 – дополнительные термоскважины



Вид на замораживающие системы плотины Сытыканского гидроузла от правого берега летом и зимой: слева - воздушная система (ВВК), справа - жидкостная (ЖВК). Глубина колонок до 52 м, шаг 1,5 м



Жидкостная замораживающая система (ЖВК) на плотине Сытыканского гидроузла разделена на участки замораживания с узлами охлаждения керосина наружным воздухом [Федосеев, 2009].

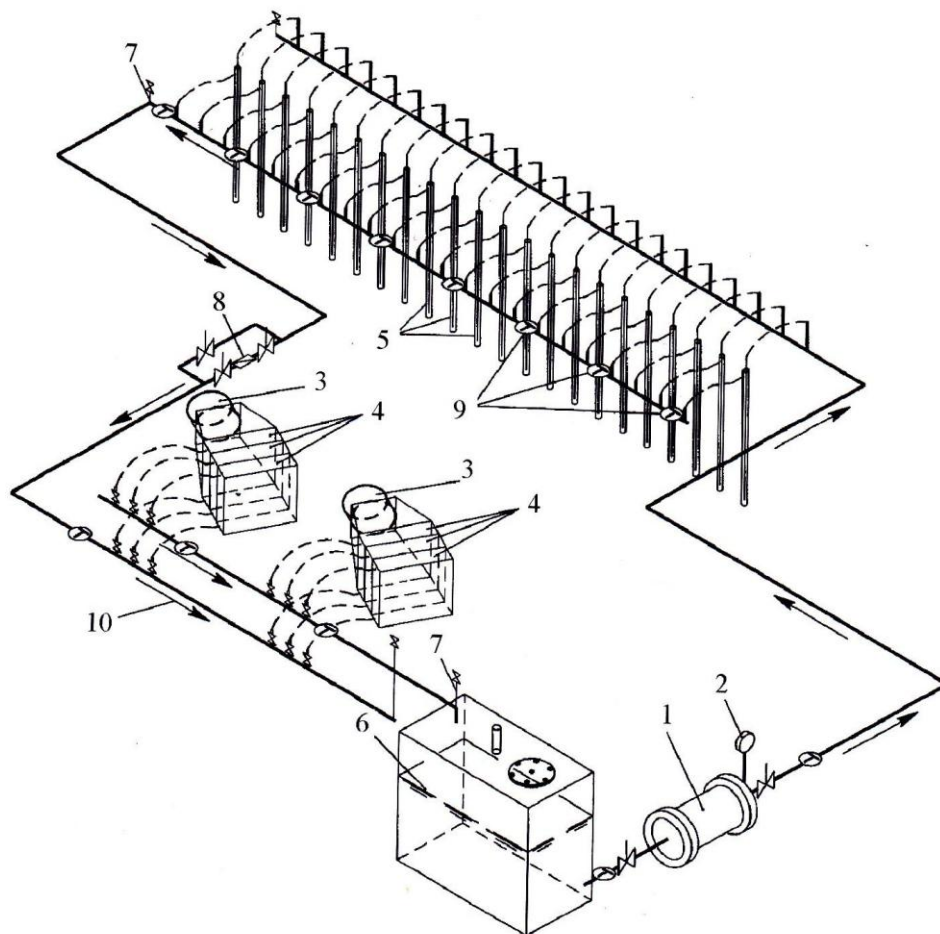


Схема циркуляции хладагента на участках замораживания:  
 1 – насос; 2 – манометр; 3 – вентиляторы; 4 – калориферы;  
 5 – замораживающие колонки; 6 – аккумулирующая емкость;  
 7 – трубки для отвода воздуха; 8 – расходомер; 9 – герметичный патрубок  
 для термометра в трубопроводе; 10 – направление движения хладагента

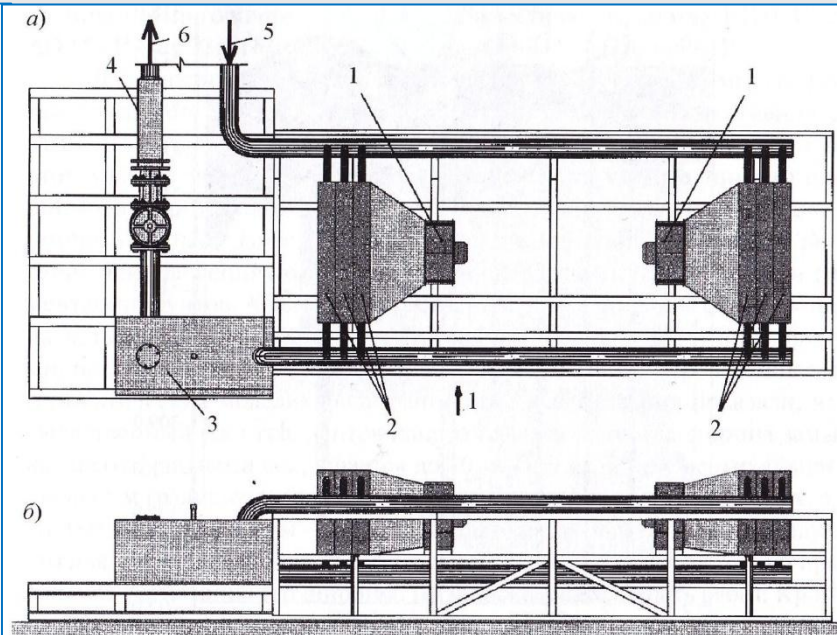


Схема узла охлаждения керосина наружным воздухом:

*a* – план; *б* – вид I;

1 – вентиляторы ВО-14-320-8; 2 – калориферы КВБ-11Б-П; 3 – емкость;

4 – насос 1ЦГ 100/32К-15-1; 5 – подача хладагента от колонок;

6 – подача хладагента к колонкам

## Плотина с мерзлотной завесой гидроузла на р. Ойуур – Юреге у п. Айхал в Якутии

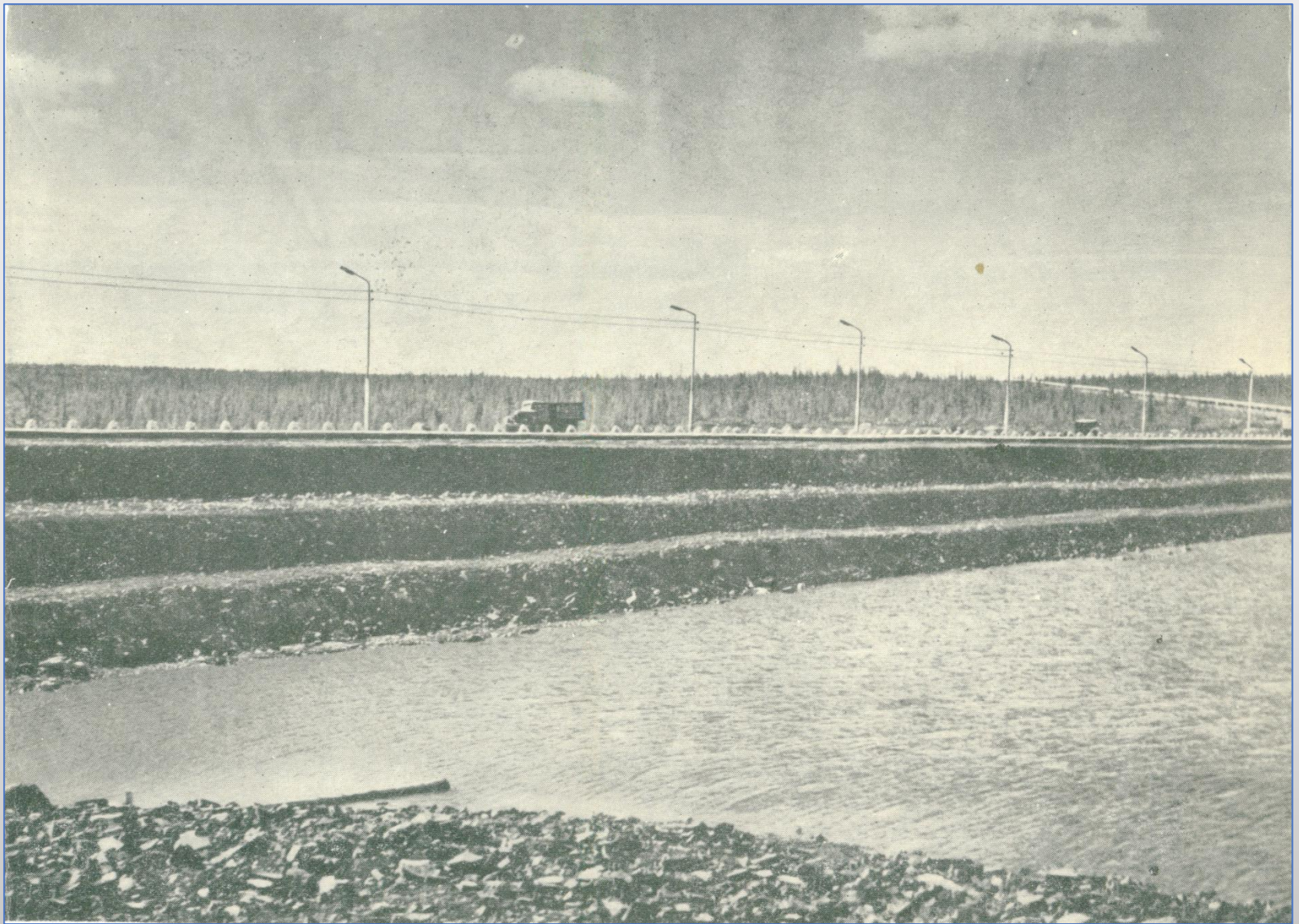
Гидроузел эксплуатируется с 1972 г. Плотина насыпная каменно-земляная. Высота плотины 11 м, длина по гребню 635 м, ширина гребня 18 м. Плотина оборудована замораживающей системой.



Вид гидроузла и водохранилища на р. Ойуур-Юреге. 2011 г.



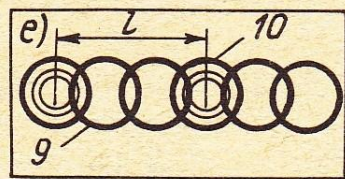
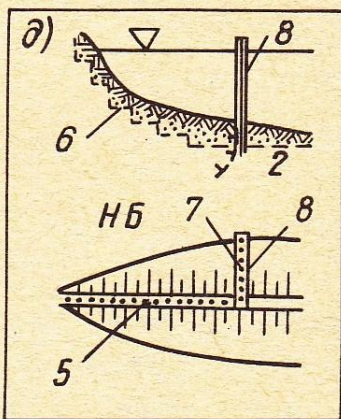
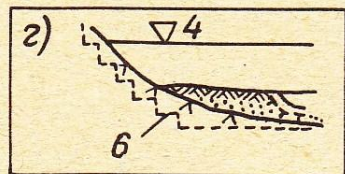
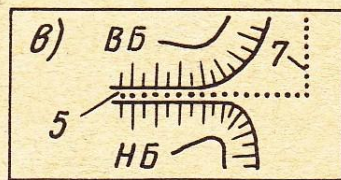
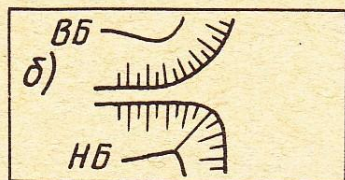
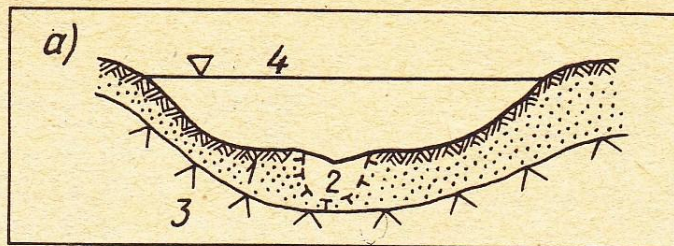




Вид плотины с мерзлотной завесой гидроузла на р. Ойуур-Юреге со стороны водохранилища. 1970 – е гг.

## Сопряжение мерзлых плотин с берегами

Опасно оттаивание льдистого берега и возникновение фильтрации в обход плотины. Плотину в береговых примыканиях уширяют. Мерзлотную противофильтрационную завесу заводят в берега.



Схемы сопряжений [Бучко, 1978]:

а, б, в – мерзлотная завеса вдоль гребня, уширения профиля у примыкания, в некоторых случаях продольная завеса;

г – мерзлотная завеса, примыкающая к скальному берегу;

д – то же, к нескальному берегу;

е – раздельная стенка между талой и мерзлой частями плотины;

1 – термопросадочный грунт; 2 – талик;

3 – кровля непросадочных грунтов; 4 – гребень плотины; 5 – замораживающая колонка;

6 – нижняя граница мерзлотной завесы;

7 – колонки дополнительной системы СОУ;

8 – раздельная стенка; 9 – буровые скважины, заполняемые бетоном;

10 – колонка мерзлотной завесы в буробетонной стенке

## Использование льда для строительства временных плотин

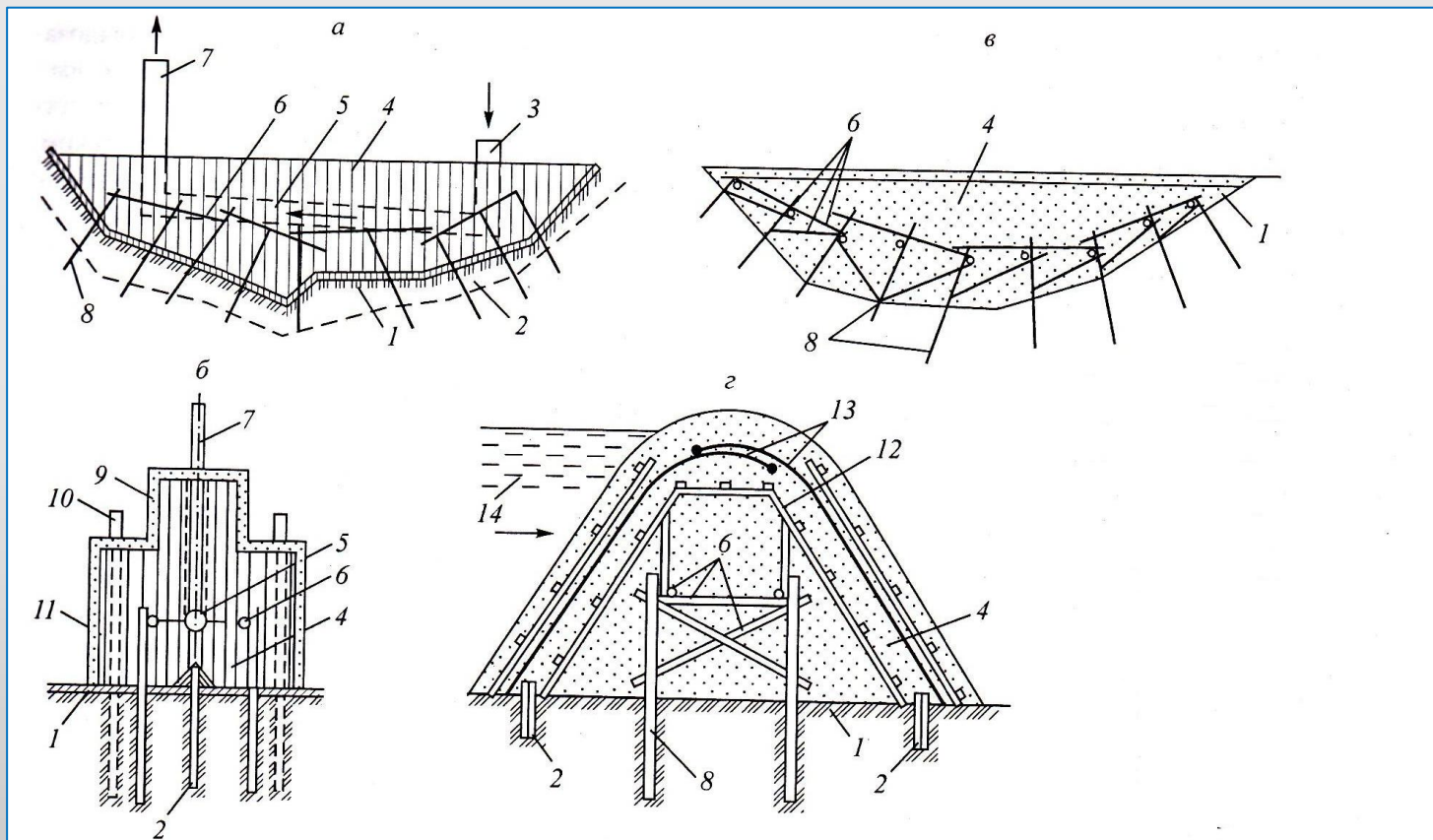
❑ Лед – это вода в твердом состоянии.

- ❖ Температура плавления льда при нормальном атмосферном давлении принята за  $0^{\circ}\text{C}$ . Превращение воды в лед происходит при некотором ее переохлаждении.
- ❖ Теоретическая плотность льда  $931 \text{ кг/м}^3$ .
- ❖ Предел прочности на сжатие монокристаллического льда при температуре минус  $(0 - 10)^{\circ}\text{C}$  равен  $0,8 - 1,4 \text{ Мпа}$ , на растяжение  $0,9 - 1,2 \text{ Мпа}$ .
- ❖ Коэффициент теплопроводности льда при температуре минус  $16 - 40^{\circ}\text{C}$  равен  $2,18 - 2,22 \text{ Вт/(м}\cdot\text{град)}$ .



В строительстве применяют искусственный лед, формирующийся при послойном или брызговом намораживании воды. Для повышения механической прочности лед армируют ветвями деревьев, опилками, гравием, стекловолокном и др. [Алексеев, 2007] .

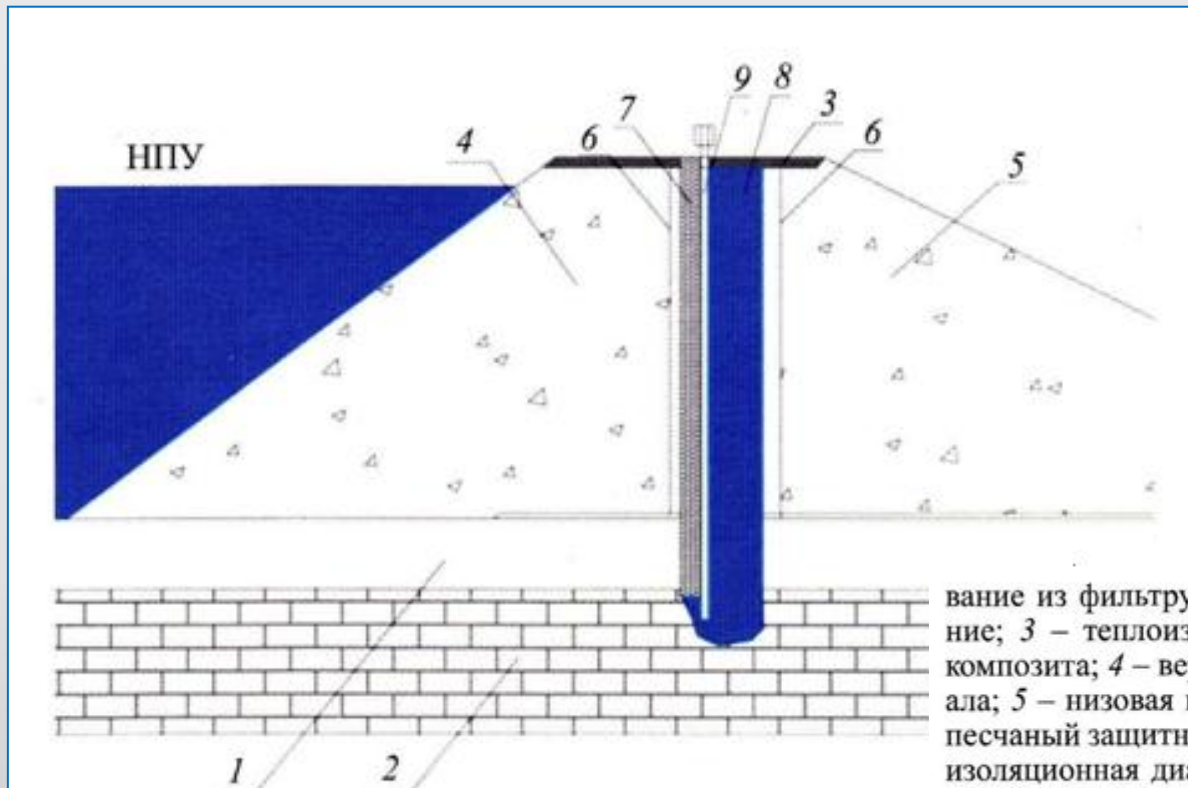
В Якутии строят ледовые плотины на перемерзающих реках с целью аккумуляции стока для лиманного орошения лугов, для предупреждения от промерзания дражных полигонов и др. Для предотвращения всплытия плотины крепят к основанию наклонными сваями [Вдовин, 1987].



**Ледовые плотины различных видов.**

*а, б* — разрезы ступенчатой плотины, *в, г* — то же с полимерным экраном, *д* — деталь противофильтрационной завесы.  
*1* — грунт, *2* — противофильтрационный экран, *3* — проморозка, *4* — лед, *5* — охлаждающий канал, *6* — ригели, *7* — вытяжка, *8* — наклонные сваи, *9* — пористый лед, *10* — термоскважина, *11* — известковый раствор, *12* — рейки, *13* — полимерная пленка, *14* — вода

## Предложение о применении грунтово - криогелевых композитов в конструкциях мерзлых плотин [Васильев, 2013]



Устройство  
противофильтрационной  
и теплоизоляционной защиты  
в плотине мерзлого типа:

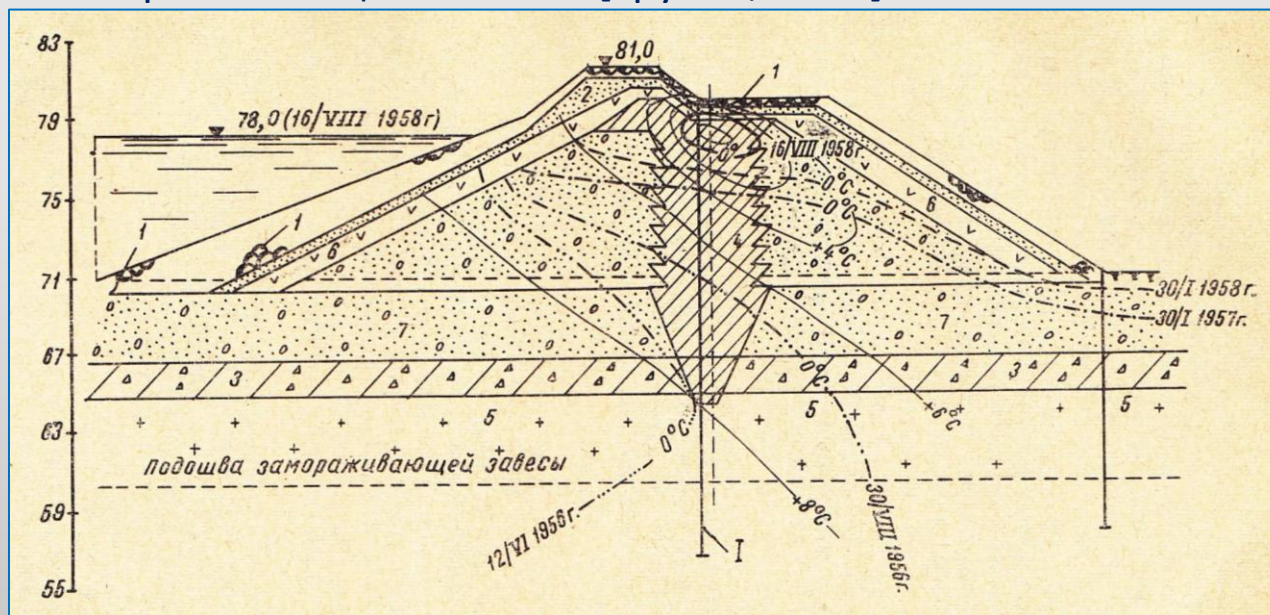
1 – оттаивающее основание из фильтрующего материала; 2 – вечномёрзлое основание; 3 – теплоизоляционный слой из грунтово-криогелевого композита; 4 – верховая призма из каменнонабросного материала; 5 – низовая призма из каменнонабросного материала; 6 – песчаный защитный слой; 7 – противофильтрационная и теплоизоляционная диафрагма из криогелевого грунтового композита; 8 – мерзлотная завеса; 9 – сезонно-охладительные устройства (СОУ)

ОПЫТ: в основании мерзлой грунтовой плотины Иреляхского гидроузла развивавшаяся по трещинам фильтрация была остановлена путем закачки криогелеобразующего раствора через пробуренные скважины.

# Изменение типа грунтовых плотин в период эксплуатации

## Земляная плотина водохранилища Аркагалинской ГРЭС на р. Мяунджа

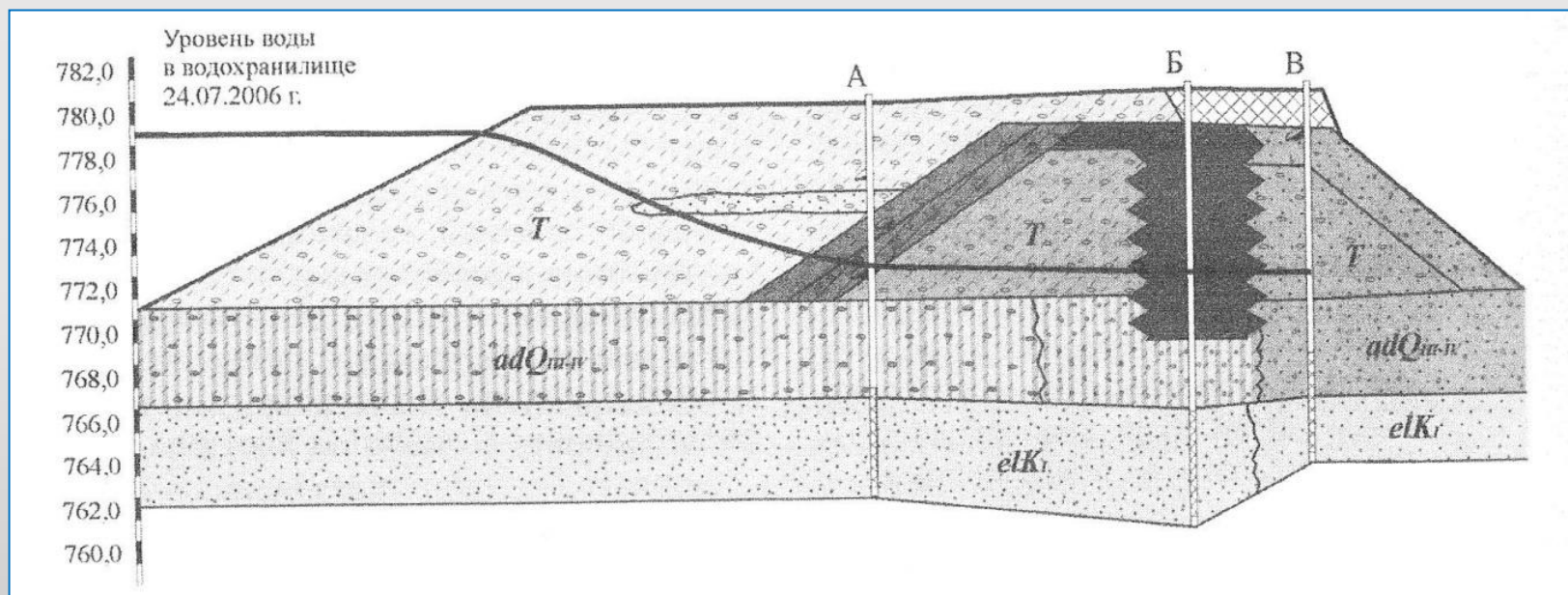
Плотина сооружена в 2 очереди: первая до отметки 75,5 м (1952 – 1954 гг.), вторая – до отметки 81,5 м на полную высоту 11,5 м и длину 860 м (1954 – 1959 гг.) как мерзлая по изначальному проекту в районе со среднегодовой температурой воздуха минус 12,7 °С. С 1953 г. в плотине начала функционировать воздушная, а с 1957 г. жидкостная замораживающая система [Трупак, 1970]



Поперечный профиль плотины на р. Мяунджа на пикете 0+25 м с показанием изотерм:

1 — замораживающая колонка; 1 — каменная отмостка; 2 — песок; 3 — щебенистый суглинок основания; 4 — суглинистое ядро; 5 — андезито-базальты сильнотрециноватые; 6 — торфяной экран; 7 — галька, гравий, песок

Замораживающие системы не смогли остановить процесс оттаивания грунтов на фильтрующих участках плотины, сопряженных с подземными фильтрационными потоками. К концу 1970 – х гг. тело плотины было расширено на 40 м, с 1990 – х гг. прекратили эксплуатацию замораживающей системы, к 2001 г. закончилась деградация мерзлых грунтов в теле плотины и плотина перешла полностью на талый режим эксплуатации [Гулый, 2011].

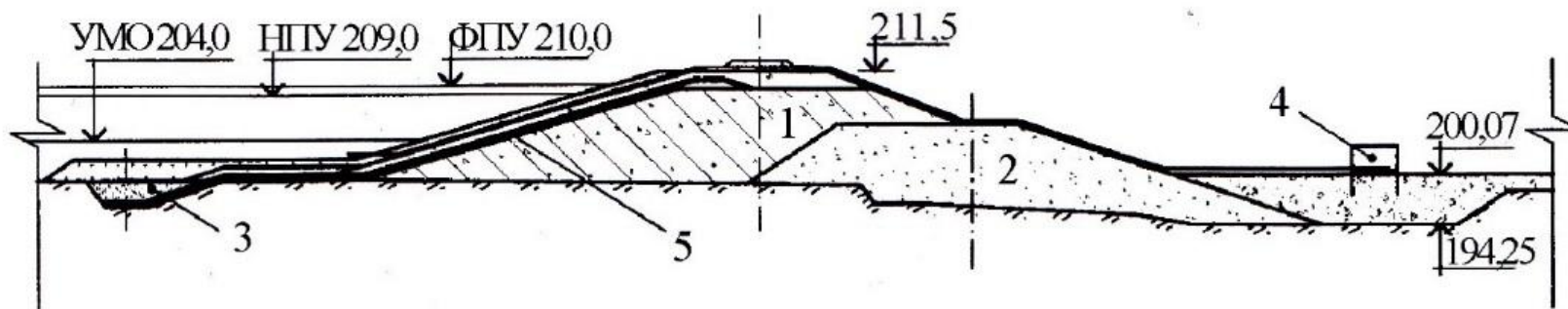


Земляная плотина водохранилища Аркагалинской ГРЭС:

T – техногенные грунты тела плотины; А, Б, В – пьезометрические скважины для установления поверхности депрессии

## Земляная плотина на руч. Безымянный (приток р. Мархи) в 300 км к северо-востоку от г. Мирный

Длина плотины 442 м, высота 13 м, емкость водохранилища 1,066 млн м<sup>3</sup>. Плотина построена зимой 2002 – 2003 гг. на мерзлом основании из мергелей, известняков и песчаников. Из-за сложившейся опасной фильтрационной обстановки к зиме 2003 – 2004 гг. оттаявшая зона была перекрыта цементационно-мерзлотной завесой. Впоследствии плотина перестроена. Водохранилище используется для водоснабжения Нюрбинского ГОК АК «АЛРОСА» [Федосеев, 2009].



Поперечный разрез по плотине:

- 1 – песчано-гравийно-галечниковая смесь с суглинком до 30%;
- 2 – низовая упорная призма; 3 – верховая траншея;
- 4 – дренажная насосная станция; 5 – геомембрана  $h = 2$  мм



# Водосбросы гидроузлов с грунтовыми плотинами

## Водосбросы при талых плотинах

Эксплуатационные водосбросы при талых плотинах устраивают обычно в виде открытых быстротоков в берегах.

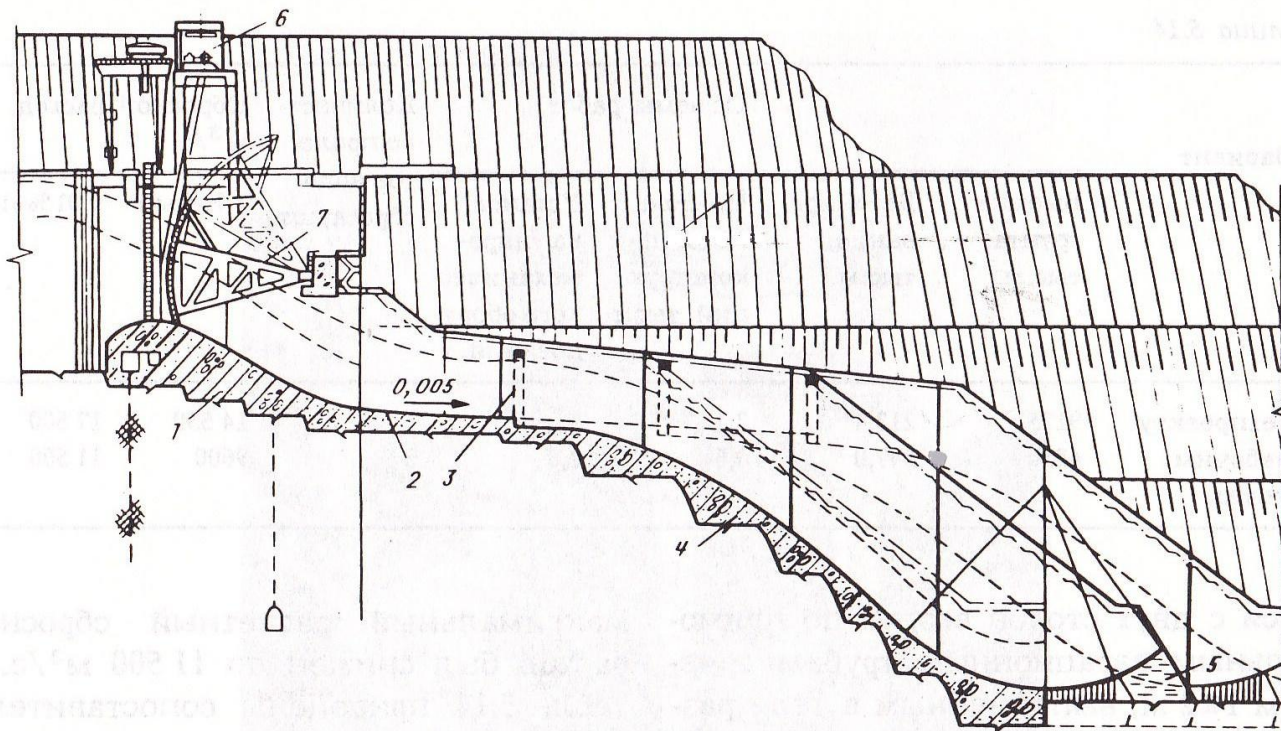


Эксплуатационный водосброс (быстроток) Вилуйского гидроузла на р. Вилуй, расположенный на правом берегу



Виды на головную часть (прямой водослив практического профиля шириной 40 м с сегментным затвором) и криволинейный в плане лоток быстротока Вилъюского гидроузла





1 – водосливной порог; 2 – слабонаклонный участок; 3 – аэрационная шахта; 4 – быстроток; 5 – трамплин; 6 – помещение подъемных механизмов; 7 – сегментный затвор

## Эксплуатационный водосброс (быстроток) Колымского гидроузла на р. Колыме

Быстроток трехпролетный с разделительными стенками общей шириной 45 м и длиной 220 м на расход 11500 м<sup>3</sup>/с.





Водосброс Курейского гидроузла на р. Курейке. Водослив продолжен быстротоком с консольным сбросом: ширина 76 м, длина 168 м.

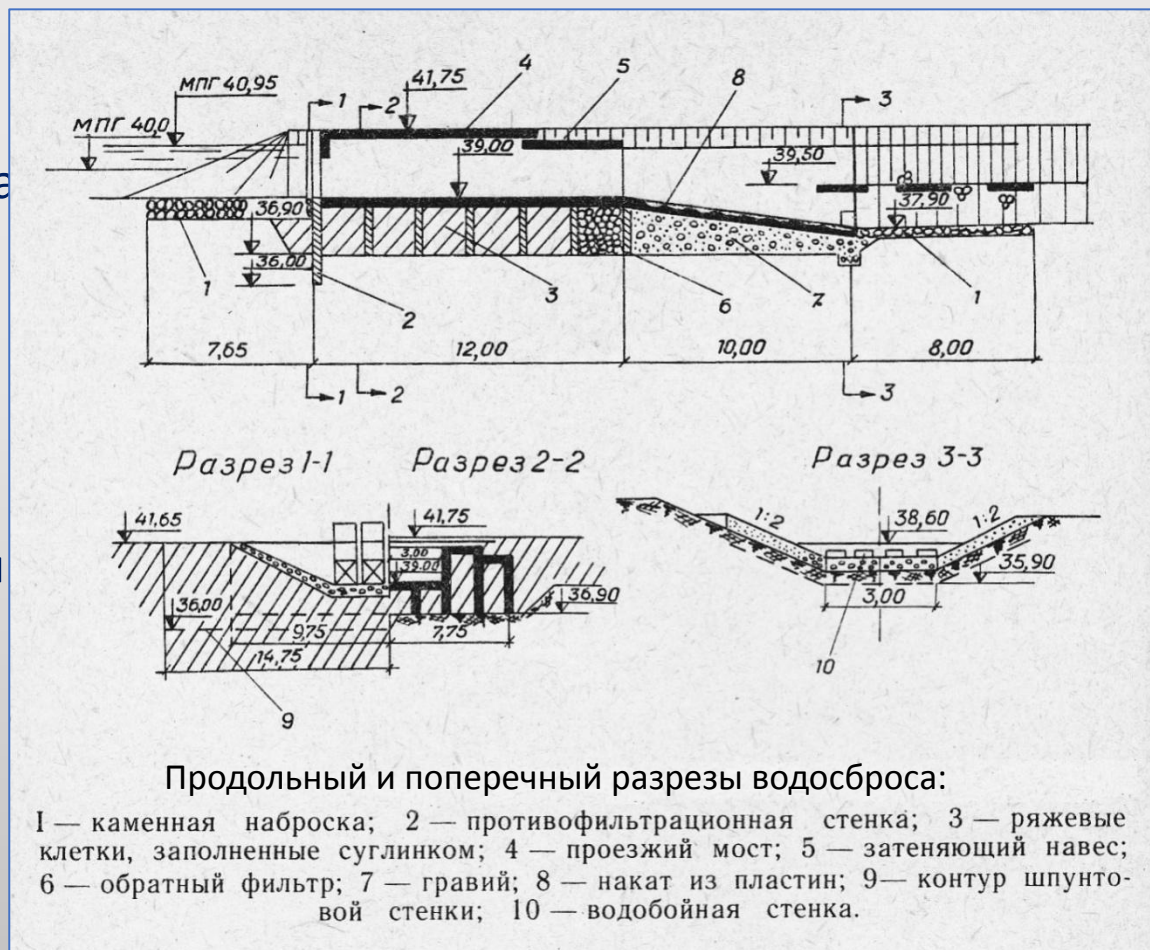


В Республике Саха (Якутии) построено много низконапорных гидроузлов сельскохозяйственного назначения с тальными грунтовыми плотинами и береговыми деревянными и бетонными водосбросами.

Главной водосброс-регулятор Хоробугской системы лиманного орошения

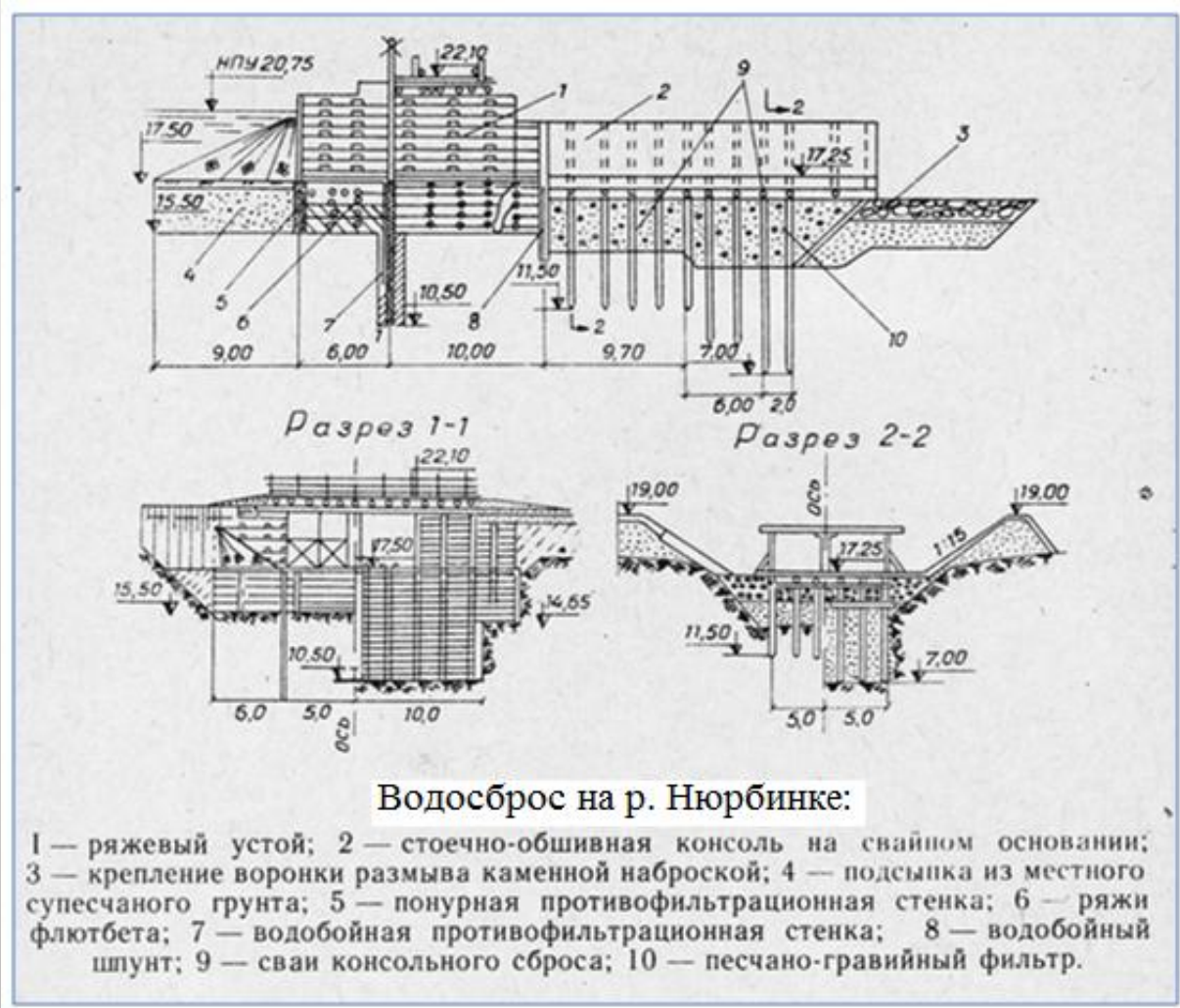
Построен в начале 1960-х гг. Флютбет водосброса ряжевый толщиной 2 м, заполненный суглинком. Ширина пролета 6 м. Напор на пороге 1 м. Расчетный расход воды 9,8 м<sup>3</sup>/с. Ряжи флютбета установлены зимой на мерзлые грунты.

В период эксплуатации деформаций водосброса не произошло, отмечена лишь осадка грунта в ряжах на 0,5 м [Проектирование, 1976].



## Водосброс ряжевой конструкции на р. Нюрбинке

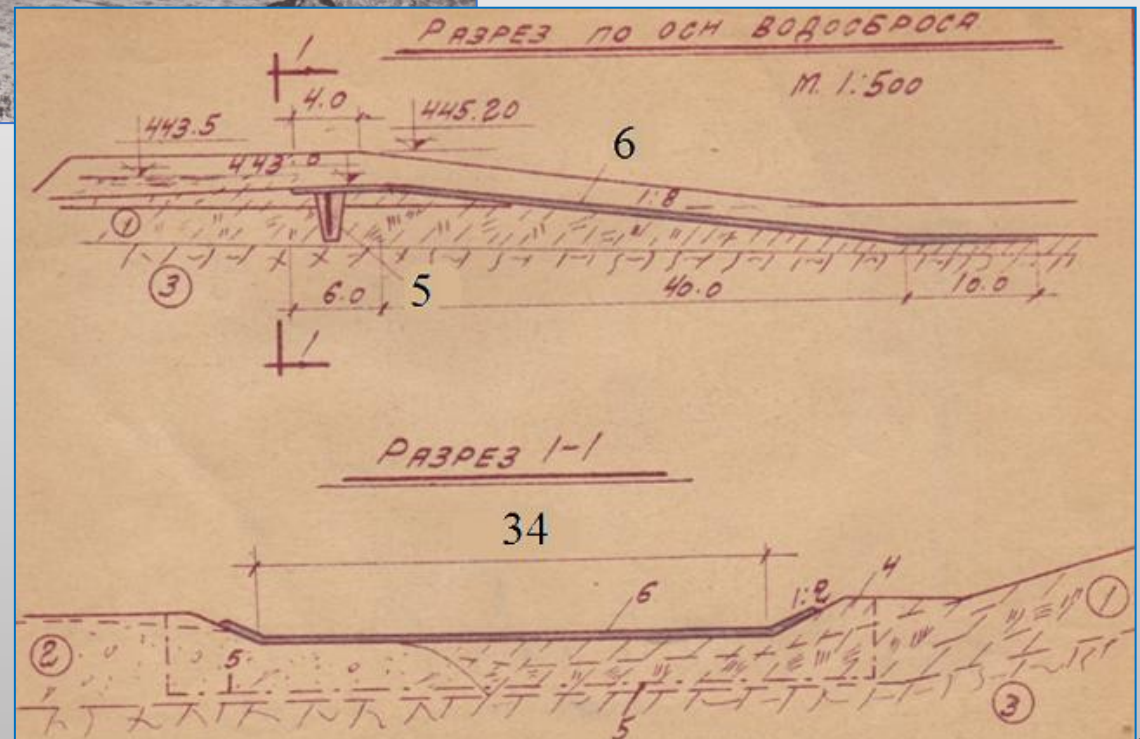
Водосброс построен в 1973 г. Ширина пролета 10 м. Расход воды  $70 \text{ м}^3/\text{с}$ . Ряжевые клетки понура установлены в русле реки на подрусловом талике мощностью 14-15 м, сложенном песчаным грунтом. К водобойной части примыкает стоечно-обшивной консольный лоток длиной 20 м на свайном основании.





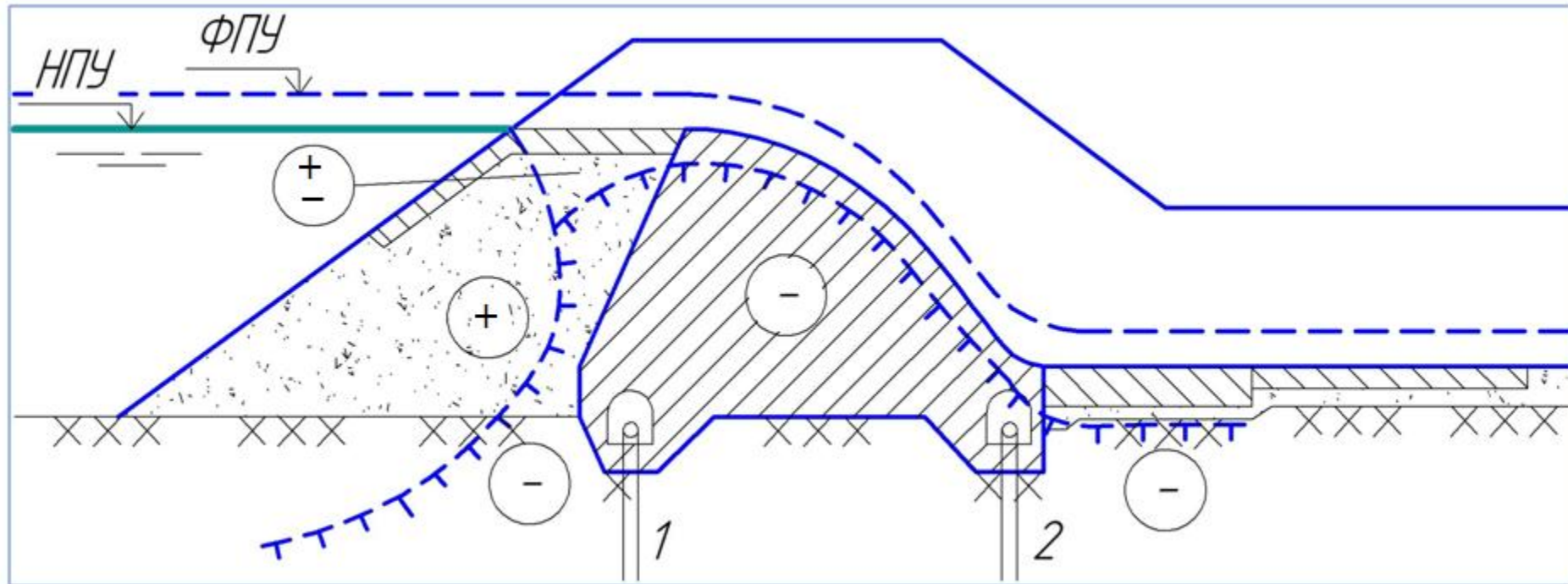
Береговой водосброс (быстроток) плотины на р. Ат-Урях простой конструкции без затворов в головной части. 1960 –е гг.

На чертеже:  
 1, 2, 3, 4 – мерзлые грунты;  
 5 – зуб в головной части быстротока;  
 6 – бетонное покрытие быстротока.



## Водосбросы при мерзлых плотинах

Водосбросы при мерзлых плотинах являются наиболее слабым местом в напорном фронте гидроузлов.



Принципиальная схема бетонного водосброса при мерзлой плотине  
[Богословский, 1958]:

⊕ ⊖ ⊕- - зоны различного температурного состояния;

1 – основной ряд охлаждающих скважин;

2 – водобойный ряд охлаждающих скважин



## Особенности конструкции бетонного водосброса при мерзлой плотине

1. Водосброс целесообразно располагать вне тела плотины (берегового типа).
2. Водосброс должен пропускать через себя воду в возможно более короткий срок, чтоб избежать прогревания конструкции.
3. Лучше устраивать водосброс автоматического действия: нет утечки через затвор, нет трудностей в эксплуатации.
4. Бетонный массив водосброса следует располагать в зоне постоянно мерзлого грунта. Чтобы обеспечить это, с верховой стороны следует отсыпать упорную призму, служащую теплоизолятором. В этой призме следует располагать границу раздела зоны талого и мерзлого грунта.
5. Для промораживания бетонного массива и основания следует предусматривать замораживающую систему.
6. В нижнем бьефе (на водобое) не должна находиться вода при неработающем водосбросе во избежание оттаивания основания (водобой проектируется с уклоном).
7. Замораживающие завесы плотины и водосброса должны сопрягаться между собой.

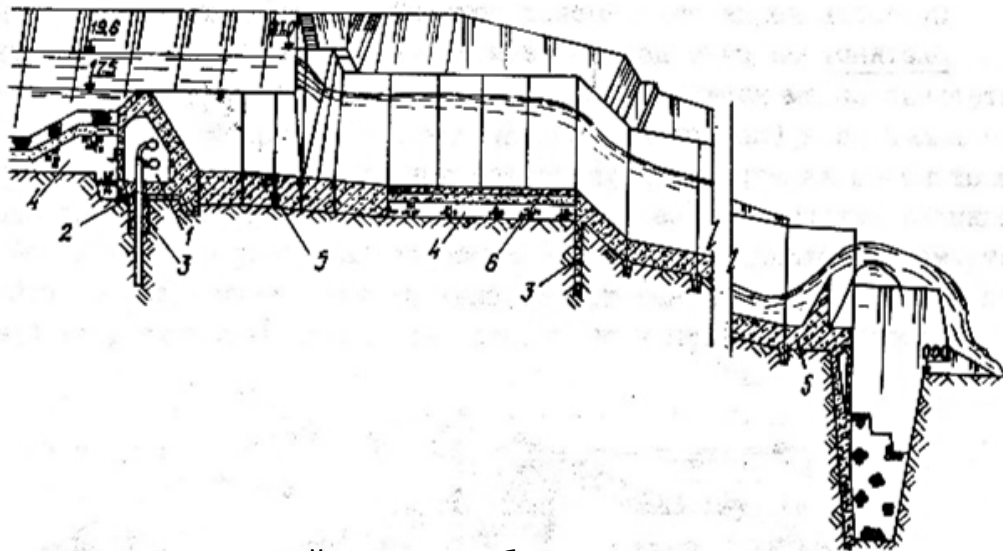
## Береговой паводковый водосброс Иреляхского гидроузла на р. Ирелях



Водосброс представляет собой водослив практического профиля автоматического действия (без затворов), продолженный каналом, затем многоступенчатым перепадом. В створе гидроузла под водосбросом имеется воздушная замораживающая система из горизонтальных труб.

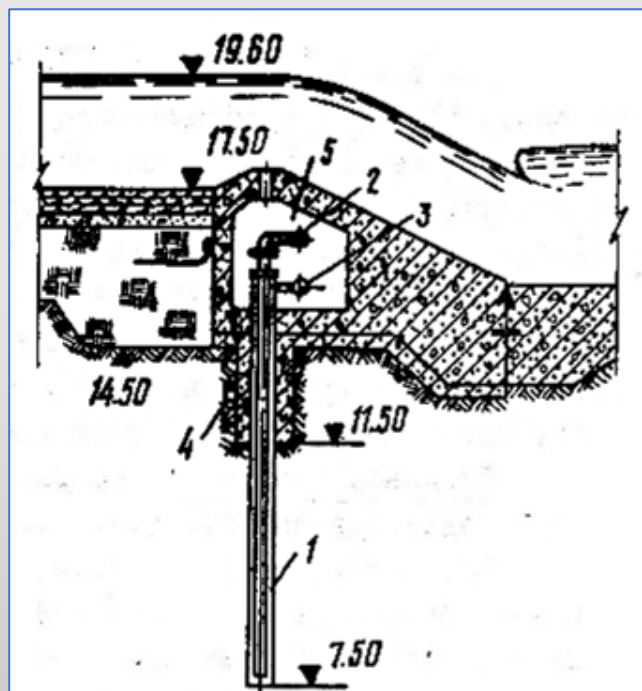
## Береговой паводковый водосброс Сытыканского гидроузла на р. Сытыкан

Представляет собой быстроток переменного уклона. Под порогом водосброса устроена мерзлотная противофильтрационная завеса из вертикальных воздушных замораживающих колонок. Нагнетательный и отводящий коллекторы замораживающей системы размещены в закрытой потерне, устроенной в пороге водосброса.



Продольный разрез по береговому паводковому водосбросу гидроузла на р. Сытыкан:

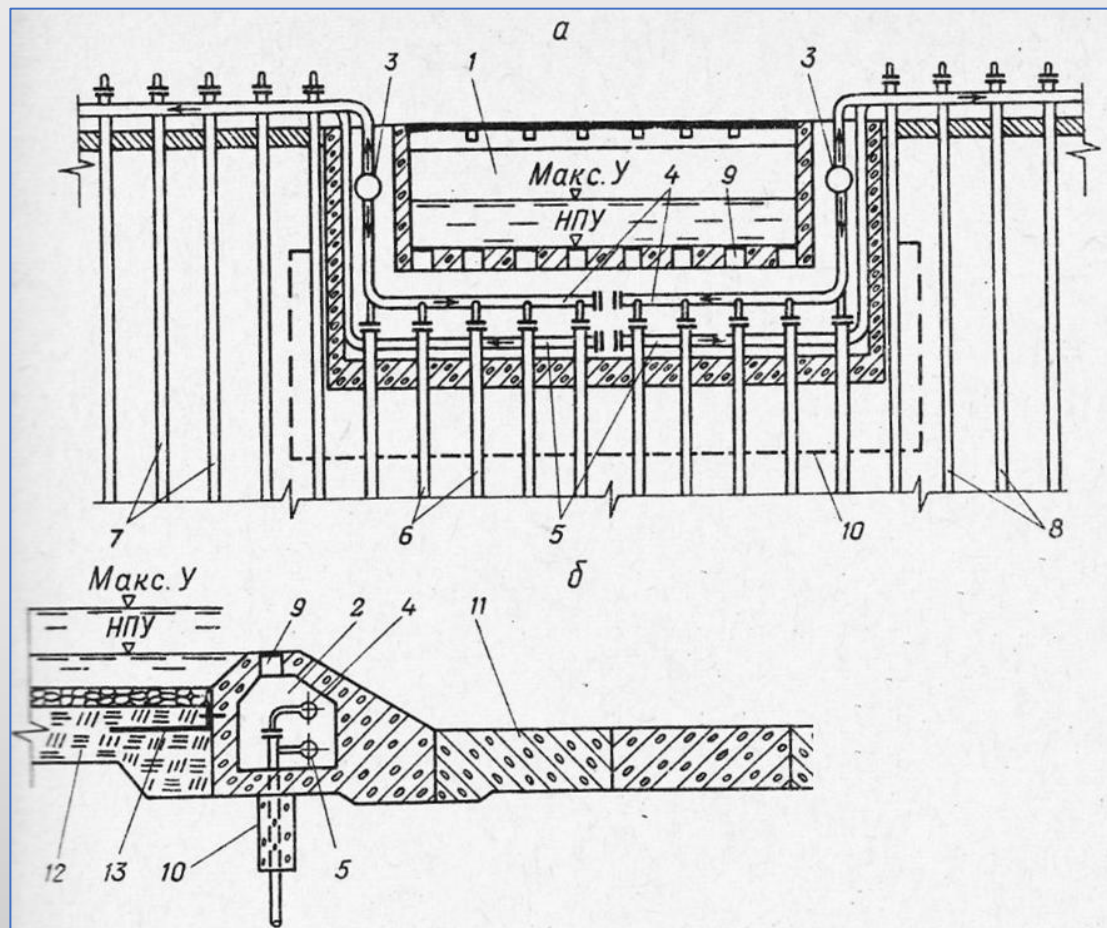
1 - потерна; 2 - двухколлекторная воздушная замораживающая система; 3 - буробетонный зуб; 4 - суглинок; 5 - монолитное железобетонное крепление с противофильтрационными уплотнениями; 6 - крепление сборными железобетонными плитами на песчано-гравийной подготовке



Конструкция воздушной замораживающей установки на водосбросе гидроузла на р. Сытыкан:

1 - мерзлотная колонка; 2 - подводящий коллектор; 3 - отводящий коллектор; 4 - бетонная стенка; 5 - потерна

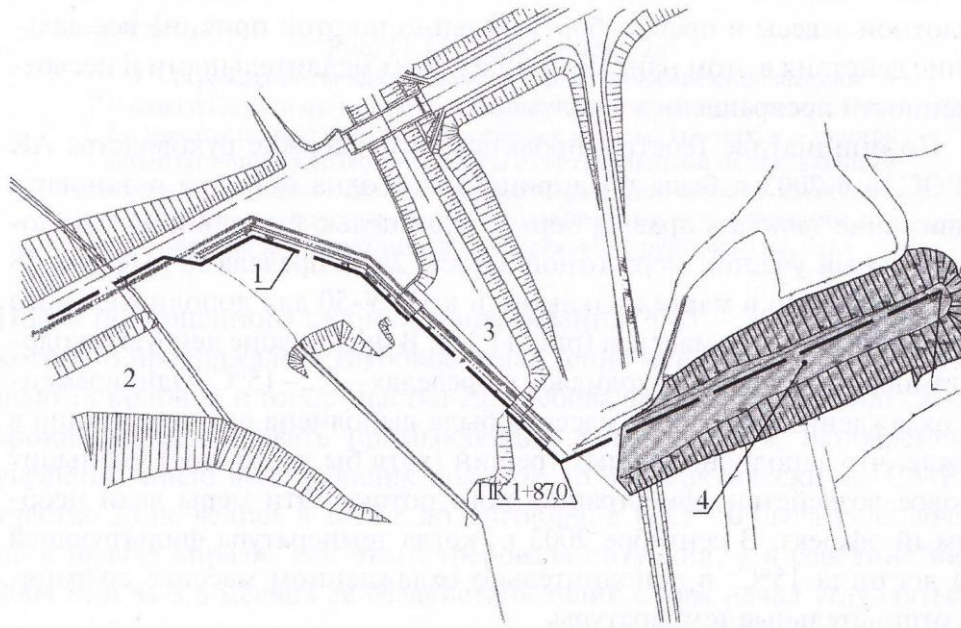
# Схема сопряжения замораживающих систем под водосбросом и в теле ПЛОТИНЫ



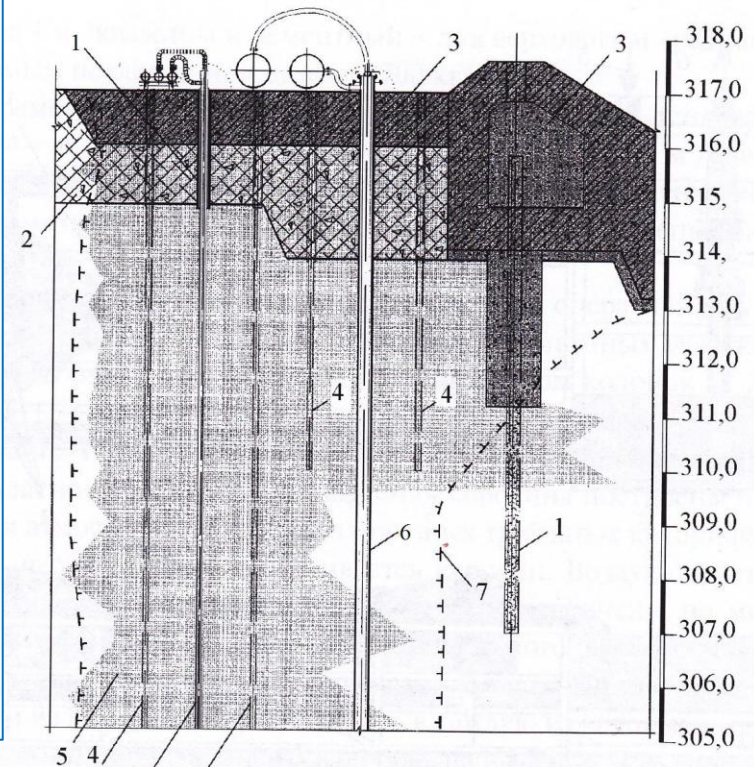
а – разрез по оси системы замораживающих колонок; б – разрез по водосливу;  
1 – отверстие водослива; 2 – галерея под железобетонным водосливом;  
3 – нагнетательный вентилятор; 4 – подающий и 5 – отводящий коллекторы;  
6 – замораживающие колонки под водосливом водосброса; 7 – то же по правому плечу плотины; 8 – то же по правому борту водосброса; 9 – смотровые люки;  
10 – бетонный зуб; 11 – водой; 12 – суглинистый понур; 13 – асфальтовый мат

# Новое проектное решение цементационно-мерзлотной завесы на участке водосброса Сытыканского гидроузла

Предусматривается цементация грунтового массива, вмещающего новую мерзлотную завесу с жидкостной системой замораживания и действующую завесу с воздушной системой замораживания [Федосеев, 2009].



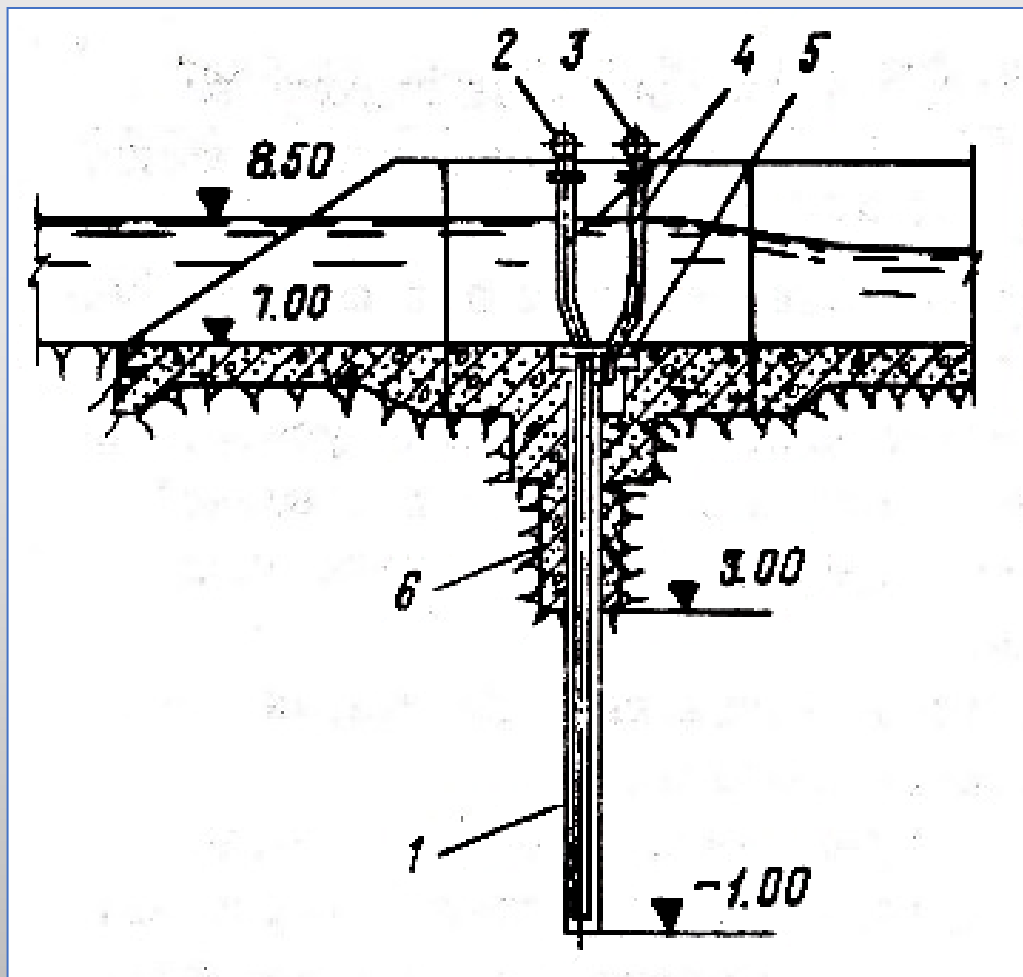
План правобережной части гидроузла с выемкой для выполнения цементационно-мерзлотной завесы:  
1 – ось проектируемой мерзлотной завесы; 2 – плотина; 3 – водосброс;  
4 – правобережная выемка



Цементационно-мерзлотная завеса на участке оголовка водосброса (проектный вариант):  
1 – колонки действующих замораживающих систем воздушного типа; 2 – суглинок;  
3 – бетон; 4 – цементационные скважины;  
5 – зацементированные грунты; 6 – замораживающие колонки мерзлотной завесы жидкостного типа; 7 – предполагаемая граница мерзлотной завесы

## Воздушная замораживающая установка на водосбросе гидроузла Ойуур-Юреге

В основании водосброса применена воздушная двухколлекторная замораживающая система с вертикальными колонками, размещенными на пороге водосброса. Для защиты системы от повреждения потоком воды и льдом замораживающие колонки на время паводка оснащаются съемными вставками.



Конструкция воздушной замораживающей установки на водосбросе гидроузла Ойуур-Юреге:

- 1 – мерзлотная колонка;
- 2 – подводящий коллектор;
- 3 – отводящий коллектор;
- 4 – соединительные вставки;
- 5 – ниша для консервации колонок;
- 6 – бетонная стенка

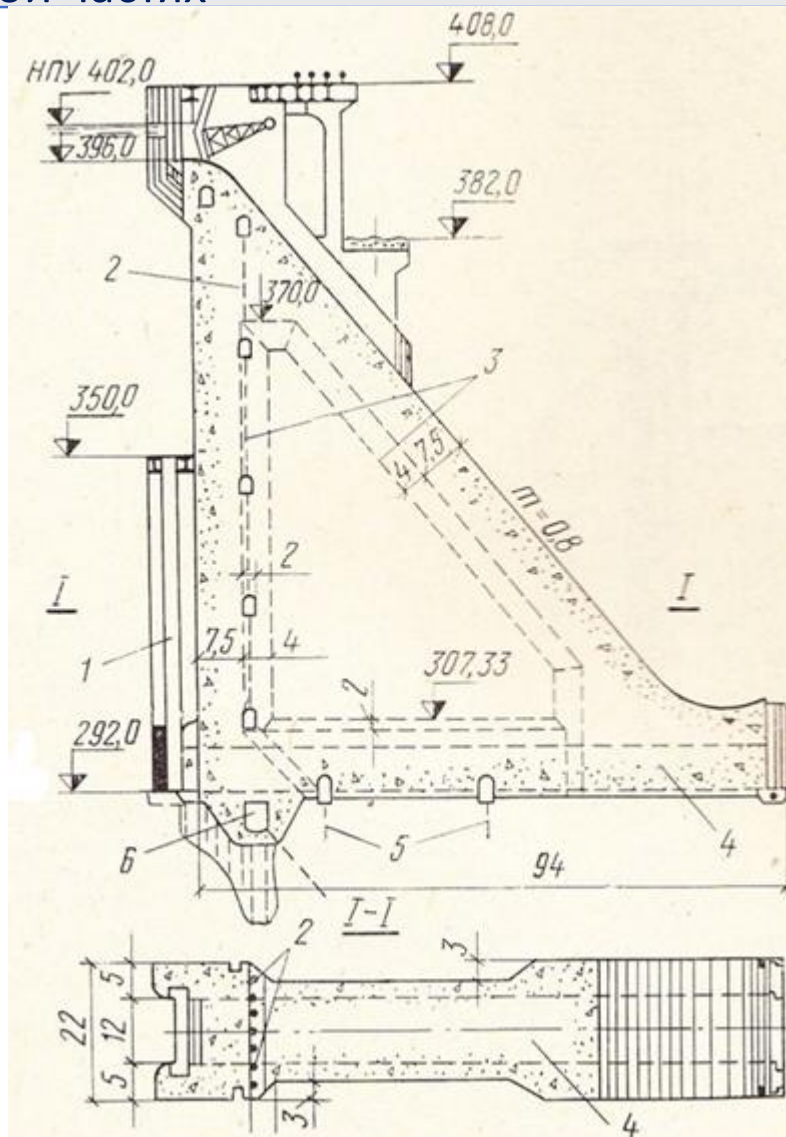
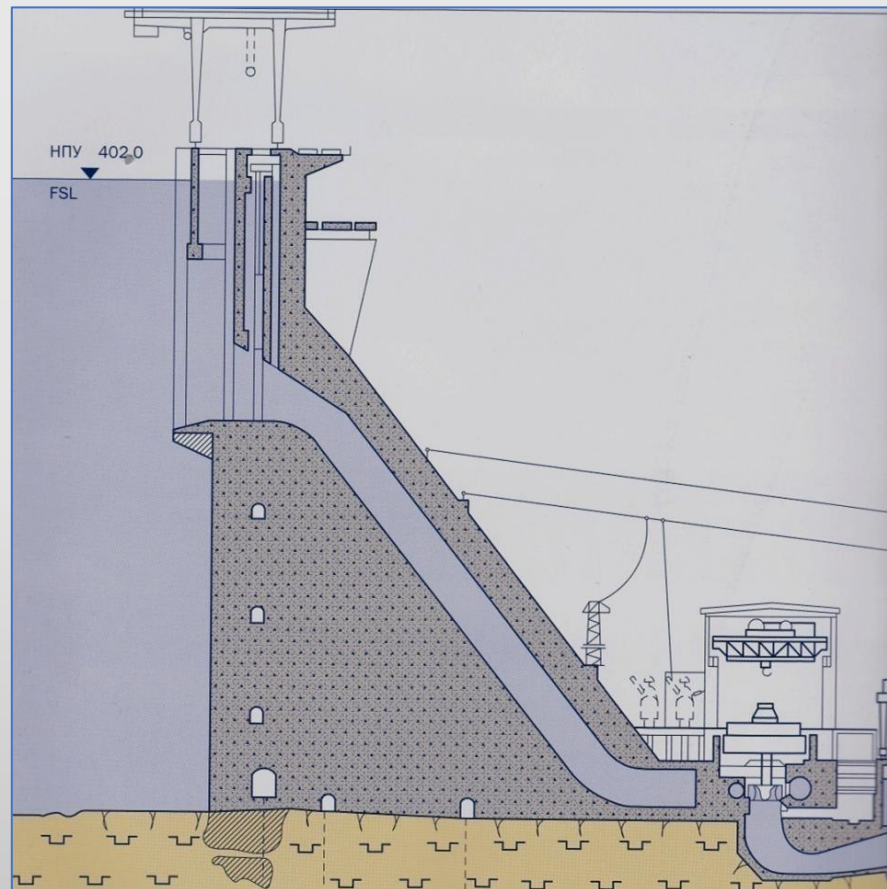
# Бетонные плотины в зоне сурового климата

В зоне сурового северного климата и островной мерзлоты на скальных основаниях построены бетонные плотины некоторых сибирских гидроэлектростанций.



Бетонная гравитационная плотина Братской ГЭС на р. Ангаре, 125м, 1967 г.  
В станционной части плотина массивная, в водосливной части – с расширенными швами.

# Разрезы бетонной гравитационной плотины Братской ГЭС в станционной и водосливной частях



1 — бычки для временных (строительных) затворов; 2 — дренаж тела плотины; 3 — контур расширенного шва; 4 — временное донное отверстие на период строительства; 5 — дренаж основания; 6 — цементационная галерея



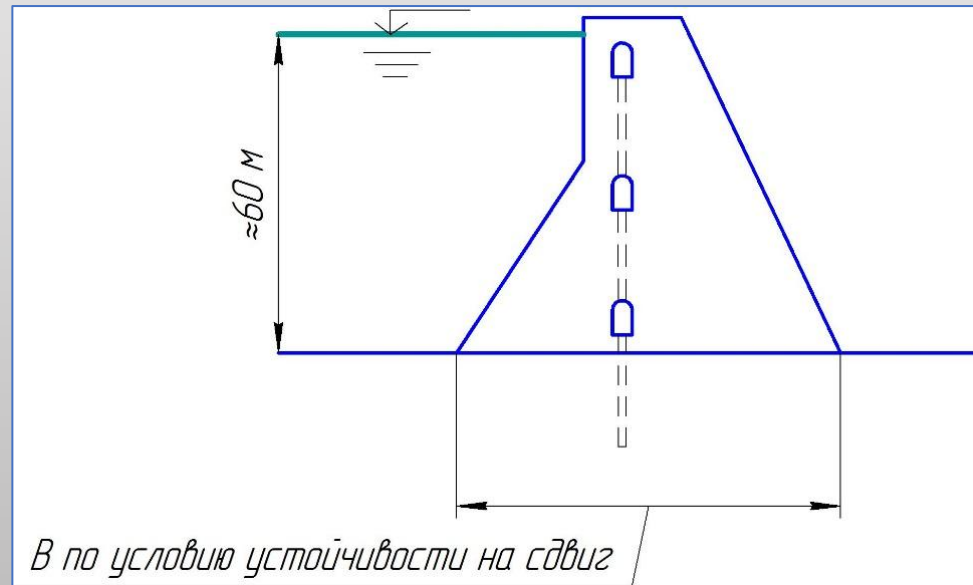
## Предложения по строительству мерзлых бетонных плотин

➤ При строительстве бетонных плотин проявляется **экзотермия** бетона – твердеющий бетон нагревается, трескается, поэтому нельзя бетонировать большие объемы, а требуется плотину разрезать на блоки бетонирования. Это замедляет темп строительства.

➤ Известно: чем меньше воды в бетоне, тем меньше он греется при твердении.

В 1970-х гг. предлагали делать жесткий бетон, укладывать его слоями во всю ширину плотины в плане, трамбовать тракторами. Потом пусть он замерзнет. Плотина будет эксплуатироваться в мерзлом состоянии. Мерзлый бетон – водонепроницаем и прочен.

Рассматривался вариант таких плотин в проектах Колымской ГЭС, Мокской ГЭС на р. Витим [Куперман, 1987].



# Накопители промышленных отходов

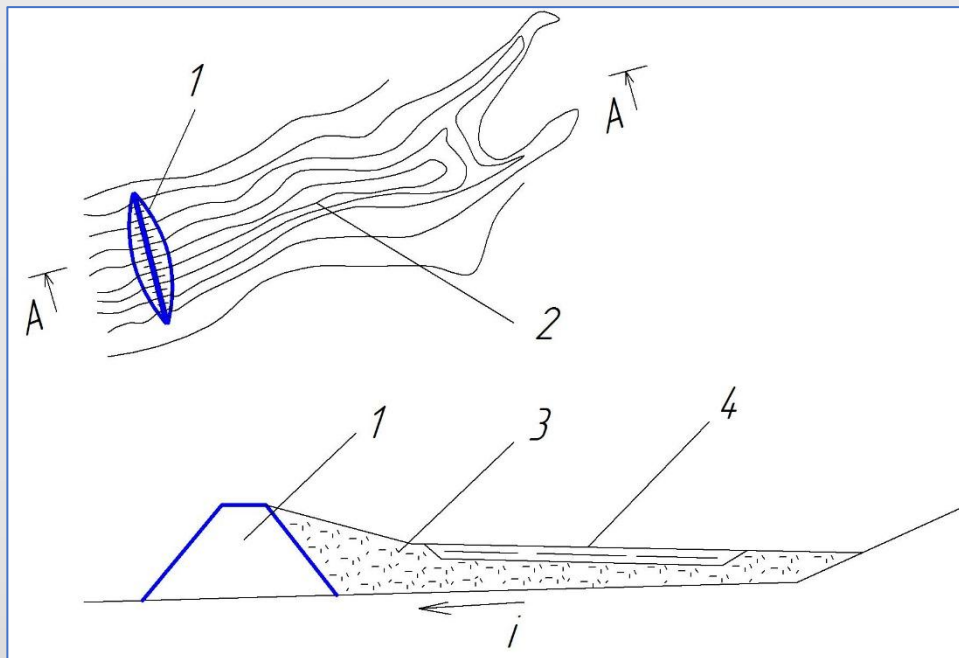


Схема намывного накопителя овражно-балочного типа:

1 – ограждающая дамба; 2 – чаша; 3 – отложения отходов; 4 – отстойный пруд

Отходы подают в накопители гидравлическим способом в виде пульпы. Твердые частицы отлагаются в накопителе, осветленная вода направляется на использование в водообороте.

## Разновидности накопителей по назначению:

### Хвостохранилище

Предназначено для складирования хвостов-тонкоизмельченной пустой породы, образующейся при обогащении руды на горнорудном предприятии.

### Шламоохранилище

Предназначено для складирования мелкодисперсных отходов обогатительных фабрик угольной промышленности, ряда производств цветной металлургии, химических заводов.

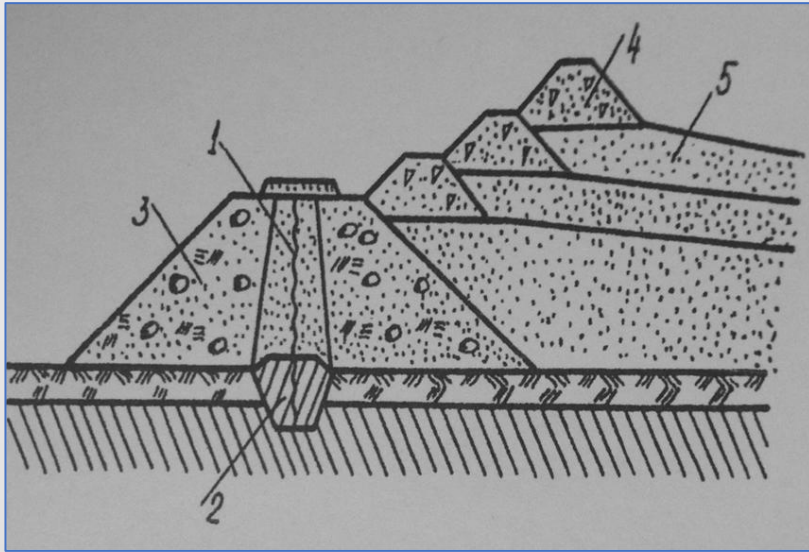
### Золоотвал

Предназначен для складирования твердых отходов ТЭС – золошлакового материала.

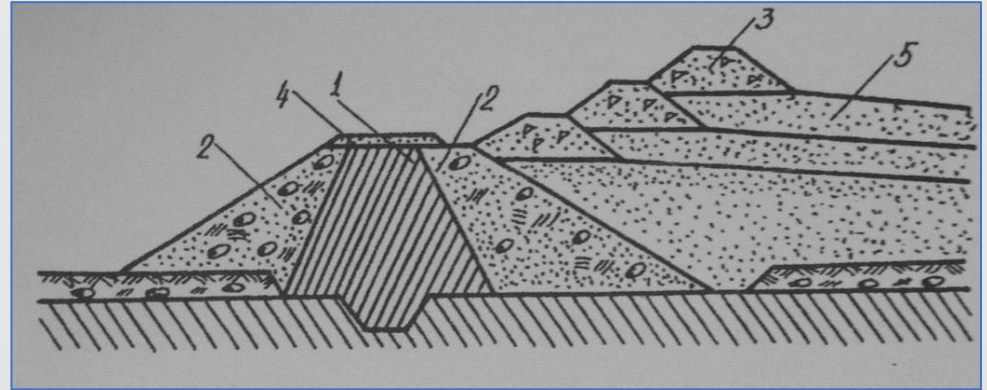


Намывное хвостохранилище овражно-балочного типа обогатительной фабрики №12 Удачнинского ГОК в Якутии. Вид на гребень ограждающей дамбы с проложенным пульпопроводом, верховой откос, отложения наносов, отстойный пруд. 2005 г.

## Накопители с ограждающими дамбами талого типа



Рекомендуемая схема первичной ограждающей дамбы: 1 – песчаное ядро и диафрагма из пленки; 2 – зуб из суглинки; 3,4 – упорные призмы и дамбочки наращивания из крупнообломочных грунтов; 5 – намывные отложения

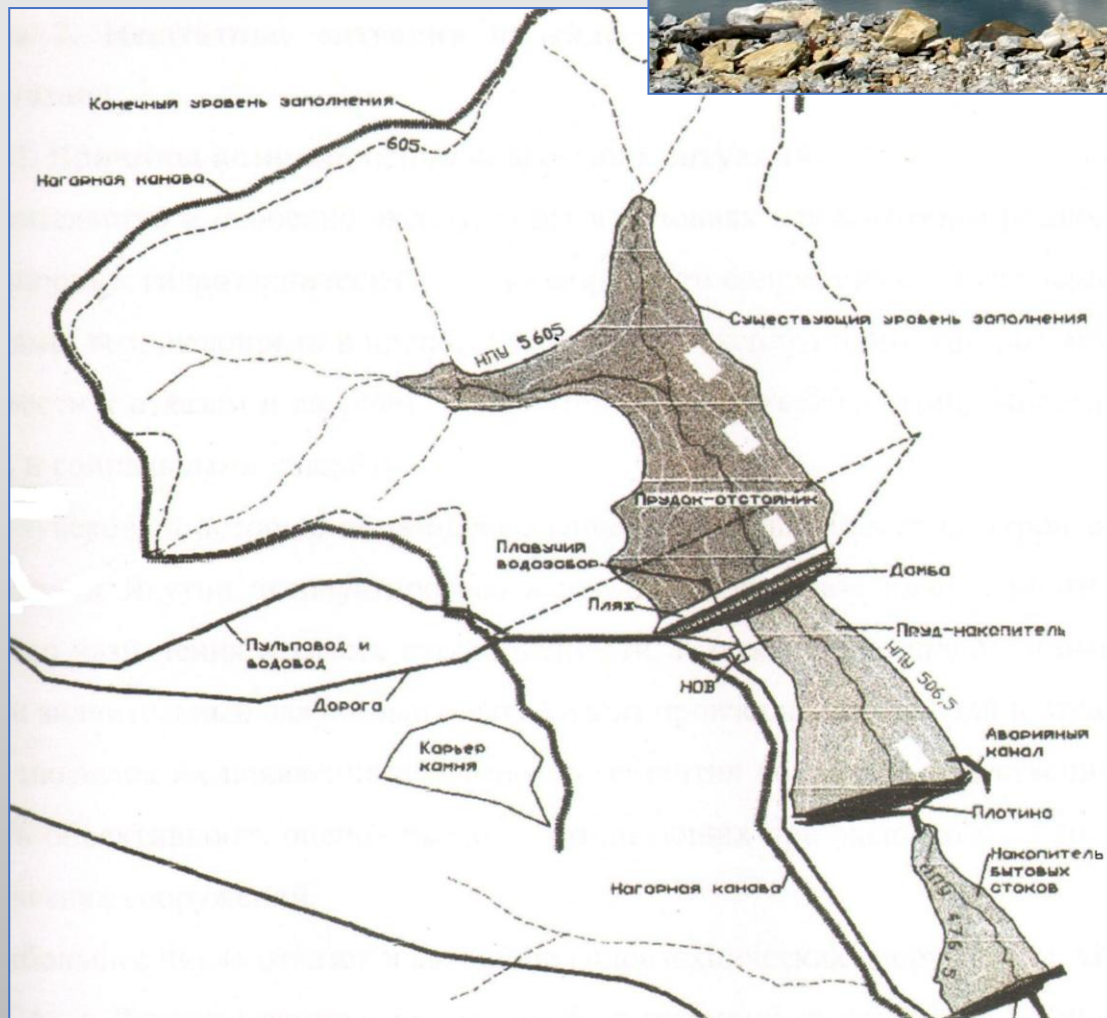


Рекомендуемая схема первичной ограждающей дамбы: 1 – ядро из связного грунта; 2,3 – упорные призмы и дамбочки наращивания из крупнообломочных грунтов; 4 – защитный слой; 5 – намывные отложения

Возведение дамбы талого типа не исключает фильтрацию загрязненной воды из накопителя. Для ее перехвата и вовлечения в оборотное водоснабжение ниже накопителя устраивают водоперехватывающее водохранилище [Кузнецов, 2008]



Хвостохранилище (слева) с ограждающей дамбой талого типа и водоперехватывающее водохранилище (справа) фабрики №1 Мирнинского ГОК в Якутии. 2005 г.



Вид с плотины пруда-накопителя на сам пруд и дамбу хвостохранилища. 2005 г.

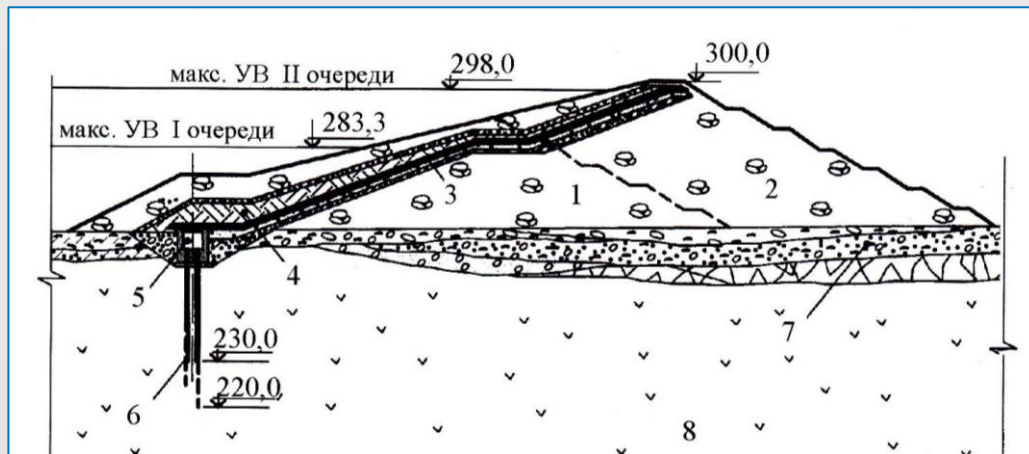
План хвостохранилища и водоперехватывающих водохранилищ (прудов) обогатительной фабрики №14 Айхальского ГОК в Якутии

Хвостохранилище Надеждинского металлургического завода Норильского ГМК емкостью 40 млн м<sup>3</sup> для щелочных хвостов металлургического производства

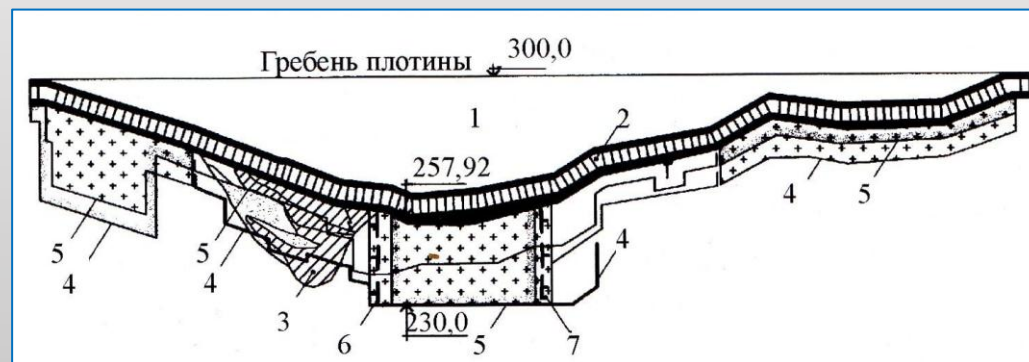
❖ Построено в 1983 г. на р. Буровая в районе со среднегодовой температурой воздуха минус 10,2 °С.

❖ Дамбу (плотину) высотой 38 м создали талого типа с экраном из полиэтиленовой пленки. Основание дамбы в берегах и талик под руслом шириной 180 – 200 м перекрыли мерзлотной завесой с помощью воздушной замораживающей системы (ВВК), устроенной из потерны [Куперман,1987].

❖ Замораживание талика через систему ВВК велось в 1983 – 1985 гг., затем потерну затопило и система прекратила работу. От восстановления системы отказались [Федосеев, 2009]

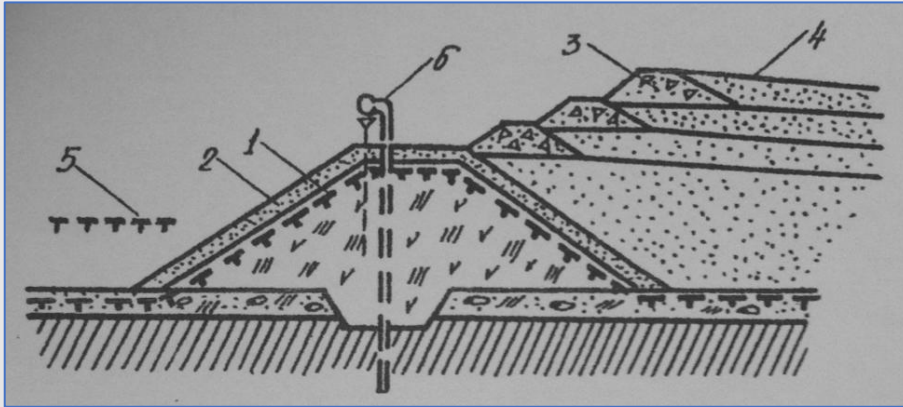


Конструкция построенной плотины: 1 – плотина 1-й очереди; 2 – плотина 2-й очереди; 3 – полиэтиленовый экран; 4 – суглинок; 5 – потерна; 6 – цементационно-мерзлотная завеса руслового талика; 7 – русловой аллювий; 8 – базальты

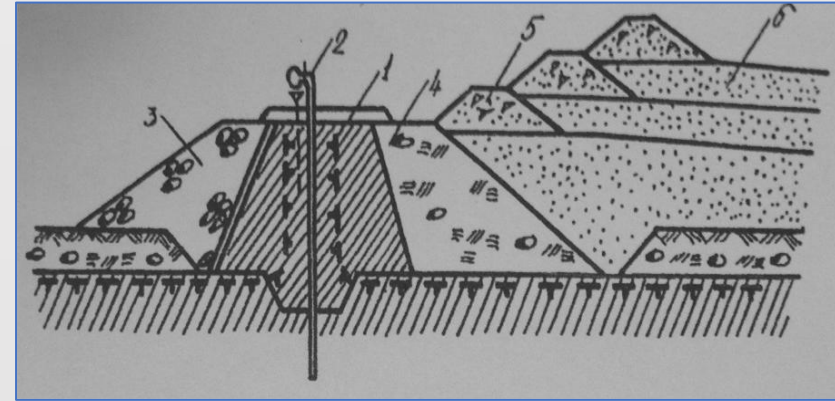


Продольный разрез по противофильтрационной завесе построенной плотины: 1 – плотина; 2 – потерна; 3 – ледниковые отложения; 4 – нижняя граница цементации; 5 – нижняя граница мерзлотной завесы; 6 – границы талика; 7 – цементационно-мерзлотные сопряжения

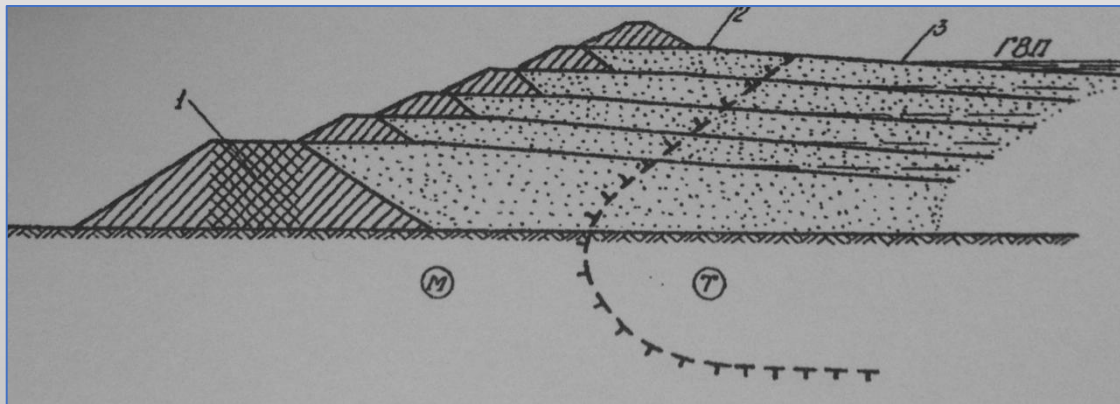
## Накопители с ограждающими дамбами мерзлого типа



Рекомендуемая схема первичной ограждающей дамбы: 1 – однородное тело дамбы из связного грунта; 2,3 – защитный слой и дамбочки наращивания из крупнообломочных грунтов; 4 – намывные отложения; 5 – граница мерзлой зоны в дамбе мерзлого типа в момент начала намыва; 6 - термосифоны



Рекомендуемая схема первичной ограждающей дамбы: 1 – мерзлое ядро из связного грунта; 2 – термосифоны мерзлотной завесы; 3 – низовая призма из каменной наброски; 4, 5 – верховая призма и дамбочки наращивания из крупнообломочных грунтов; 6 – намывные отложения



Принципиальная схема накопителя мерзлого типа с естественным послойным промораживанием намывного массива: 1 – первичная ограждающая дамба мерзлого типа; 2,3 – мерзлые и талые намывные отложения

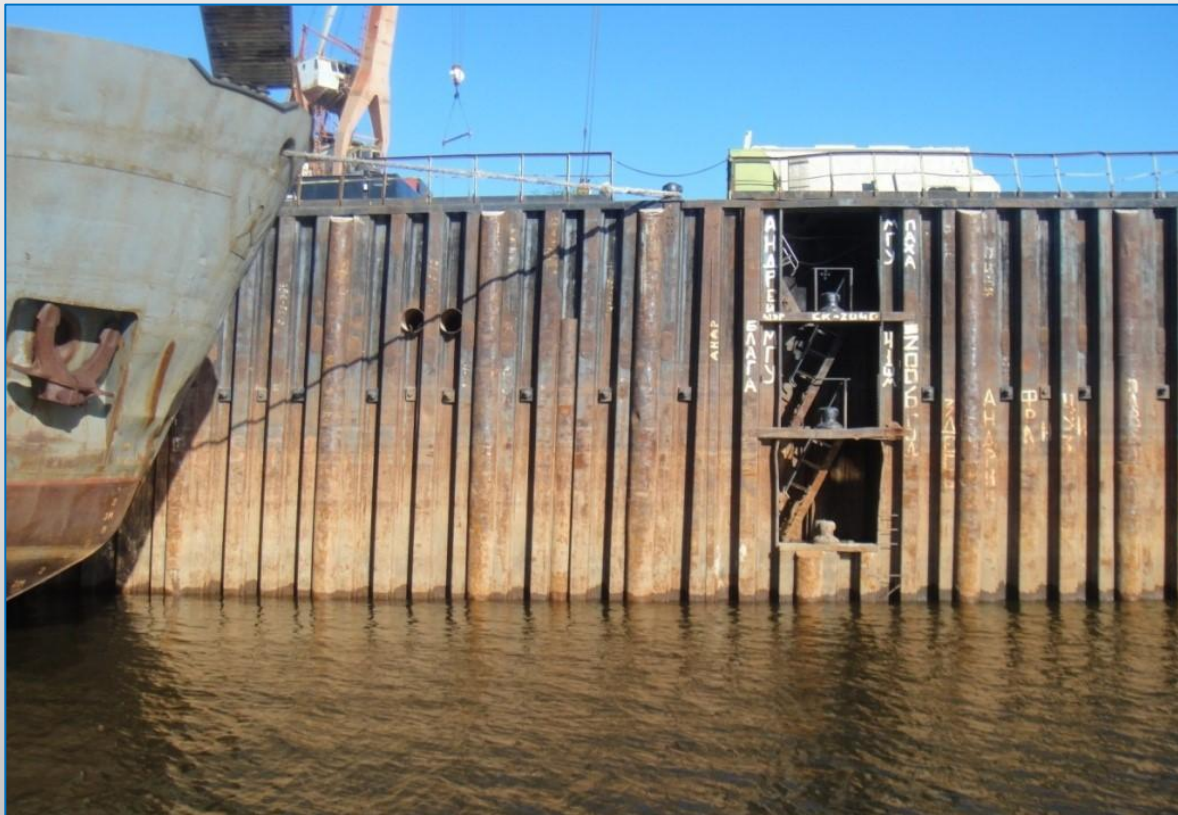
Возведение дамбы мерзлого типа полностью исключает фильтрацию из накопителя и обеспечивает эффективную защиту окружающей среды от загрязнения [Кузнецов, 2008].



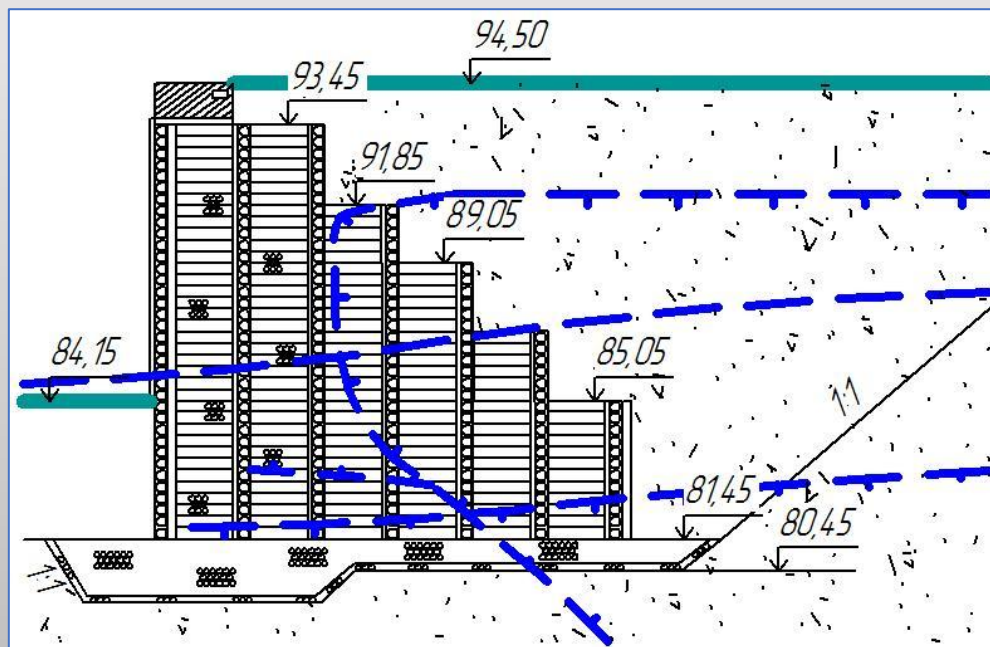
# Причальные и оградительные сооружения портов

## Основные виды причалов в речных портах:

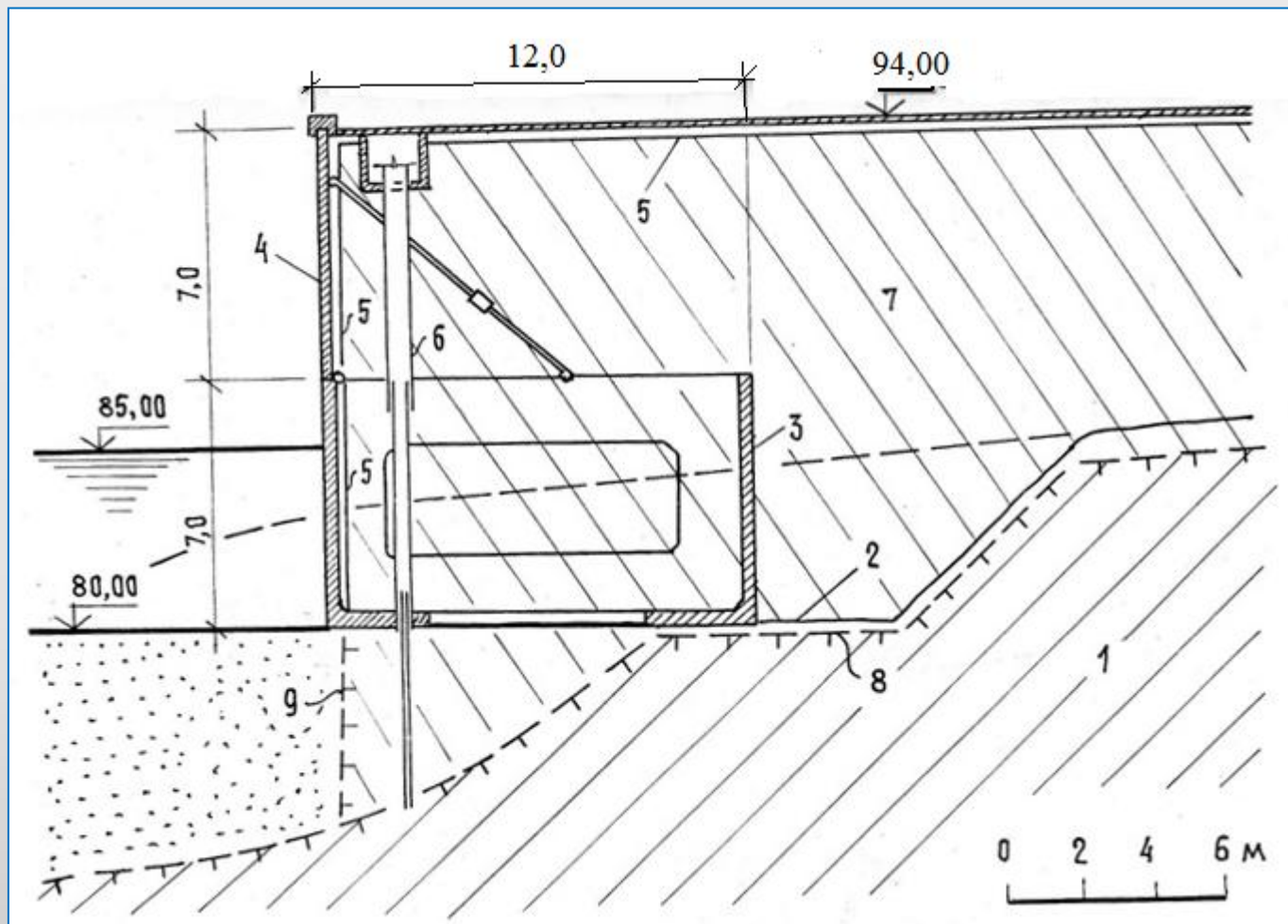
- больверки из стального шпунта;
- деревянные ряжевые стены;
- причалы из железобетонных массивов-гигантов.



Стальная шпунтовая вертикальная причальная стена в порту Якутск на р. Лене.  
2011 г.



Пассажирские и грузовые  
деревянные ряжевые причалы  
в порту Якутск на р. Лене. 1987 г.



Причал из железобетонных массивов-гигантов на вечномёрзлом основании с промораживаемой засыпкой для порта Якутск на р. Лене  
 1 – мерзлый грунт берега; 2 – граница котлована; 3 – железобетонные секции; 4 – элементы верхнего строения; 5 – гидротеплоизоляция; 6 – телескопические колонки воздушной замораживающей системы; 7 - промороженная грунтовая засыпка; граница мерзлоты 8 – в строительный и 9 – в эксплуатационный период (предложение ННГАСУ, 1988 г.)

## Основной вид оградительных сооружений речных портов: грунтовые дамбы.

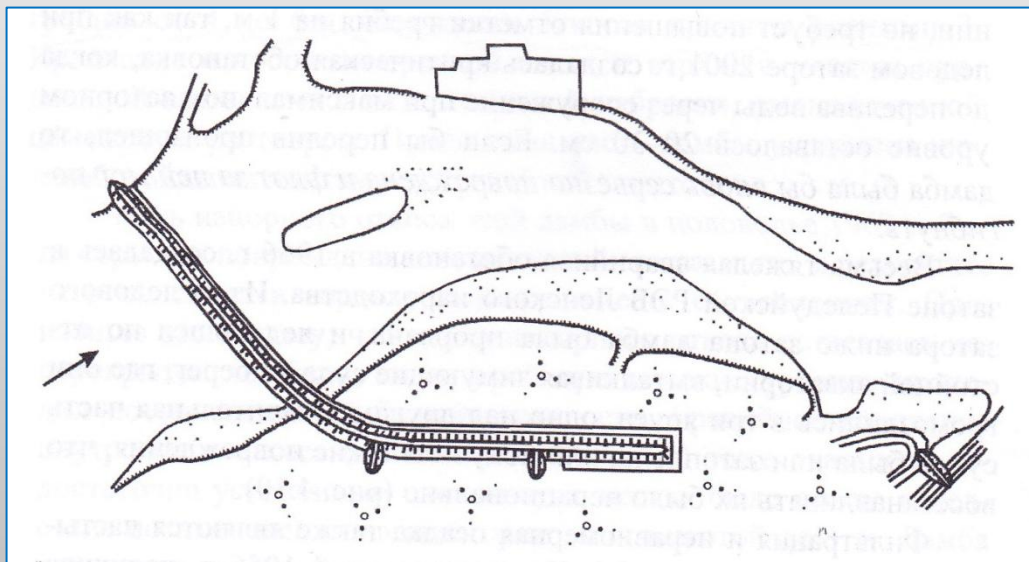
а



Дамба защищает отстаивающийся зимой за ней флот от ледохода, также от затопления половодьями прибрежную территорию г. Якутска и Якутского речного порта.

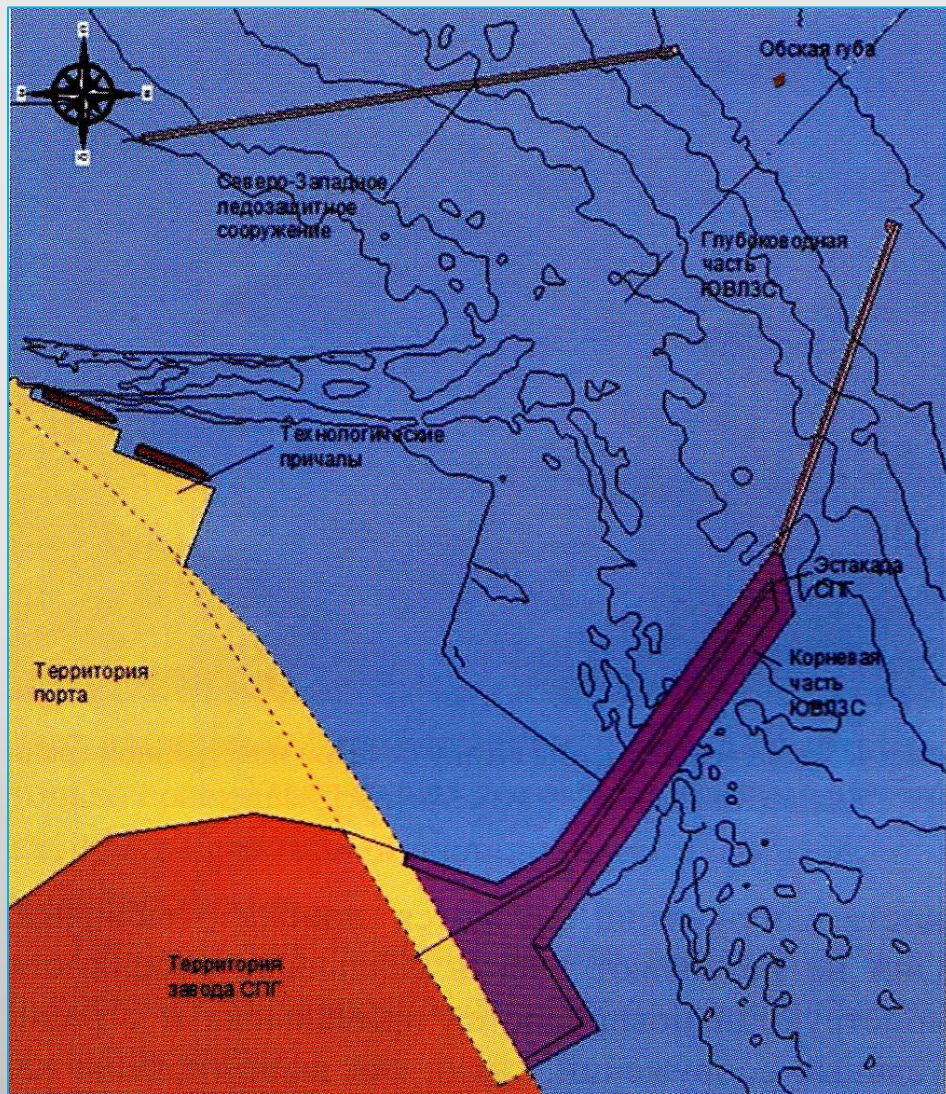
Построена в 1961 г. из песчаного грунта, длина 2 км, высота 5,5 – 11,0 м, ширина по гребню 4 – 6 м, заложения откосов 1:3 [Дегтярев, 2007].

б



Защитная дамба в Городской протоке р. Лены у г. Якутска: а – вид со стороны напорного откоса; б – схема расположения

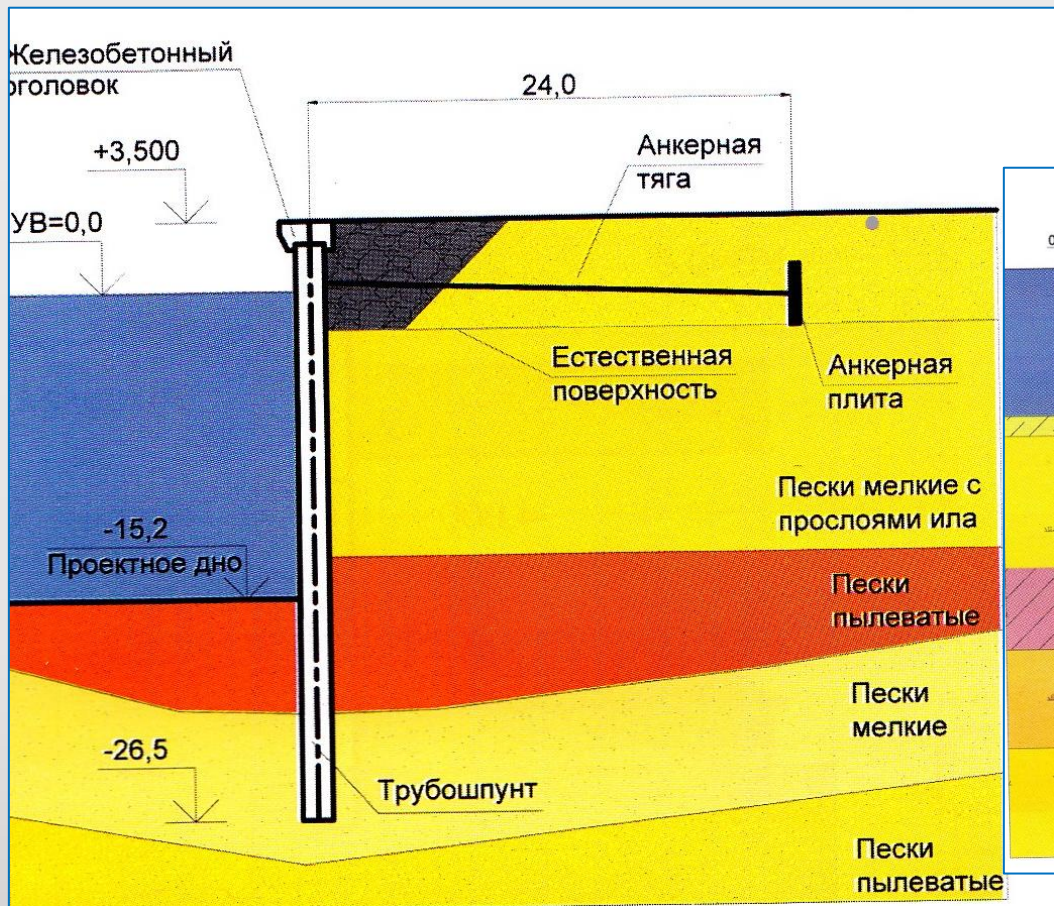
**В новых морских портах на арктическом побережье** при строительстве причальных и оградительных сооружений применяют стальной трубопунт.



Порт предназначен для загрузки сжиженным природным газом танкеров дедвейтом 85000 т. Расположен в зоне сплошной вечной мерзлоты, граница которой проходит вблизи береговой линии. Обскую губу 300 суток в году сковывают ледяные поля толщиной до 2,25 м.

Схема причальных и оградительных (ледозащитных) сооружений строящегося морского порта Сабетта на западном берегу Обской губы Карского моря

а



Причальное сооружение

б

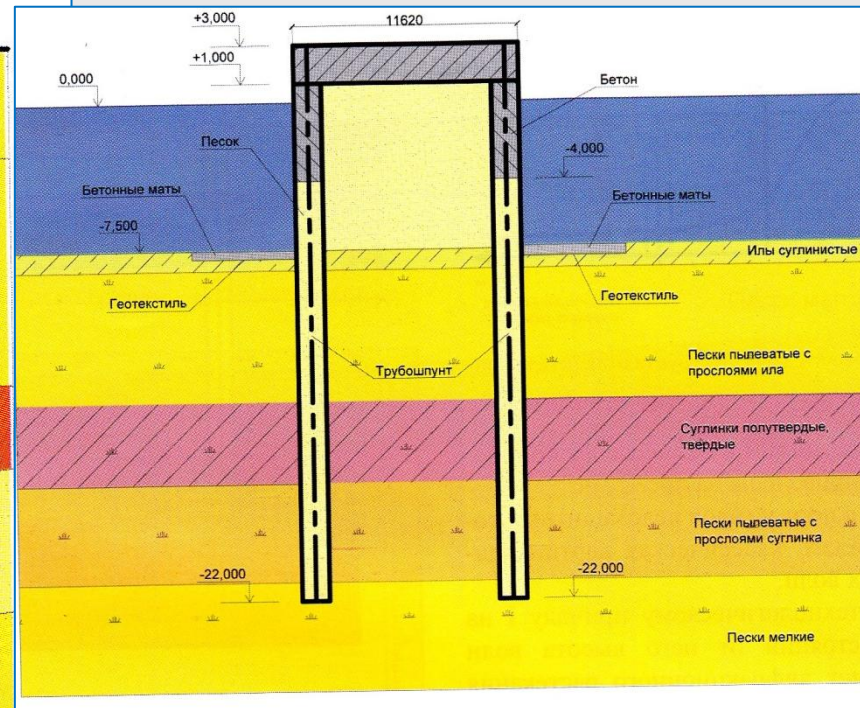


Схема глубоководной части ЮВЛЗС

Причальные (а) и оградительные (б) сооружения из стального трубошпунта в морском порту Сабетта на западном берегу Обской губы Карского моря [Левачев, 2016]

# **3. Физико-термические характеристики грунтов и строительных материалов**

# Грунты и строительные материалы как многофазные системы

**ГРУНТ** (от. нем Grund – основа, почва), собирательное название горных пород, залегающих преимущественно в пределах зоны выветривания земли и являющихся объектом инженерно-строительной деятельности человека.

Грунты подразделяют на скальные и нескальные.

Гидротехника имеет дело в основном с грунтами водонасыщенными талыми и мерзлыми.

Грунты (аналогично и строительные материалы) рассматриваются как многофазные системы [Цытович, 1973].

№№ фаз	Наименование фаз системы	Наличие фаз	
		В талом грунте	В мерзлом грунте
1	Твердые минеральные частицы	+	+
2	Лед	-	+
3	Вода в связанном и жидком состояниях	+	+
4	Газообразные компоненты: пары воды и газы	+	+
Количество фаз в системе		3	4





## Классификация нескальных грунтов по степени заторфованности

Разновидности грунтов	Относительное содержание торфа, д. е.	
	Глинистые грунты	Пески
Сильноторфованный	> 0,40 до 0,50 включ.	-
Среднеторфованный	> 0,25 до 0,40 включ.	-
Слаботорфованный	> 0,10 до 0,25 включ.	-
С примесью торфа	> 0,05 до 0,10 включ.	0,03 – 0,10

### Особенности зоторфованных грунтов оснований:

- Большая сжимаемость под нагрузкой.
- Проявление пластических деформаций в широком диапазоне отрицательных температур.
- Пониженная прочность смерзания с фундаментами.
- Низкая теплопроводность.
- Замедленная стабилизация осадок при оттаивании.

## Температура перехода грунта из талого в мерзлое состояние

Наименование грунта	Температура, °С
Песок: крупный и средней крупности	0,1
Песок: мелкий и пылеватый	0,3
Супесь	0,6
Суглинок	1,0
Глина	1,5

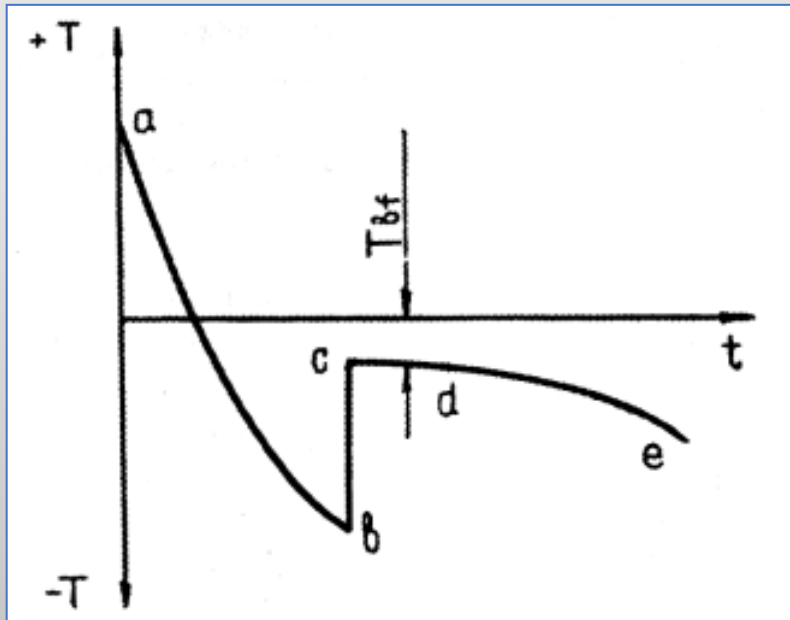


График процесса заморозания грунта во времени: T – температура; t - время

Если наблюдать за промерзанием образца глинистого грунта [Цытович, 1973], помещенного в морозильную камеру, то при изменении температуры полученная кривая будет иметь четыре участка.

- Первый участок ab соответствует понижению температуры с переохлаждением поровой воды.
- Второй участок bc характеризует резкое повышение температуры грунта, что связано с кристаллизацией части воды в образце грунта до значения  $T_{bf}$ , соответствующего началу замерзания.
- Третий участок cd, параллельный оси времени  $t$ , характеризует резкий переход большей части воды в лед.
- На четвертом участке de происходит постепенное понижение температуры уже замерзшего грунта, т. е. в этот период замерзает вода, не замерзшая при значении  $T_{bf}$ .

# Различие грунтов по содержанию замерзшей воды

## 1. Сыпучемерзлые

## 2. Пластичномерзлые

## 3. Твердомерзлые

Сыпучемерзлые — это крупнообломочные, гравелистые и песчаные грунты, имеющие отрицательную температуру, но не сцементированные льдом вследствие малой их влажности. Суммарная влажность таких грунтов  $\omega_{\text{tot}} \leq 0,03$ . Их свойства практически не изменяются под влиянием температуры и близки к свойствам тех же грунтов в немерзлом состоянии.

Пластичномерзлые – это грунты, сцементированные льдом, но имеющие вязкие свойства и характеризующиеся сжимаемостью под нагрузкой (модуль деформации  $E < 100$  МПа).

Твердомерзлые – это грунты, характеризующиеся относительно хрупким разрушением и практической несжимаемостью под нагрузкой (модуль деформации  $E > 100$  МПа), так как сцементированы льдом.

## Различие грунтов по льдистости

### Слабольшдистые

(льдистость менее 25%)

Суглинки и глины имеют обычно тугопластичную или полутвердую консистенцию и обладают малой сжимаемостью.

### Льдистые

(льдистость 25—50%)

Грунты имеют свойства промежуточные между двумя приведенными категориями.

### Сильнольдистые

(льдистость более 50%)

Суглинки и глины, переходящие при оттаивании в текучее, текучепластичное или мягко-пластичное состояние.

Сильнольдистые грунты обладают малой несущей способностью в оттаявшем состоянии и большой сжимаемостью.

**Засоленность мерзлых грунтов** — отношение массы легкорастворимых солей, содержащихся в единице объема грунта, к плотности его скелета.

К засоленным относятся мерзлые грунты, в которых количество солей (независимо от их состава) превышает следующие значения:

- для тонких и пылеватых песков — 0,05%,
- для мелких, средних и крупных песков — 0,1%,
- для супесей — 0,15%,
- для суглинков — 0,2%,
- для глин — 0,25%.

Засоленные грунты отличаются от аналогичных незасоленных более низкой температурой замерзания и большим содержанием незамерзшей воды. В засоленных грунтах пластические свойства проявляются в более широком диапазоне отрицательных температур.

# Основные физико-термические характеристики, необходимые в температурных расчетах

Грунт в талом или мерзлом состоянии характеризуют следующие величины.

- ❖ Плотность (объемный вес) талого или мерзлого грунта  $\gamma$ , кг/м<sup>3</sup> или т/м<sup>3</sup>, — масса (вес) 1 м<sup>3</sup> грунта вместе с водой (льдом) в порах.

Порядок величин: 1,3 – 2,1 т/м<sup>3</sup>.

- ❖ Плотность частиц грунта (объемный вес скелета грунта)  $\gamma_{ск}$ , кг/м<sup>3</sup> или т/м<sup>3</sup>, — это объемный вес обезвоженного грунта.

Соотношения:  $\gamma_{ск} \leq \gamma$ ;  $\gamma_{ск} = \frac{\gamma}{1 + \omega}$ ,

где  $\omega$  – суммарная (весовая) влажность грунта;

для абсолютно сухого грунта  $\gamma = \gamma_{ск}$ .

Порядок величин: гранит  $\gamma_{ск} = 2,5$  т/м<sup>3</sup>;

песок  $\gamma_{ск} = 1,6$  т/м<sup>3</sup>;

глина  $\gamma_{ск} = 1,5$  т/м<sup>3</sup>.

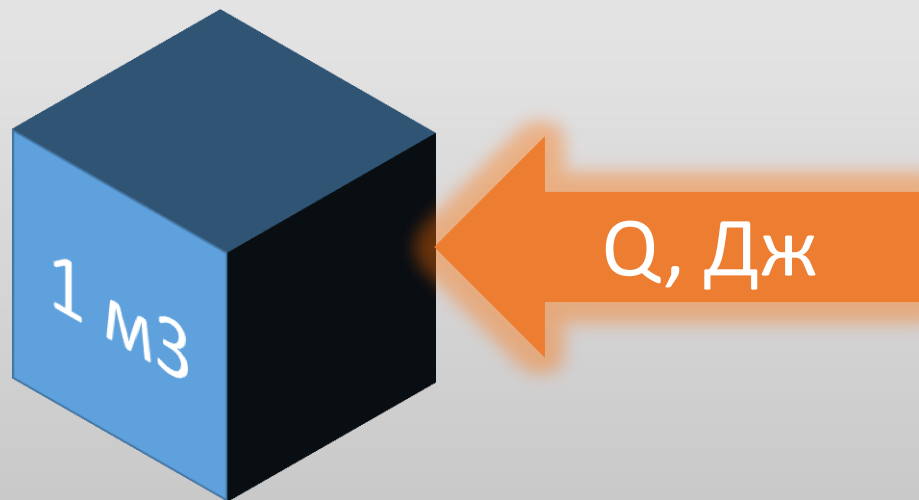
❖ Пористость грунта \_\_\_\_\_

❖ Суммарная весовая влажность (льдитость) грунта  $w$  в долях единицы – определяется отношением массы всех видов содержащихся в нем воды и льда (в прослойках и порах) к массе скелета грунта:  
\_\_\_\_\_ ( ) \_\_\_\_\_

Для абсолютно сухого грунта

### Понятие количества теплоты

1 Мкал – это количество теплоты, необходимое, чтобы нагреть 1 м<sup>3</sup> воды на 1°С.



1 Мкал =  $4186,8 \cdot 10^3$  Дж (1 кал = 4,1868 Дж).

Единицу «Мкал» удобно использовать в гидротехнике, «Дж» – единица системы СИ.

Для температурных расчетов грунтовых гидросооружений и оснований основными являются следующие 4 характеристики.

- 1 Удельная теплоемкость талого и мерзлого грунта по объему (объемная теплоемкость) , Дж/(м<sup>3</sup>°С) – количество теплоты в Дж, которое нужно сообщить 1 м<sup>3</sup> грунта, чтобы нагреть его на 1°С.

$$1 \text{ Мкал}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{С}) = 4186,8 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{С})$$

Здесь:  $\gamma, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$  (или  $\frac{\text{т}}{\text{м}^3}$ ) – плотность (объемный вес) грунта;

$C, \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{С})$  – удельная теплоемкость по весу – количество теплоты в Дж, необходимой для повышения температуры одного килограмма грунта на один градус.

$$1 \text{ Мкал}/(\text{т} \cdot \text{град}) = 4186,8 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{град})$$

### Примеры

$$\text{Вода: } \gamma_{\text{в}} = 1 \text{ т}/\text{м}^3;$$

$$C_{\text{в}} = 1 \text{ Мкал}/(\text{т} \cdot \text{град});$$

$$(\gamma C)_{\text{в}} = 1 \text{ Мкал}/(\text{м}^3 \cdot \text{град}).$$

$$\text{Лед: } \gamma_{\text{л}} = 0,92 \text{ т}/\text{м}^3;$$

$$C_{\text{л}} = 0,5 \text{ Мкал}/(\text{т} \cdot \text{град});$$

$$(\gamma C)_{\text{л}} = 0,46 \text{ Мкал}/(\text{м}^3 \cdot \text{град}).$$

Значения объемной теплоемкости талого или мерзлого грунта определяют опытным путем с помощью калориметра.



**2** Теплота таяния (замерзания) грунта  $D$  – это количество теплоты, необходимой для таяния льда (замерзания воды) в  $1 \text{ м}^3$  грунта (т.е. для оттаивания или замораживания  $1 \text{ м}^3$  грунта при  $0^\circ\text{C}$  без нагрева или охлаждения).

Значение  $D$  определяется как:

$$D = \gamma_{\text{ск}} \cdot \omega \cdot L, \text{ Дж/м}^3 \text{ (или Мкал/м}^3\text{)},$$

где  $\gamma_{\text{ск}}$  – плотность сухого грунта (скелета грунта),  $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$  (или  $\frac{\text{т}}{\text{м}^3}$ );

$\omega$  – льдитость (влажность) грунта в долях единицы;

$\gamma_{\text{ск}} \cdot \omega$  – вес льда (влаги) в  $1 \text{ м}^3$  грунта в кг (или в тоннах);

$L = 3,35410^5 \text{ Дж/кг}$  (или  $78,6 \text{ Мкал/т}$ ) – удельная теплота фазовых превращений лед-вода в расчете на единицу массы (теплота плавления льда).

#### Варианты

а) Если записать  $(\gamma_{\text{ск}} \cdot \omega) = \gamma_{\text{ск}} \cdot \frac{\gamma_{\text{гр}} - \gamma_{\text{ск}}}{\gamma_{\text{ск}}} = \gamma_{\text{гр}} - \gamma_{\text{ск}}$ , то  $D = (\gamma_{\text{гр}} - \gamma_{\text{ск}}) \cdot L$ .

б) Если все поры грунта заполнены льдом (или водой), то  $D = \gamma_{\text{л}} \cdot n \cdot L$ , где  $n$  – пористость грунта.

#### Пример

Для льда  $\gamma_{\text{л}} = 0,92 \text{ т/м}^3$ ;  $n = 1$ ,  $L = 78,6 \text{ Мкал/т}$ . Таким образом, чтобы растопить  $1 \text{ м}^3$  льда необходимо теплоты:

$$D = 0,92 \cdot 1 \cdot 78,6 = 72,3 \text{ Мкал/м}^3.$$

**3** Коэффициент температуропроводности  $a$ ,  $\text{м}^2/\text{с}$  (или  $\text{м}^2/\text{сутки}$ ) оценивает термоинерционные свойства пород и скорость выравнивания температурного поля. Чем больше значение коэффициента, тем быстрее охлаждается или нагревается порода.

$\text{м}^2/\text{с}$

Коэффициент температуропроводности « $a$ » и объемная теплоемкость «( )» грунтов связаны между собой соотношением:

—

Значение « $a$ » грунта зависит от температуры, оно всегда больше у грунта в мерзлом состоянии, чем в талом ( ):

Грунт/Состояние	Мерзлый	Талый
Песок кварцевый	0,091 $\text{м}^2/\text{сут}$	0,160 $\text{м}^2/\text{сут}$
Суглинок	0,0422 $\text{м}^2/\text{сут}$	0,0835 $\text{м}^2/\text{сут}$

Значения коэффициента температуропроводности талого или мерзлого грунта определяют опытным путем с помощью  $a$ -калориметра.

**4** Коэффициент теплопроводности  $\lambda$ , Вт/(м·К), численно равен количеству теплоты, которое проходит в единицу времени через единицу изотермической поверхности при температурном градиенте, равном единице.

Порядковые значения коэффициента теплопроводности талых грунтов

Грунт	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ [Вт/(м·К)]
Ил/глина	1,5
Торф	0,4
Сухой песок/гравий	1,5
Влажный песок/гравий, водонасыщенная глина	2

Единицы измерения  $\lambda$

СИ	Технические (тепловые) единицы	
—	—	—
1	0,86	0,00206
1,16	1	0,024
48,4	41,6	1

Коэффициент теплопроводности мерзлых грунтов в 1,1-1,5 раза больше коэффициента теплопроводности грунтов в талом состоянии, что связано с большей теплопроводностью льда, по сравнению с незамерзшей водой.

Для определения  $\lambda$  существуют  $\lambda$ -калориметры, но в них опыты производить сложно. Поэтому обычно определяют « $\gamma C$ » и « $a$ » и далее рассчитывают  $\lambda = a \cdot (\gamma C)$ .

**Плотность, коэффициент теплопроводности и удельная теплоемкость  
грунтов и строительных материалов (справочные данные)**

<b>Материал</b>	<b>Плотность <math>\gamma</math>, кг/м<sup>3</sup></b>	<b>Температура, <math>\vartheta</math>, °С</b>	<b>Коэффициент теплопроводности <math>\lambda</math>, Вт/(м·град)</b>	<b>Удельная теплоемкость <math>C</math>, кДж/(кг·град)</b>
Асфальт	2120	0 – 30	0,60 – 0,74	1,67
Бетон	2400	0	1,28	0,84
Сталь	7900	-	45,40	0,462
Шлакобетон	1500	0	0,70	0,80
Глина	2000 – 1600	20	0,90 – 0,70	0,84
Гравий	1840	20	0,36	-
Дерево (сосна поперек волокон)	546	0 – 50	0,14 – 0,16	2,72
Кирпич силикатный	1900	0	0,81	0,84
Лед	917	0	2,20	2,26
Песок м/з сухой	1520	0 – 16	0,30 – 0,38	0,80
Песок м/з влажный	1650	20	1,13	2,09
Снег	200	-	0,10	2,09
Стекло	2500	20	0,74	0,67
Стекловата	154-206	88	0,051 – 0,059	-
Шлак	1000	0	0,29	0,75
Вода	1000	20	0,597	4,186
Воздух	-	10	0,002	-

# Изменение свойств грунтов при замерзании и оттаивании, тепловая осадка

Свойства грунтов зависят от их температурного состояния.

Для мерзлых грунтов за счет цементирующего действия льда характерна высокая механическая прочность. Например, сцепление суглинки:

Талый	Мерзлый
0,02 – 0,07 МПа	0,5 – 0,7 МПа

Предел прочности на сжатие у мерзлых грунтов довольно высок:

Глинистых	Песчаных
3 – 5 МПа	12 - 15 МПа

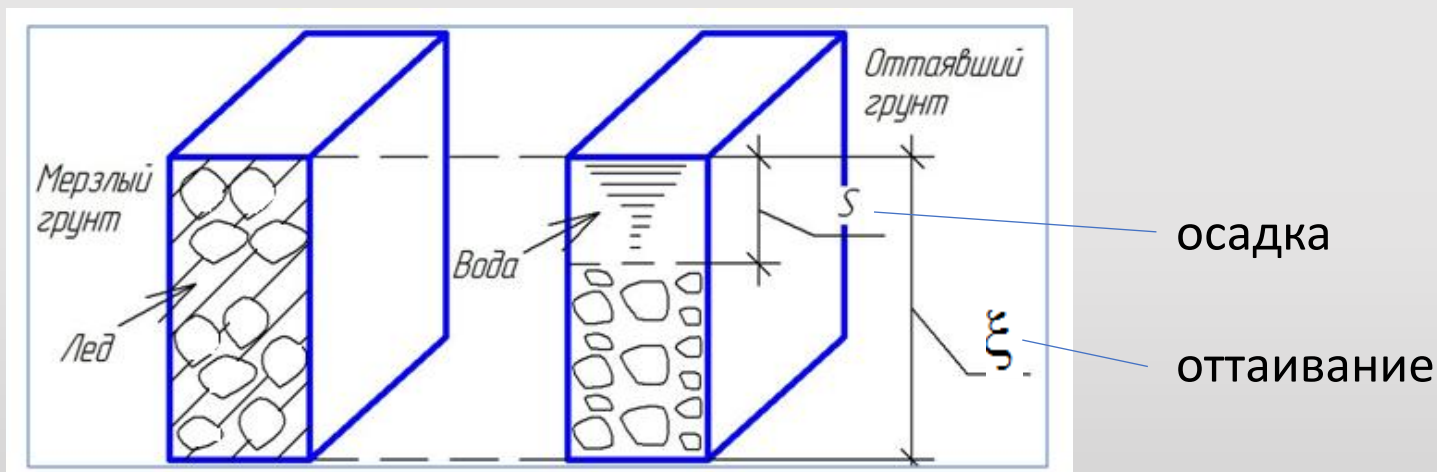
Рыхлые грунты после промерзания приобретают свойства скальных пород:

- а) если их поры полностью заполняются льдом, то они становятся водонепроницаемыми;
- б) увеличивается теплопроводность ( $\lambda_{\text{мг}} > \lambda_{\text{тг}}$ , обычно около  $\lambda_{\text{мг}} = 1,3\lambda_{\text{тг}}$ );
- в) может увеличиться объем (морозное пучение); изменяется электропроводность (они практически становятся диэлектрическими);
- г) прекращается конвективный (за счет переноса влаги) теплообмен.

Мерзлые грунты после оттаивания вследствие разрушения льдоцементных связей резко меняют свои свойства:

- а) могут приобретать текучую консистенцию и полностью терять несущую способность;
- б) претерпевают тепловую осадку;
- в) становятся водопроницаемыми и способными фильтровать воду.

Физический смысл тепловой осадки оттаивающего грунта



$\omega$  Если  $\omega > n$ , то может происходить осадка при оттаивании  $n$

Способность к тепловой осадке грунтов характеризуется понятием

относительная осадка:

$$\delta = \frac{S}{\Sigma \varepsilon}$$

Если  $\delta < 0,03$  – грунт непросадочный;  
 $\delta = 0,03 - 0,1$  просадочный;  
 $\delta > 0,1$  сильнопросадочный.

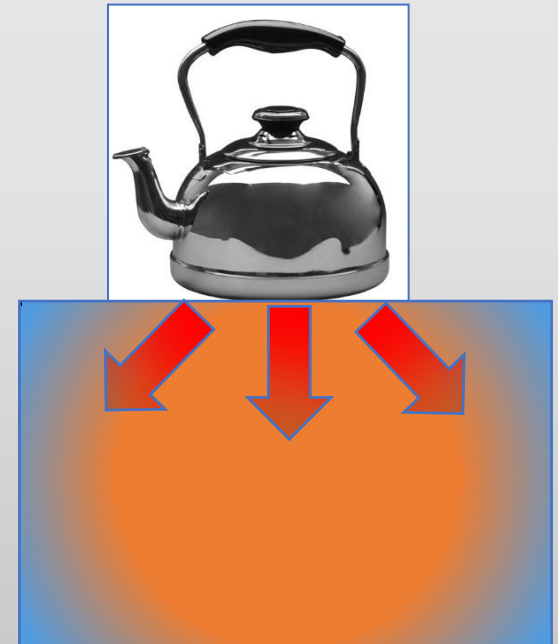
# **4. Некоторые сведения из теории теплопередачи**

# Виды теплопередачи

Энергетический обмен между взаимодействующими физическими областями, необходимой и достаточной причиной которого служит неодинаковость температур этих областей, называется теплопередачей.

## 1. Кондуктивная теплопередача (теплопроводность)

Кондуктивная теплопередача – это процесс переноса внутренней энергии от более нагретых частей тела к менее нагретым частям, осуществляемый хаотически движущимися частицами тела ( атомами, молекулами, электронами).



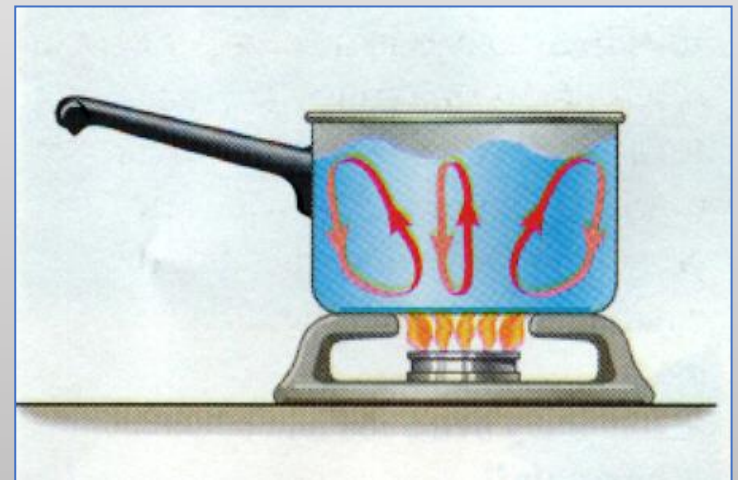


## 2. Конвективная теплопередача (конвекция)

Конвективная теплопередача - явление переноса теплоты в жидкостях или газах потоками вещества.

*Естественная конвекция* возникает в веществе самопроизвольно при его неравномерном нагревании в поле тяготения: нижние слои вещества нагреваются, становятся легче и всплывают, а верхние слои, наоборот, остывают, становятся тяжелее и опускаются вниз, после чего процесс повторяется.

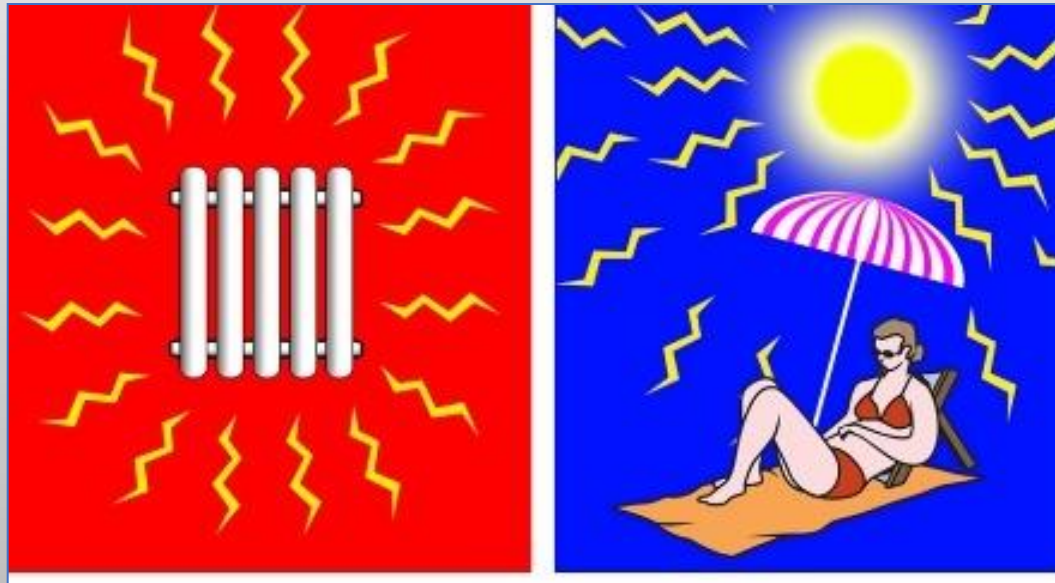
*При вынужденной (принудительной) конвекции* перемещение вещества обусловлено действием внешних сил (насос, лопасти вентилятора и т. п.).



### 3. Тепловое излучение (радиация)

Тепловое излучение — передача энергии от одних тел к другим в виде электромагнитных волн. Оно может осуществляться между телами, находящимися не только в какой-либо среде, но и вакууме.

Подобные волны относятся к инфракрасному диапазону, который не видим глазом человека.



# Основные понятия и уравнения теплопроводности

Количество теплоты  $Q$  (тепловая энергия тела), Дж.

Мощность теплового потока — —, Дж/с = Вт.

Единицы измерения  $Q$  и  $N$

Физическая категория	Единицы СИ	Технические единицы, часто используемые в гидротехнике	
		ккал	Мкал
Q	Дж	ккал	Мкал
	1	$0,239 \cdot 10^3$	$0,239 \cdot 10^6$
	4186,8	1	0,001
	$4,186 \cdot 10^6$	1000	1
N	Вт	ккал/час	Мкал/сут
	1	0,86	0,0206
	1,163	1	0,024
	$1,163 \cdot 10^3$	41,67	1

Температурное поле – совокупность значений температуры во всех точках пространства, занятого телом:

- нестационарное поле;
- стационарное поле.

Температурное поле представляется в виде картины изотерм – поверхностей (или линий) одинаковой температуры. Картина может дополняться линиями теплового потока, перпендикулярными изотермам в точках пересечения с ними.

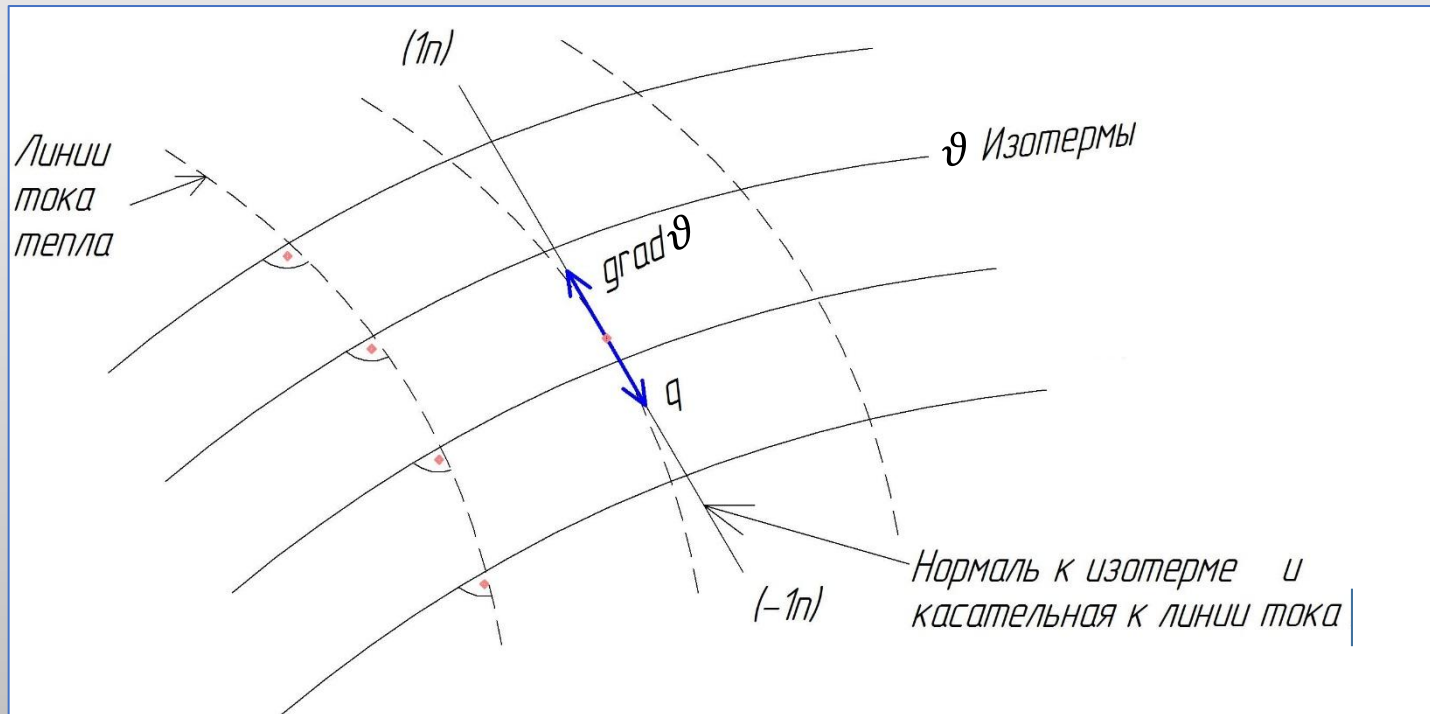


Иллюстрация двумерного температурного поля

Плотность теплового потока (удельный тепловой поток)

— — —, Вт/м<sup>2</sup>(или ккал/м<sup>2</sup>·час, или Мкал/м<sup>2</sup>·сутки) – это количество теплоты, проходящей в единицу времени  $t$  через единицу поверхности  $\omega$ . Величина векторная. Вектор « $q$ » направлен по нормали « $n$ » к изотермической поверхности в сторону уменьшения температуры (т. е. в направлении движения теплового потока).

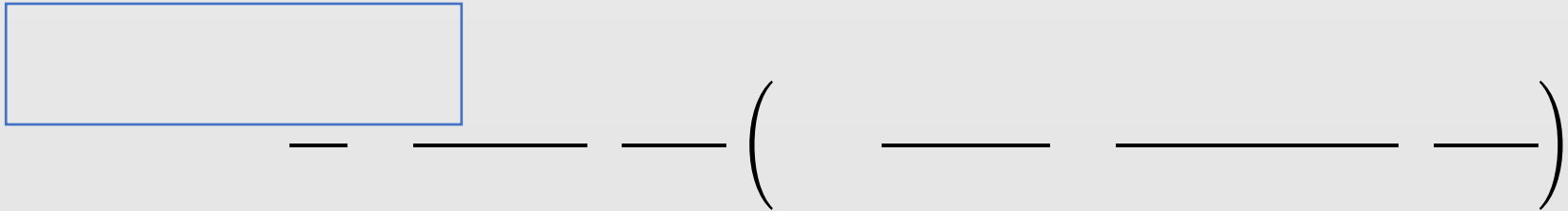
Здесь:  $(-1n)$  – единичный вектор, направленный в сторону уменьшения температуры  $\vartheta$ .

В обратной записи: — — —, Дж (или Мкал).

Градиент температуры — — —, градус/м – это вектор — — —, направленный по нормали « $n$ » к изотермической поверхности в сторону возрастания температуры  $\vartheta$ .

Здесь — — — - производная температуры по направлению нормали « $n$ » к изотермической поверхности.

## Закон теплопроводности Фурье


$$\boxed{\phantom{Q}} \quad - \quad \left( \phantom{Q} \right)$$

Закон утверждает, что плотность теплового потока прямо пропорциональна градиенту температуры.

Знак «-» ставится из-за противоположного направления векторов  $q$  и  $\text{grad } \vartheta$ .

Закон экспериментальный. Коэффициентом пропорциональности служит коэффициент теплопроводности  $\lambda$ .

Для количества теплоты  $Q$  этот закон можно записать так:

$$| \quad | \quad , \quad \text{Дж (или Мкал)},$$

т. е. количество переданной теплоты пропорционально падению температуры, времени и площади сечения, перпендикулярного направлению теплового потока.

Дифференциальные уравнения теплопроводности дают зависимость между температурой, временем и координатами точки тела при протекании процесса.

Нестационарная теплопроводность в однородной среде при  $a = \text{const}$  (уравнение Фурье)  
 $\left( \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = a \Delta \vartheta \right)$  —



При —

Стационарная теплопроводность в однородной среде (уравнение Лапласа)  
 $\Delta \vartheta = 0$

Нестационарная теплопроводность в неоднородной среде, физико-термические характеристики которой зависят от координат  
 $\left( \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \text{div}(\lambda \text{grad} \vartheta) \right)$  —



При —

Стационарная теплопроводность в неоднородной среде  
 $\text{div}(\lambda \text{grad} \vartheta) = 0$

$x, y, z$  — прямоугольные координаты;  $t$  — время;  $\vartheta$  — температура.

Постановка задачи теплопроводности включает:

- а) дифференциальное уравнение теплопроводности;
- б) фиксацию геометрической формы исследуемой области;
- в) краевые условия, состоящие из начальных и граничных условий.

Если для поставленной задачи каким-либо способом будет найдена функция от координат и времени  $\vartheta(x, y, z, t)$ , удовлетворяющая одновременно дифференциальному уравнению и краевым условиям, то эта функция дает единственное решение данной задачи.

Начальные условия состоят в задании значений температуры для всей исследуемой области в момент времени  $t_0$ , соответствующий началу расчета  $\vartheta(x, y, z, t_0) = f(x, y, z)$ .

Частным является случай, когда температура всей исследуемой области в начальный момент времени одинакова  $\vartheta(x, y, z, t_0) = \vartheta_{\text{нач}} = \text{const}$ .

Стационарная задача – это задача без начальных условий.



**Граничные условия** означают задание на границах исследуемой области условий теплообмена ее с окружающей средой.

**1. Условия I рода.** Задается температура на границах области в функции времени  $\vartheta_r = \vartheta(x, y, z, t)$ .

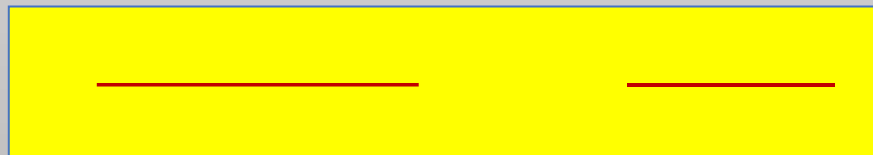
**2. Условие II рода.** Задается плотность теплового потока на границах области в функции времени  $q_r = -\lambda \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial l} \Big|_r = f(t)$ , Вт/м<sup>2</sup> (или Мкал/м<sup>2</sup>·сутки), здесь  $l$  – нормаль к границе.

Значение  $q_r = 0$  соответствует теплоизоляции области, т.е.  $\frac{\partial \vartheta}{\partial l} \Big|_r = 0$ .

**3. Условие III рода.** Задается закон конвективной теплопередачи от окружающей среды к поверхности тела (при постоянном потоке тепла)

$$q_c = \alpha(\vartheta_c - \vartheta_{\text{пов}}), \text{ Вт/м}^2 \text{ (или ккал/ м}^2 \cdot \text{час)}.$$

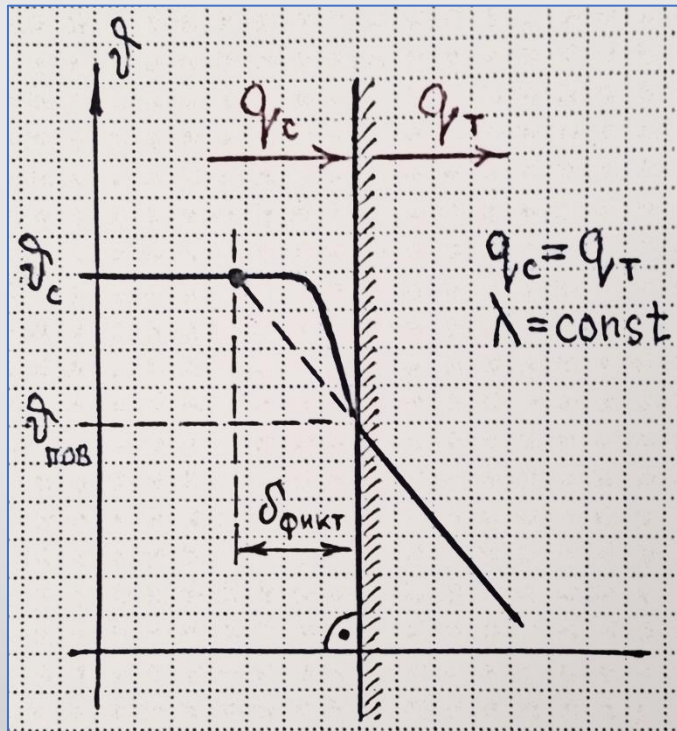
Здесь  $\alpha$ ,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}$  (или  $\frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{час} \cdot \text{град}}$ ) – коэффициент теплообмена.



## Характеристика граничного условия III рода



Графическая иллюстрация условия III рода



Коэффициент теплообмена не является физической постоянной. Он отражает совместное действие конвекции и излучения и зависит от многих факторов: формы и размеров тела, свойств среды, скорости омывания средой тела, температурных условий и др. Определение сложная задача.

Трансформации условия III рода:

- а) случай приводит к равенству т.е. условие III рода трансформируется в условие I рода;
- б) случай приводит к равенству , т. е. условие III рода трансформируется в частный случай условия II рода.

При пользовании условиям III рода иногда вводят понятие «фиктивного слоя», на границе которого температура равна температуре окружающей тело среды. Приравняв теплотокеты в среде и фиктивном слое , т.е.

( ) \_\_\_\_\_

можно найти толщину этого слоя

, м.

## Выбор между граничными условиями I и III рода осуществляется

исходя критерия Био —, где  $h$  – определяющий размер тела.

При считают , т.е. применяют условие I рода.

При применяют условие I рода с введением пограничного (фиктивного) слоя.

При следует применять условие III рода.

### Примеры:

1) Контакт вода-грунт:  $h > 1$  м;  $\lambda_r \approx 2$  Вт/м · град;

$\alpha \approx 100$  Вт/м<sup>2</sup>·град;  $Bi = \frac{\alpha \cdot h}{\lambda} = \frac{100 \cdot 1}{2} \geq 50$ . Допустимо условие I рода.

2) Контакт воздух-грунт:  $h > 1$  м;  $\lambda_r \approx 2$  Вт/м · град;

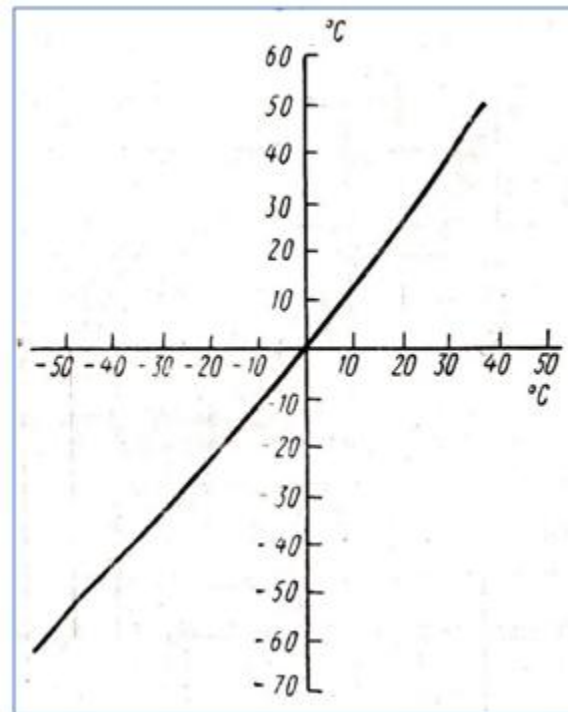
$\alpha \approx 20$  Вт/м<sup>2</sup>·град;  $Bi = \frac{\alpha \cdot h}{\lambda} = \frac{20 \cdot 1}{2} \approx 10$ . Следует применять условие III рода, или условие I рода с введением пограничного (фиктивного) слоя.

Если для расчетов необходимо задать температуру дневной поверхности, следует учесть:

А. разность температур воздуха и поверхности грунта (снега), обусловленную коэффициентом теплообмена  $\alpha$  между воздухом и поверхностью грунта (снега);

Б. разность температур снега и поверхности грунта ПОД ним, обусловленную теплоизолирующей способностью снега.

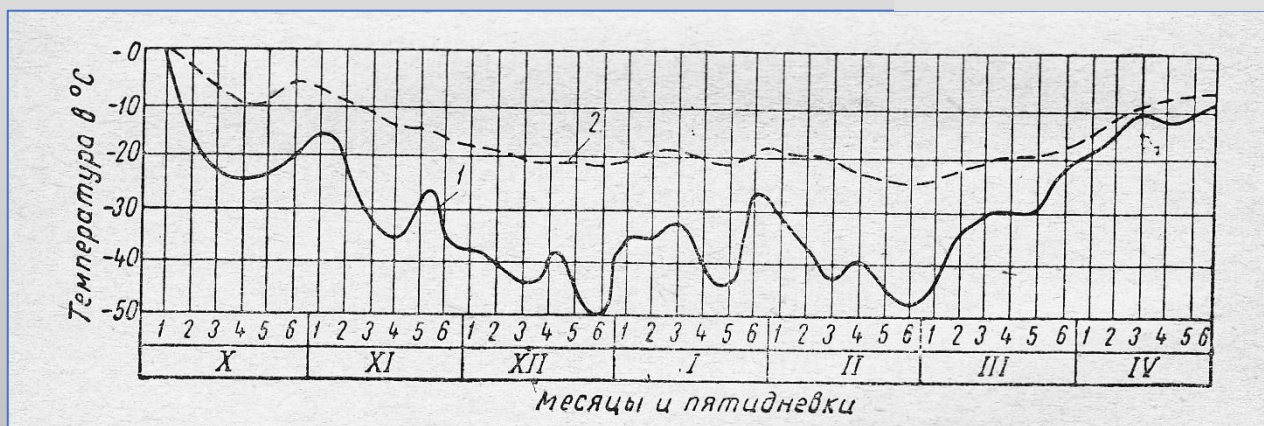
А. Температура поверхности грунта (снега)



Температура воздуха

Взаимосвязь среднемесячных температур воздуха и поверхности почвы по широте от 60° до 80°, по долготе от 78° до 114° [Общее мерзлотоведение, 1978]

Б.



Температуры поверхностей снега и почвы под ним по данным наблюдений в долине р. Мянунджи зимой 1961/1962 гг.: 1 – на снегу; 2 – под снегом. [Трупак, 1970]

# Уравнения конвективной теплопередачи в фильтрующем грунте

Условия двумерные (плоская задача). Грунт однородный.

## Уравнения фильтрации

Фильтрация воды установившаяся (стационарная), подчиняющаяся закону Дарси

$$V_x = -k \frac{\partial h}{\partial x}; V_y = -k \frac{\partial h}{\partial y}; V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}$$

и описываемая уравнением неразрывности потока (уравнение Лапласа)

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0,$$

где

$V = \text{const}$  – скорость фильтрации воды в точке фильтрующей зоны, м/сутки;

$k$  – коэффициент фильтрации грунта, м/сутки;

$h$  – напор, м;

$x, y$  – прямоугольные координаты, м;

$V_x, V_y$  – проекции вектора скорости фильтрации воды на оси координат, м/сутки.

## Уравнения переноса теплоты в фильтрующем грунте

Теплоперенос нестационарный. Осуществляется совместно теплопроводностью и конвекцией.

Уравнение теплопереноса Фурье-Кирхгофа:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \text{кондукция} + \text{конвекция}$$

где  $\vartheta$  – температура, °C;  $\vartheta = f(t)$ ;

$t$  – время, сутки;

$(\gamma_B \cdot c_B) = 1$ , Мкал/(м<sup>3</sup>·град) – удельная теплоемкость воды по объему;

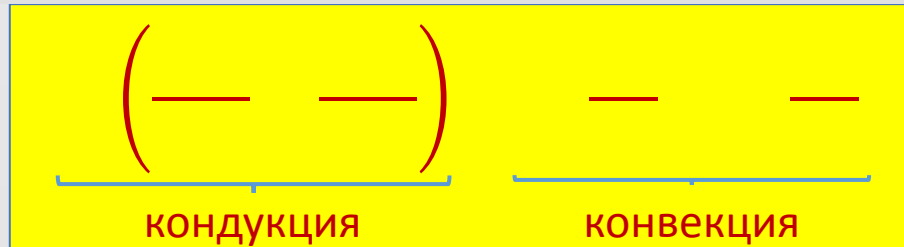
$(\gamma \cdot c)$  – удельная теплоемкость грунта по объему, Мкал/(м<sup>3</sup>·град);

$a_k = \frac{\lambda}{\gamma_B \cdot c_B}$ , м<sup>2</sup>/сутки – коэффициент конвективной температуропроводности;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности грунта, Мкал/(м·сутки·град).

Это уравнение пригодно для любого режима фильтрации.

В случае, если в фильтрующей зоне имеет место стационарное температурное состояние ( $t = \infty, \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = 0$ ), уравнение Фурье-Кирхгофа принимает вид:



Положив в уравнении Фурье-Кирхгофа  $V_x = V_y = 0$ , т.е. исключив фильтрацию воды, получим:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\gamma_B \cdot c_B}{\gamma \cdot c} \cdot \frac{\lambda}{\gamma_B \cdot c_B} \cdot \left( \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} \right),$$

и далее:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = a \cdot \left( \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} \right),$$

т.е. уравнение Фурье для теплопроводности [Богословский, 1957].

Приведенные уравнения применяют в расчетах температурного режима фильтрующих земляных плотин.

# Уравнения теплопередачи в каменной наброске при конвекции воздуха

Условия двумерные (плоская задача). Наброска недеформируемая. В ней присутствуют фазы: камень, лед, воздух, вода, пар, теплофизические характеристики которых не зависят от температуры. Температуры воздуха и водяного пара совпадают и равны  $\theta$ , °С. Плотность воздуха постоянна.

В наброске происходят тепловые процессы:

- теплообмен между камнем и влажным воздухом в порах;
- конвективный перенос тепла при движении (вынужденном и свободном) этого воздуха;
- фазовые превращения влаги, находящейся в воздухе.

Полная система уравнений тепло- и массопереноса для многокомпонентной системы, каковой является каменная наброска, содержит уравнения неразрывности, движения, энергии и зависимости для различных коэффициентов [Горохов, 2005].



В первом приближении без учета влажности воздуха уравнения тепло- и массопереноса в каменной наброске имеют следующий вид [Богословский, 1986].

1. Уравнение теплопереноса в скелете:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \text{div}(\lambda \text{grad} T) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}$$

2. Уравнение конвективного теплопереноса:

$$\text{div}(\rho c v T) = \rho c v \frac{\partial T}{\partial t}$$

где производной  $\frac{\partial T}{\partial t}$  — вследствие малой теплоемкости воздуха пренебрегли.

3. Уравнение неразрывности:

$$\text{div}(\rho v) + \rho \frac{\partial v}{\partial t} = 0$$

где  $v$  —

В уравнениях обозначено:

$t$  – время;

$x, y$  – прямоугольные координаты;

$\vartheta$  – температура камня ;

$\theta$  – температура воздуха в порах наброски;

$n$  – пористость наброски;

$C_k \rho_k$  – объемная теплоемкость камня,  $C_B \rho_B$  – то же, воздуха;

$\lambda_H$  – коэффициент эффективной теплопроводности наброски;

$\alpha_{\vartheta}$  – объемный коэффициент теплообмена между камнем и воздухом в порах;

$U, V$  – проекции скорости фильтрации воздуха на координатные оси;

$P$  – избыточное над атмосферных давление воздуха в порах наброски;

$\beta$  – коэффициент объемного расширения воздуха;

$\gamma_{в.о.}$  – плотность атмосферного воздуха в пределах высоты слоя наброски;

$\Delta\theta$  – разность температур воздуха в порах наброски и воздуха, окружающего наброску;

$A$  – эмпирический коэффициент.

Приведенные уравнения используют для расчетов температурного режима плотин из каменной наброски (их низовых призм).

# **5. Основы температурных расчетов гидротехнических сооружений**

# Расчеты теплопередачи теплопроводностью в конструкциях зданий и сооружений

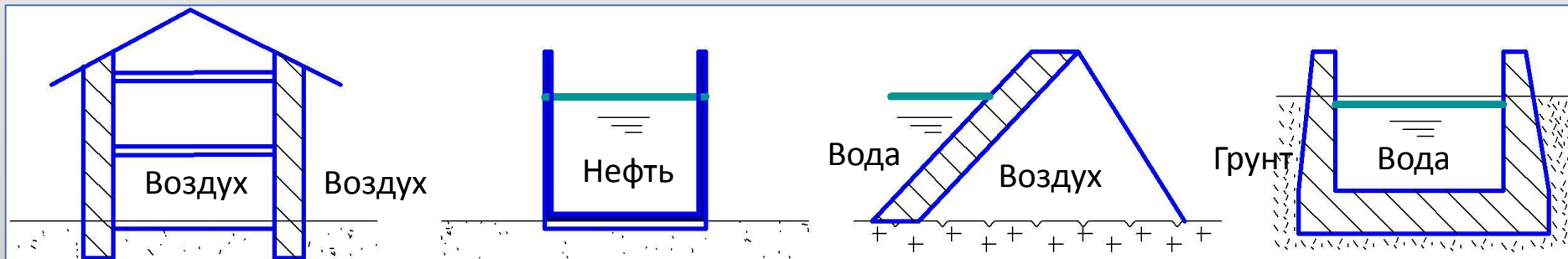
Одним из основных конструктивных элементов зданий и сооружений, в том числе гидротехнических, можно выделить плоскую стенку.

Дом

Резервуар

Плотина

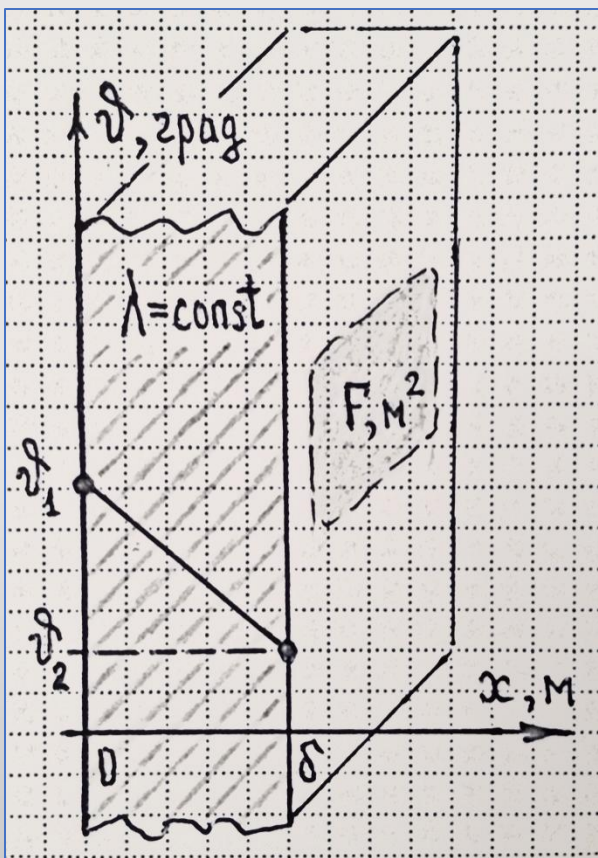
Шлюз



Далее рассмотрены одномерные задачи теплопроводности в плоской стенке.

# Стационарная теплопроводность стенки при граничных условиях I рода

Геометрические условия одномерные, стенка однородная, решение аналитическое.



## Постановка задачи

— ( )

## Решение

Интегрируем уравнение Лапласа — :

1. — —
2. — —

общее решение уравнения

Постоянные и определяем из граничных условий: , т. е. .

2. при — .

Получаем: — - решение задачи

Количество проходящей сквозь стенку теплоты найдем из закона Фурье —

где — — ( ) — ( )

# Стационарная теплопроводность стенки при граничных условиях II и III рода

## Постановка задачи

Случай, когда на левой грани задан тепловой поток  $q$ , а на правой – температура среды  $\vartheta_c$  и коэффициент теплообмена  $\alpha$ :

$$\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} = 0; \text{ при } x = 0, q = \text{const} \text{ (условие II рода);}$$

$$\text{при } x > \delta, \vartheta = \vartheta_c = \text{const}; \alpha \neq 0 \text{ (условие III рода);}$$

Требуется найти температуру внутри стенки  $\vartheta(x) = ?$  и на ее гранях  $\vartheta_1 = ?$  и  $\vartheta_2 = ?$

## Решение

Теплопоток в стене:  $q = -\lambda \frac{d\vartheta}{dx}$  (1)

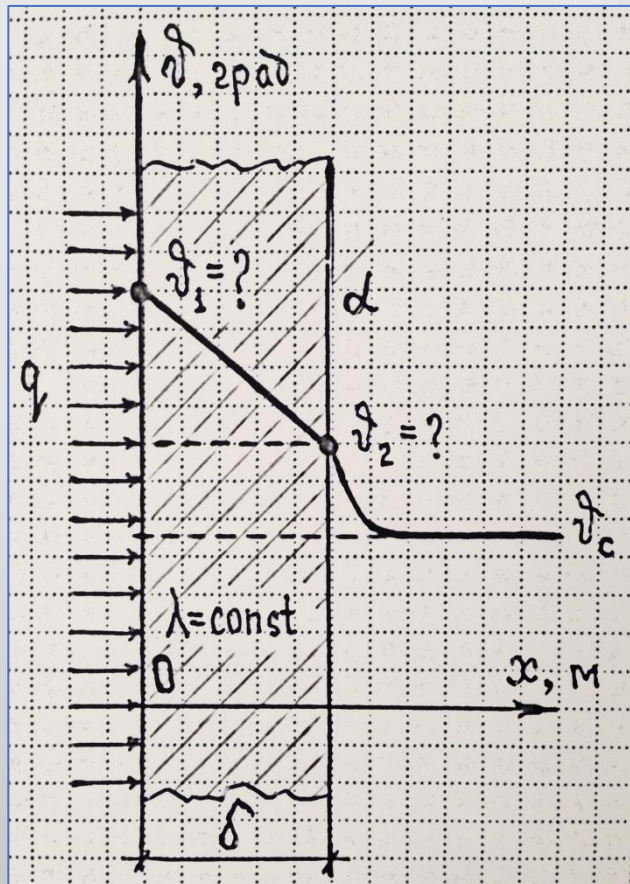
теплопоток на правой грани  $q = \alpha(\vartheta_2 - \vartheta_c)$  (2)

При стационарной теплопроводности все теплотокки равны; величина  $q$  задана.

Из (2) находим  $\vartheta_2 = \vartheta_c + \frac{q}{\alpha}$

Из (1) находим  $\vartheta = -\frac{q}{\lambda}x + C_1$

Зная  $\vartheta_2$  и  $\vartheta_c$  находим температуру внутри стенки  $\vartheta(x)$  по известной формуле  $\vartheta(x) = -\frac{q}{\lambda}x + \vartheta_c + \frac{q}{\alpha}$ .

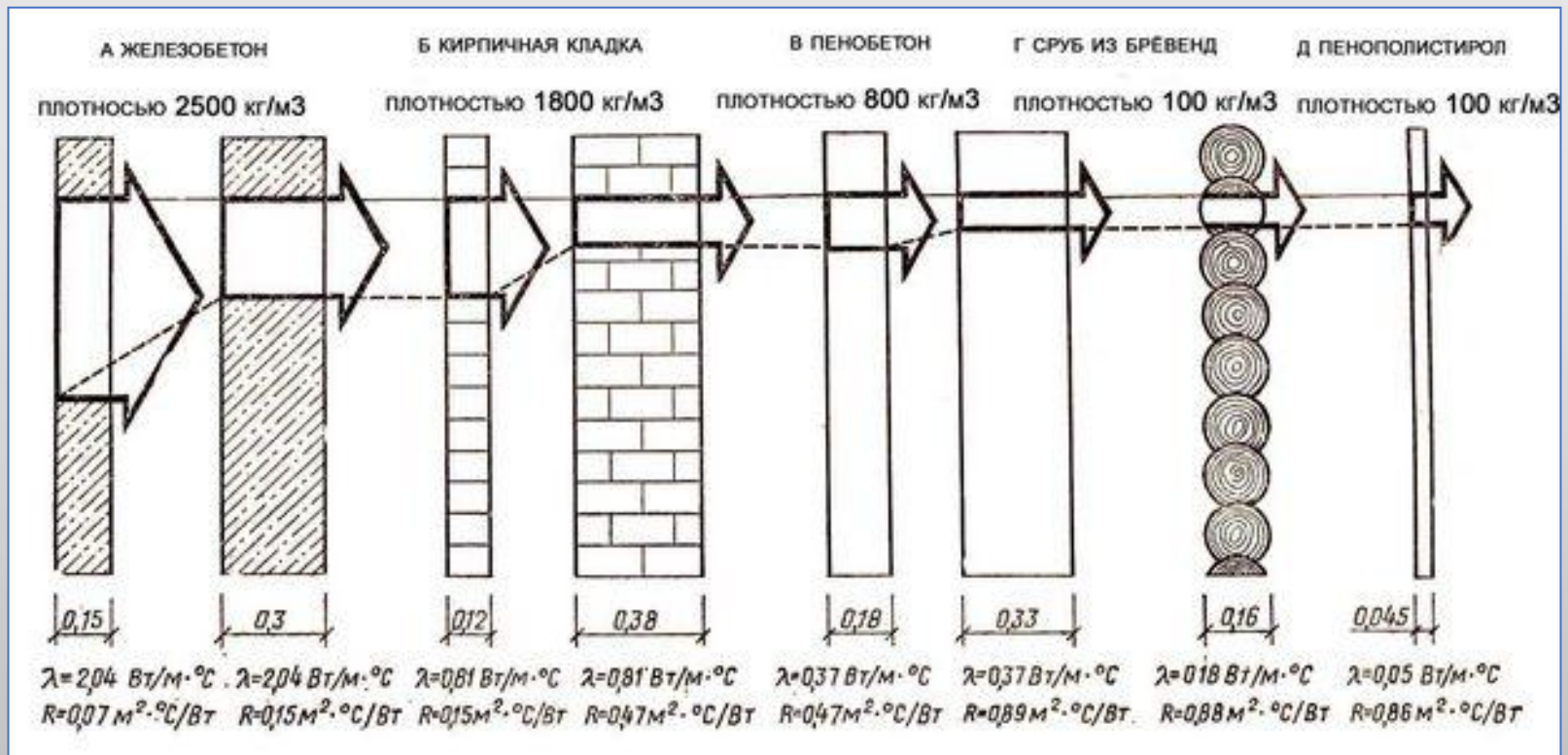


## Тепловое сопротивление

Вернемся к формулам о количестве теплоты, проходящей через однородную стенку при граничных условиях I рода:  $q = \frac{\lambda}{\delta} (\vartheta_1 - \vartheta_2)$ ,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$  и  $Q = \frac{1}{\delta} (\vartheta_1 - \vartheta_2) \cdot F \cdot t$ , Дж.

Запишем их в виде:  $q = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{\frac{\delta}{\lambda}} = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{R}$  и  $Q = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{\frac{\delta}{\lambda}} \cdot F \cdot t = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{R} \cdot F \cdot t$ .

Здесь  $R = \frac{\delta}{\lambda}$ ,  $\frac{\text{м}^2 \cdot \text{град}}{\text{Вт}}$  ( $\frac{\text{м}^2 \cdot \text{час} \cdot \text{град}}{\text{ккал}}$ ) – внутреннее тепловое сопротивление стенки.

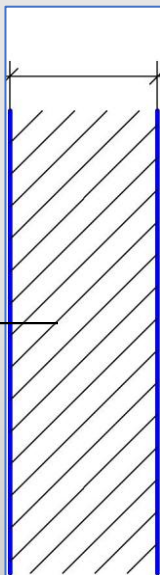


Значения теплового сопротивления стен из различных материалов

Рассматривая аналогично формулу о количестве теплоты, проходящей на контакте между стенкой и окружающей средой при граничном условии III рода ( ), можно представить ее в виде \_\_\_\_\_.

Здесь —, — — - внешнее тепловое сопротивление.

### Пример стального бака с кипящей водой



Тепловые сопротивления равны:

левое внешнее — — — — — ;

внутреннее — — — — — ;

правое внешнее — — — — — .

Малостью тепловых сопротивлений — и — объясняется тот факт, что наружная поверхность бака принимает температуру, почти равную температуре кипящей воды.



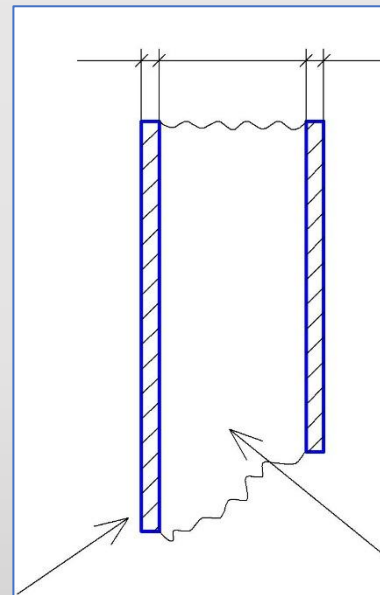
## Теплозащитная роль воздушных прослоек

Теплопроводность воздуха мала - \_\_\_\_\_ при +10°C. Теплота внутри прослоек передается в основном путем вынужденной конвекции при участии излучения.

Пример: окно из двух стекол

Тепловое сопротивление замкнутых воздушных прослоек

Толщина прослойки, мм	Тепловое сопротивление _____, при разности температур на поверхностях прослоек
10	0,15 – 0,17
20	0,16 – 0,18
50	0,16 – 0,20
100	0,17 – 0,22



$$R_{\text{общ}} = R_{\text{в}} + \frac{\delta}{\lambda} + R_{\text{пр}} + \frac{\delta}{\lambda} + R_{\text{н}}$$

$$= 0,130 + \frac{0,005}{0,63} + 0,22 + \frac{0,005}{0,63} + 0,05 = 0,416 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{час} \cdot \text{град}}{\text{ккал}}$$

Значение теплового сопротивления окна из двух стекол близко значению теплового сопротивления кирпичной стены толщиной 38 см.

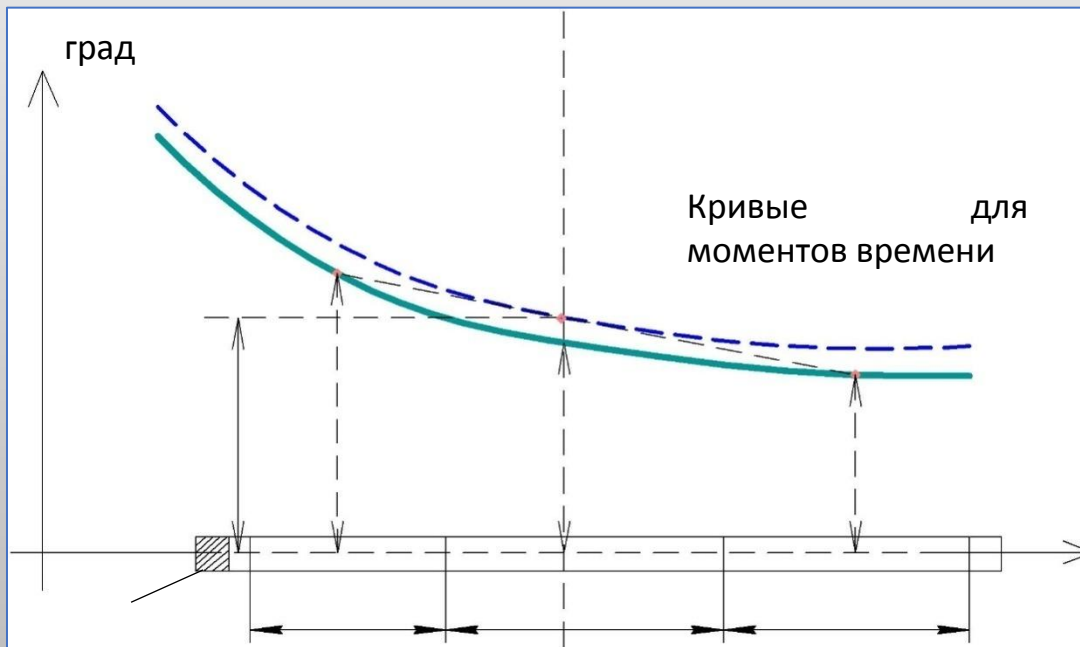
# Метод конечных разностей

Существо метода конечных разностей заключается в том, что в уравнении теплопроводности производные заменяются отношениями конечных величин.

Дифференциальное уравнение таким образом заменяется эквивалентным алгебраическим уравнением. Решение последнего сводится к выполнению алгебраических операций.

Рассмотрим метод на примере нестационарной одномерной задачи теплопроводности (нагрев изолированного стержня или стенки).

- 1) Стержень разделен на конечные отрезки  $\Delta x$ .
- 2) Зафиксированы температуры отрезков  $\vartheta_1, \vartheta, \vartheta_2$  на момент времени  $t$ .



Уравнение Фурье

3) Относительно сечения I – I с обеих сторон возьмем градиенты температуры:

$$\begin{array}{c} \text{—} \\ \text{—} \end{array} \begin{pmatrix} - \\ - \end{pmatrix}$$

4) Расшифруем в конечных величинах вторую производную от температуры:

$$\begin{array}{c} \text{—} \\ \text{—} \end{array} \begin{pmatrix} - \\ - \end{pmatrix} \begin{pmatrix} - \\ - \end{pmatrix} \begin{pmatrix} - \\ - \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phantom{-} \\ \phantom{-} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phantom{-} \\ \phantom{-} \end{pmatrix}$$

$$\begin{array}{c} \text{—} \quad \text{—} \\ \text{—} \end{array} \begin{pmatrix} \phantom{-} \\ \phantom{-} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phantom{-} \\ \phantom{-} \end{pmatrix}$$

5) Производная по времени:

$$\text{—} \quad \text{—} \quad \text{—}$$

здесь температура в сечение I – I в момент времени ( ).

6) Поставим производные 4) и 5) в уравнение Фурье, т. о. получим уравнение Фурье в конечных разностях :

$$\frac{\vartheta' - \vartheta}{(\Delta x)^2} = \frac{\vartheta_1 + \vartheta_2 - 2\vartheta}{(\Delta x)^2} + \vartheta' \quad ( )$$

Здесь неизвестна  $\vartheta'$ .

7) Выразим  $\vartheta'$  из (\*), т.е. решим это уравнение:

$$\vartheta' = \frac{a \cdot \Delta t}{(\Delta x)^2} \cdot (\vartheta_1 + \vartheta_2 - 2\vartheta) + \vartheta.$$

Перепишем последнюю зависимость в виде:

$$\vartheta' = \frac{a \cdot \Delta t}{(\Delta x)^2} \cdot (\vartheta_1 + \vartheta_2) - \frac{a \cdot \Delta t}{(\Delta x)^2} \cdot 2\vartheta + \vartheta,$$

или:

$$\frac{\vartheta' - \vartheta}{(\Delta x)^2} = \frac{\vartheta_1 + \vartheta_2 - 2\vartheta}{(\Delta x)^2} + \vartheta' \quad ( )$$

Это решение уравнения Фурье в конечных разностях.

8) Решение (\*\*) можно упростить. Для этого следует принять:  $\overline{\quad}$   
 тогда решение (\*\*) получит вид:

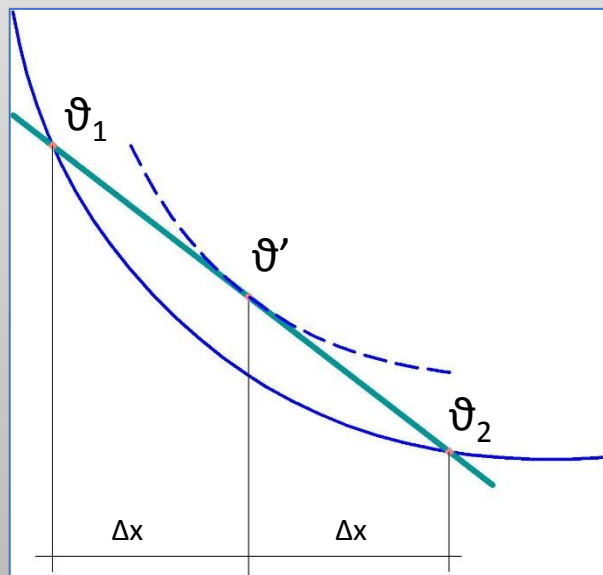
$$- \left( \quad \right)$$

Это решение уравнения Фурье в конечных разностях при условии:

$$\sqrt{\quad}$$

Последнее выражение является условием устойчивости решения и задает соотношение между шагом по координате и шагом по времени.

9) Температуру  $\vartheta'$  по упрощенному решению можно определить графически, пользуясь приемом Э. Шмидта (1924 г.).



# Нестационарная теплопроводность стенки: графический расчет методом конечных разностей

## Исходные данные

Толщина стенки  $2\delta = 1,60$  м;

коэффициент температуропроводности материала стенки  $a = 0,00177$  м<sup>2</sup>/час (0,491 м<sup>2</sup>/с);

температура стенки в начальный момент времени  $\vartheta_{\text{нач}} = 12^\circ\text{C} = \text{const}$ ;

в начальный же момент времени ограничивающие поверхности стенки охлаждаются до температуры  $\vartheta_{\text{пов}} = 2^\circ\text{C}$ , которая поддерживается далее на протяжении всего процесса охлаждения.

Требуется: произвести расчет температурного режима стенки в процессе ее охлаждения методом конечных разностей.

## Математическое описание процесса теплопроводности

Дифференциальное уравнение Фурье:

$$\frac{\partial \vartheta(x, t)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \vartheta(x, t)}{\partial x^2},$$

где  $t \geq 0$ ,  $-\delta \leq x \leq \delta$ .

Краевые условия:

$$\vartheta(x, 0) = f(t) = \vartheta_{\text{нач}} = 12^\circ\text{C} = \text{const};$$

$$\vartheta(+\delta, t) = \vartheta_{\text{пов}} = 2^\circ\text{C} = \text{const};$$

$$\vartheta(-\delta, t) = \vartheta_{\text{пов}} = 2^\circ\text{C} = \text{const};$$

из которых первое является начальным, второе и третье – граничными.

Здесь:  $x$  – координата, м;  $\vartheta$  – температура, град;  $t$  – время, часы (с).

## Решение уравнения Фурье в конечных разностях

Решение уравнения Фурье в конечных разностях имеет вид:  $\vartheta' = \frac{1}{2}(\vartheta_1 + \vartheta_2)$ ,

при условии:  $\Delta t = \frac{\Delta \ell^2}{2a}$ ,

где  $\Delta \ell$  (или  $\Delta x$ ) – толщина элемента, на которые разделяется стенка, м;

$\Delta t$  – элементарный отрезок времени, час (с);

$\vartheta'$  – температура среднего элемента в будущий момент времени  $t + \Delta t$ ;

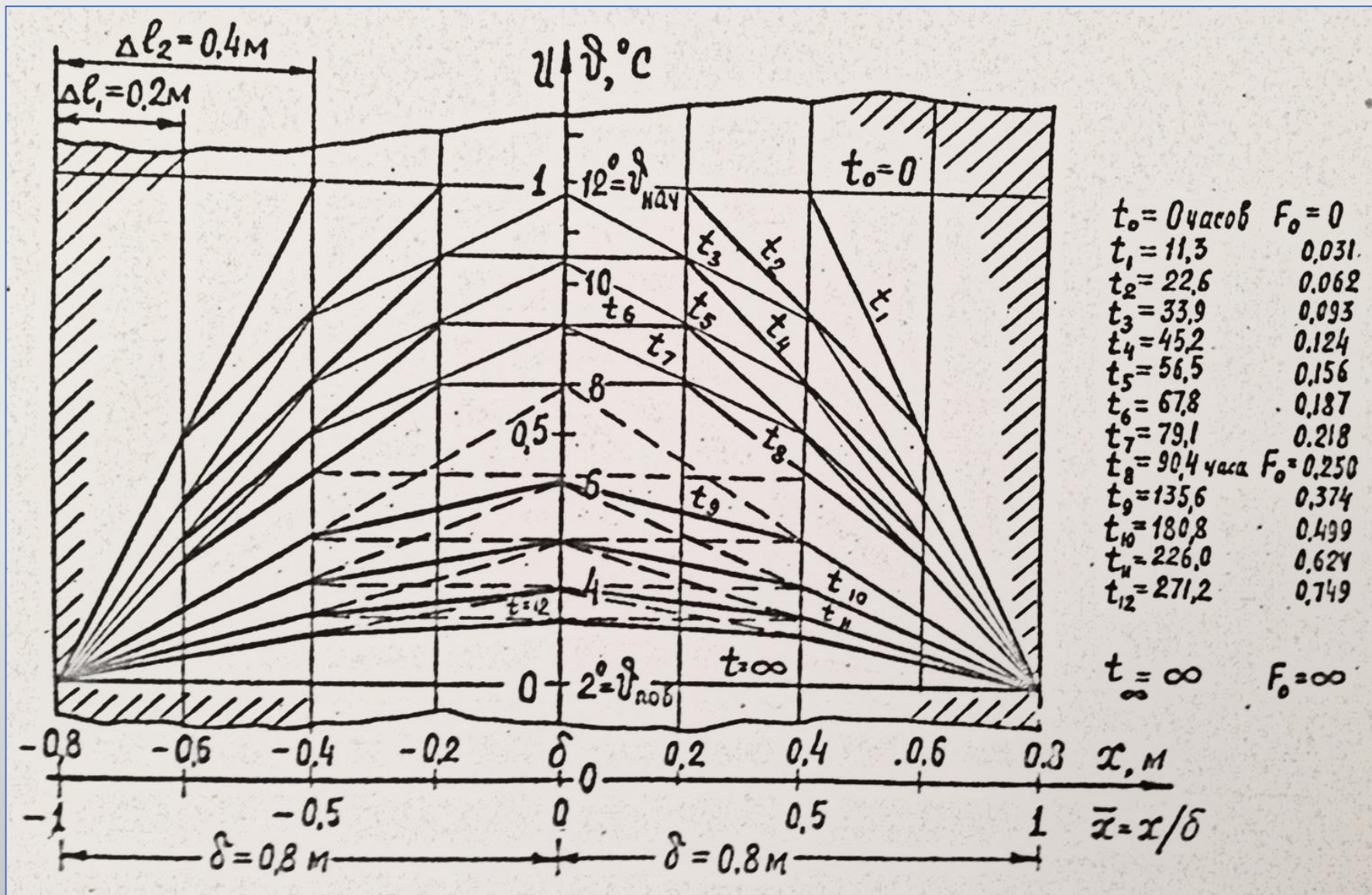
$\vartheta_1$  и  $\vartheta_2$  – температуры двух соседних с ним элементов в настоящий момент времени  $t$ .

### Порядок расчета (см. рисунок)

1. Стенка разделяется по толщине на элементы. В примере таких элементов 8; каждый из них имеет толщину  $\Delta \ell_1 = 0,2$  м.
2. Назначается интервал времени:  $\Delta t_1 = \frac{\Delta \ell_1^2}{2a} = \frac{0,2^2}{2 \cdot 0,00177} = 11,3$  часа (40680 с).
3. Строятся температурные профили  $\vartheta = f(x, t)$  на моменты времени  $t_1 = \Delta t_1$ ,  $t_2 = 2\Delta t_1, \dots, t_8 = 8\Delta t_1$ .
4. Выполняется переход к более крупному интервалу времени  $\Delta t_2$ : стенка разбивается по толщине на четыре элемента с  $\Delta \ell_2 = 0,4$  м; тогда  $\Delta t_2 = \frac{\Delta \ell_2^2}{2a} = \frac{0,4^2}{2 \cdot 0,00177} = 45,9$  час (165240 с).
5. С интервалом времени  $\Delta t_2$  строятся температурные профили  $t_9 = 8\Delta t_1 + \Delta t_2$ ;  $t_{10} = 8\Delta t_1 + 2\Delta t_2$  и т. д. до окончания охлаждения стенки.

### Результат

Таким образом построены температурные профили на различные моменты времени  $t$  в координатах  $x$ (м) и  $\vartheta$ (°C); с помощью этих профилей прослеживается весь процесс охлаждения стенки от  $\vartheta_{\text{нач}} = 12^\circ\text{C}$  до  $\vartheta_{\text{пов}} = 2^\circ\text{C}$ .



Графический расчет температурного режима стенки методом конечных разностей: каждый температурный профиль маркирован моментами времени и числом Фурье



## Безразмерные переменные

Запишем уравнение Фурье в безразмерном виде (на примере стенки).

Примем:

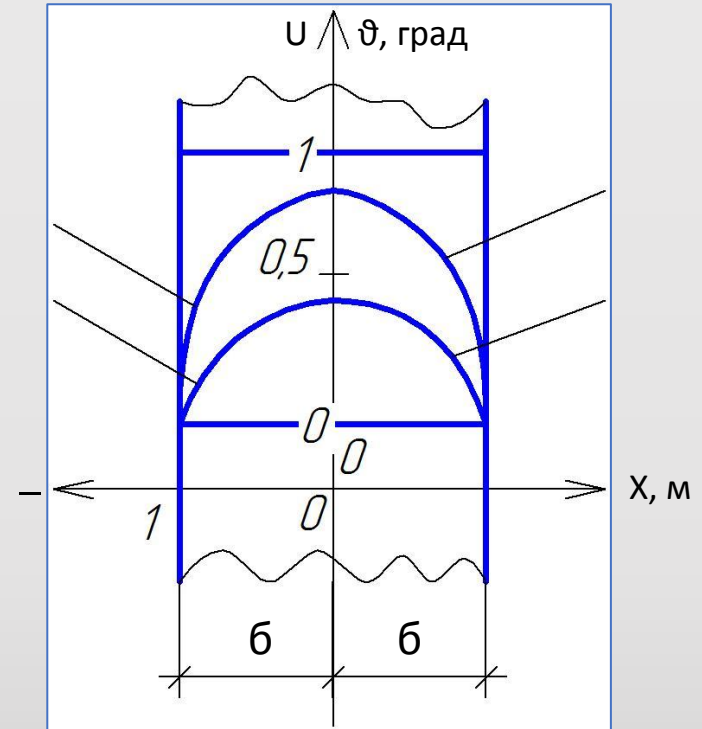
1) За единицу масштаба  $\vartheta$  разность температур ( $\vartheta_{\text{нач}} - \vartheta_{\text{пов}}$ ); тогда можно ввести понятие относительной температуры:

$$U = \frac{\vartheta - \vartheta_{\text{пов}}}{\vartheta_{\text{нач}} - \vartheta_{\text{пов}}}, \text{ причем } 0 \leq U \leq 1.$$

Отсюда  $\vartheta = U(\vartheta_{\text{нач}} - \vartheta_{\text{пов}}) + \vartheta_{\text{пов}}$ .

2) За единицу масштаба длин – полутолщину стенки  $\delta$ ; тогда относительная координата будет:  $\bar{x} = \frac{x}{\delta}$ , причем  $0 \leq \bar{x} \leq 1$ .

Отсюда  $x = \bar{x} \cdot \delta$ .



Подставим в уравнение Фурье значения  $\vartheta$  и  $x$ , выраженные через  $U$  и  $\bar{x}$ , и получим его в безразмерном виде:  $\frac{\partial^2 U}{\partial \bar{x}^2} = \frac{\partial U}{\partial \left(\frac{at}{\delta^2}\right)}$ . Величина  $\frac{at}{\delta^2} = F_0$  называется числом Фурье и является безразмерным временем.

Каждый температурный профиль стенки маркируется числом Фурье и задача получает решение в безразмерных величинах  $U$ ,  $\bar{x}$  и  $F_0$ .

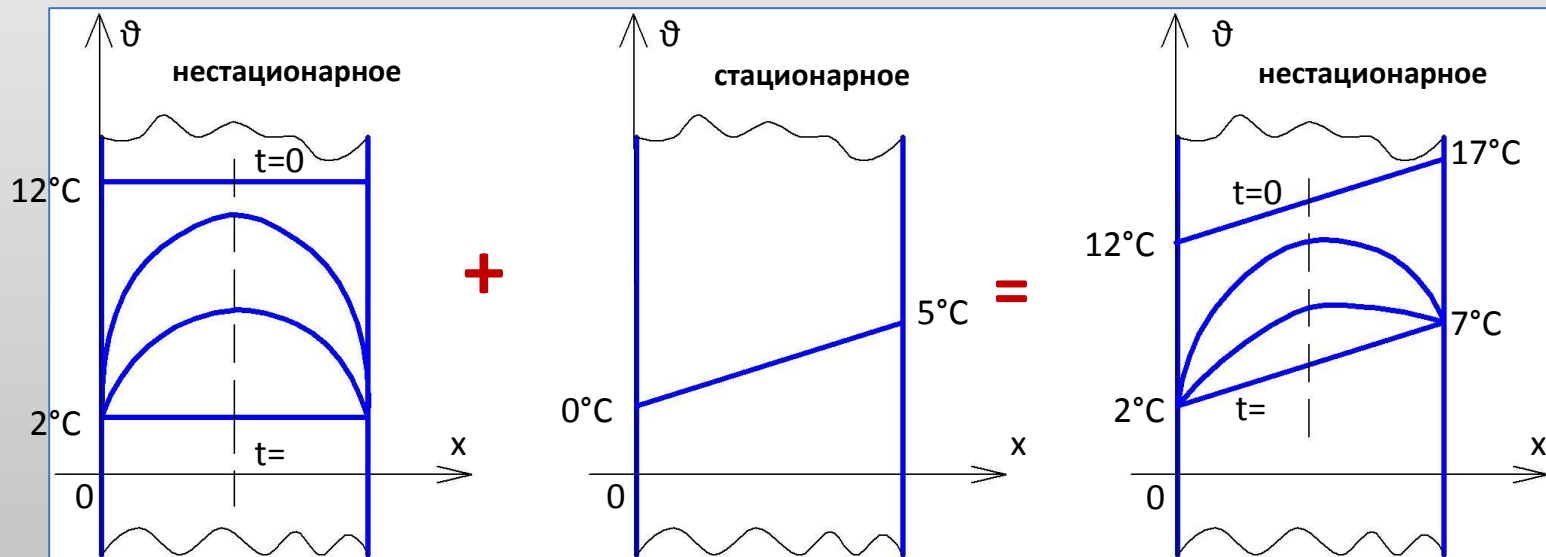
## Сложение температурных полей (суперпозиция)

Если имеется два температурных поля, причем:

- в обоих случаях геометрическая форма тела одинакова (одно и то же тело);
- материал один и тот же ( );
- система координат общая ( );
- время ( ) общее – отчет ведется от одного момента и в одних единицах,

то эти температурные поля можно складывать.

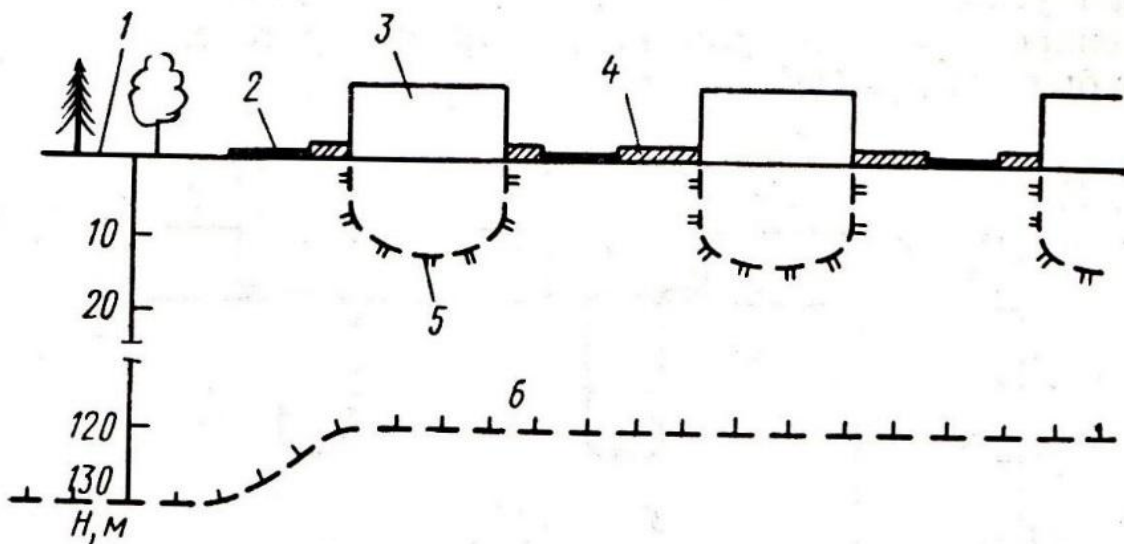
Пример – температурное поле стенки:



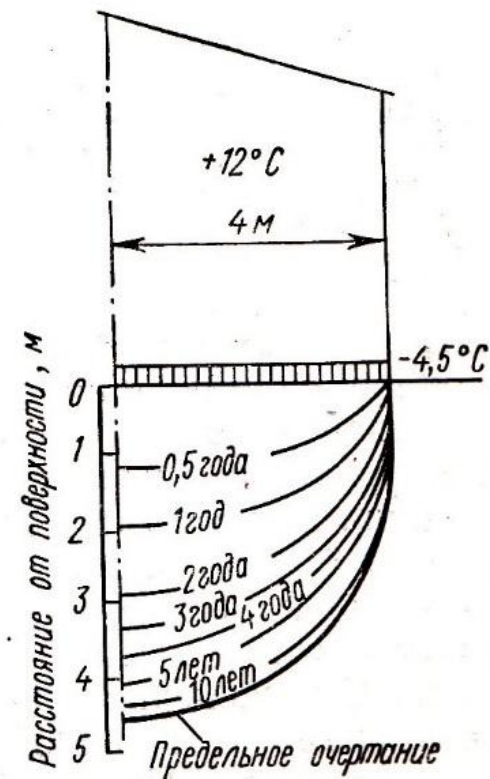
Используя суперпозицию из решений для простых случаев, можно получить решения для более сложных случаев.

# Расчеты оттаивания мерзлых грунтовых оснований при отсутствии фильтрации воды

Мерзлые грунтовые основания в результате отепляющего воздействия зданий и сооружений подвержены оттаиванию.



Формирование чаш оттаивания под зданиями при большой мощности мерзлой толщи: 1 — участки с естественными условиями; 2 — проезжие части дорог, 3 — здания, 4 — газоны, 5 — граница чаш оттаивания под зданиями, 6 — нижняя граница многолетнемерзлой толщи после застройки территории

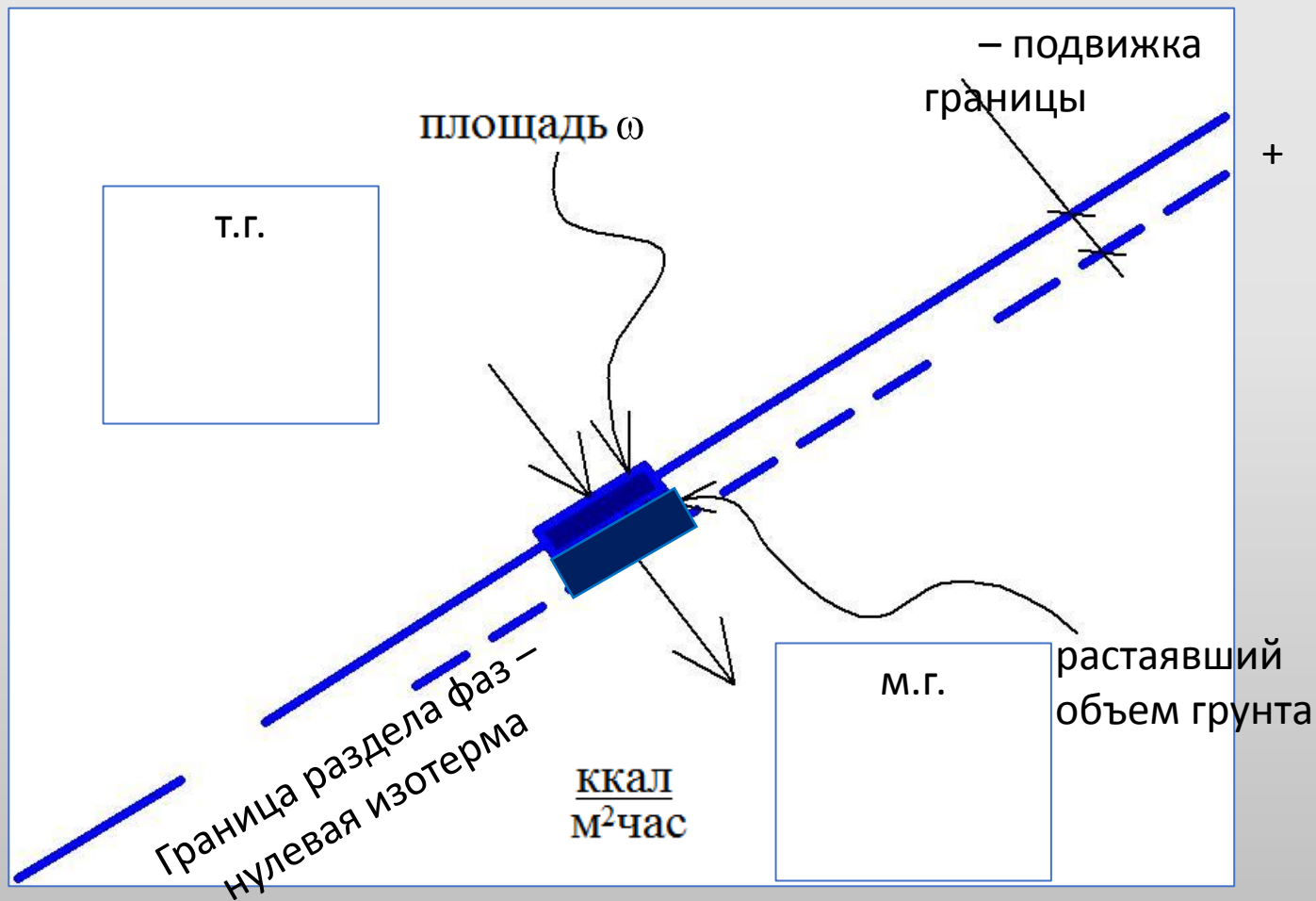


Динамика чаши протаивания

## Условие на границе раздела фаз при оттаивании-промерзании грунта

Для оттаивания мерзлого грунта требуется затратить тепло, при промерзании талого грунта – отнять.

Рассмотрим двухфазную среду с границей раздела фаз:



(при переходе через границу « $\lambda$ » и « $a$ » изменяются скачкообразно)

Через границу идет тепловой поток плотностью

ккал/м<sup>2</sup> час.

За время на границе выделится количество теплоты:

( ) ( )

За это время изотерма подвинется на , м.

Выделившаяся теплота пойдет на растаивание следующей массы льда, т:

где – пористость грунта (объем пор в единице объема грунта);

– объем грунта;

– объем льда в грунте (полагается что все поры заполнены льдом);

– плотность льда, т/м<sup>3</sup>;

т/м<sup>3</sup>

Что бы растаять эту массу льда необходимо количество теплоты:

( )

где – теплота плавления льда, ккал/т.

Мкал/т

Считая, что вся выделившаяся на границе теплота пошла на растаивание льда, запишем тепловой баланс:

( )

Отсюда можно выразить подвеличину нулевой изотермы в разной форме:

( ) —

Знаки  
мерзнет

или записать условие на границе раздела фаз в дифференциальной форме:

—

Это уравнение называют условием Стефана.

Параметр      – скрытое тепло изменения агрегатного состояния влаги в порах грунта, Мкал/м<sup>3</sup>.

Пример: если  $n = 0,35$ , то  $\gamma_{лn} L = 0,92 \cdot 0,35 \cdot 78,6 = 25 \text{ Мкал/м}^3$ .

# Одномерная задача промерзания - оттаивания грунта: приближенное аналитическое решение

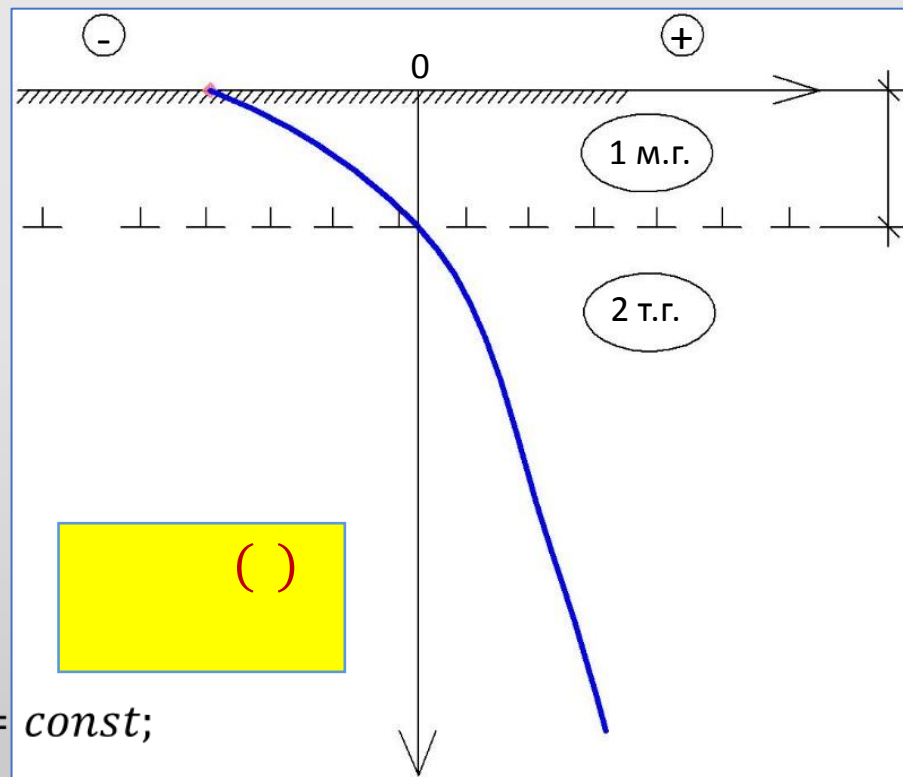
Л. С. Лейбензона

Формулировка задачи промерзания грунта (в общей постановке)

В каждой зоне (1 и 2) процесс описывается уравнением Фурье:

— для

— для



с краевыми условиями:

начальными 1)  $\vartheta_2(z, 0) = f(z)$ ,

$$\xi(0) = 0;$$

граничными 2)  $\vartheta_1(0, t) = \vartheta_{\text{пов}} = f(t)$ ;

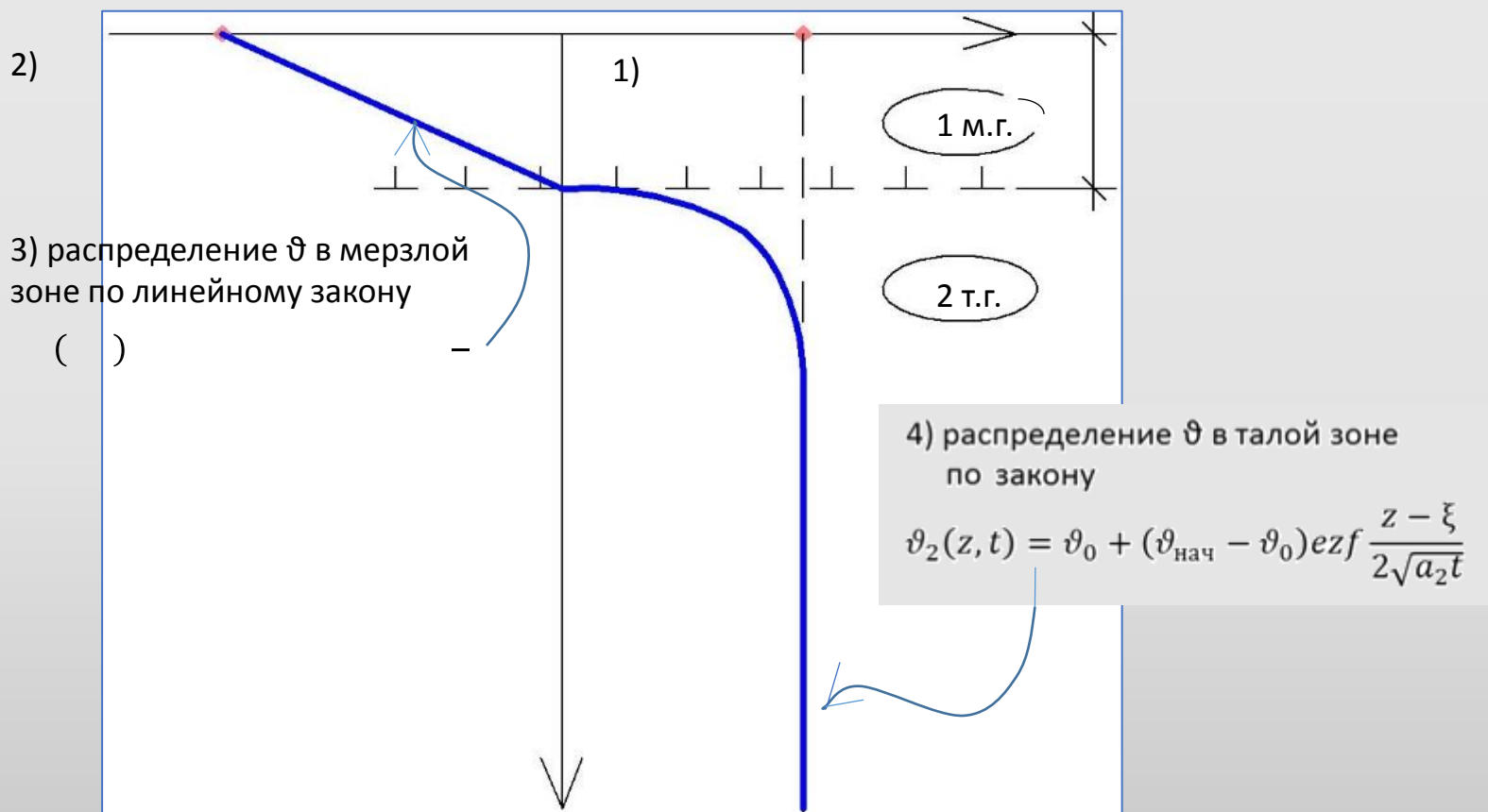
$$3) \vartheta_1(\xi, t) = \vartheta_2(\xi, t) = \vartheta_0 = \text{const};$$

$$4) \frac{\partial \vartheta_2(\infty, t)}{\partial z} = 0$$

и условием на границе раздела фаз:  $\lambda_1 \frac{\partial \vartheta_1(\xi, t)}{\partial z} - \lambda_2 \frac{\partial \vartheta_2(\xi, t)}{\partial z} = \gamma_{\text{л}} n L \cdot \frac{d\xi}{dt}$ .

## Приближенное аналитическое решение Л. С. Лейбензона (1931 г, СССР)

Принято следующее распределение температуры:



Выбранные функции для  $\vartheta_1$  и  $\vartheta_2$  удовлетворяют начальным и граничным условиям, а так же дифференциальным уравнениям Фурье (это можно проверить).



Найдем градиенты температуры на границе раздела фаз:

$$\frac{\partial \vartheta_1}{\partial z} = \frac{\vartheta_0 - \vartheta_{\text{пов}}}{\xi}; \quad \frac{\partial \vartheta_2}{\partial z} = \frac{\vartheta_{\text{нач}} - \vartheta_0}{\sqrt{\pi a_2 t}}.$$

Тогда из условия на границе раздела фаз следует:

$$\lambda_1 \cdot \frac{\vartheta_0 - \vartheta_{\text{пов}}}{\xi} - \lambda_2 \cdot \frac{\vartheta_{\text{нач}} - \vartheta_0}{\sqrt{\pi a_2 t}} = \gamma_{\text{л}} n L \cdot \frac{d\xi}{dt}. \quad ( )$$

Решение уравнения (\*) относительно  $\xi$  при начальном условии  $\xi(0)=0$  есть:

$$\xi = \sqrt{\frac{2 \lambda_1 (\vartheta_0 - \vartheta_{\text{пов}}) t}{\gamma_{\text{л}} n L}}. \quad ( )$$

Подставляя выражение для (\*\*\*) в уравнение ( ) и интегрируя правую часть (отдельно числитель и знаменатель), получим характеристическое уравнение для определения коэффициента  $\beta$  :

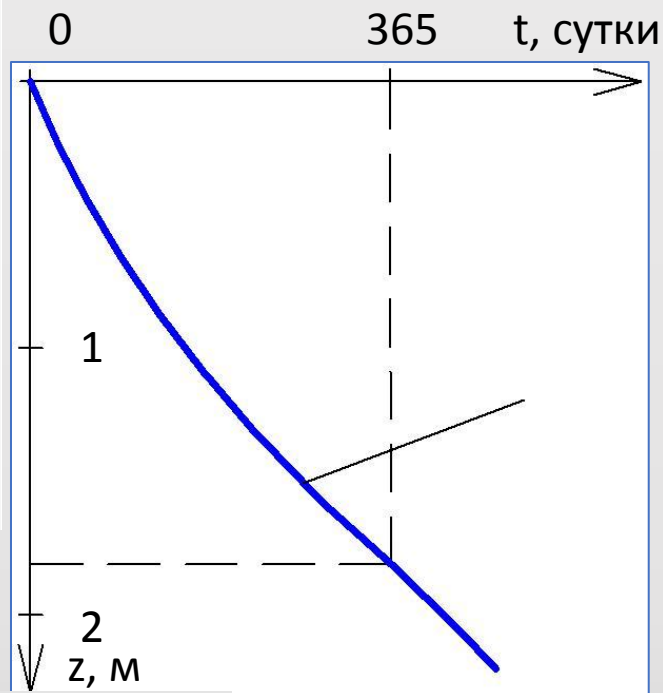
$$\lambda_1 \frac{\vartheta_0 - \vartheta_{\text{пов}}}{\beta} - \lambda_2 \frac{\vartheta_{\text{нач}} - \vartheta_0}{\sqrt{\pi a_2}} = \gamma_{\text{л}} n L \cdot \frac{1}{2} \cdot \beta. \quad ( )$$

Коэффициент  $\beta$  может быть из выражения (\*\*\*) выведен в явном виде:

$$\beta_{\text{зам}} = \frac{-\frac{\lambda_2(\vartheta_{\text{нач}} - \vartheta_0)}{\sqrt{\pi a_2}} + \sqrt{\frac{\lambda_2^2(\vartheta_{\text{нач}} - \vartheta_0)^2}{\pi a_2} + 2\gamma n L \lambda_1(\vartheta_0 - \vartheta_{\text{пов}})}}{\gamma n L}$$

Здесь  $\vartheta_{\text{нач}} = \oplus$ ;  $\vartheta_0 = 0$ ;  $\vartheta_{\text{пов}} = \ominus$ ;  $\beta = \text{м/сутки}^{1/2}$ .

Кривая промерзания грунта, определенная по формуле (\*\*), будет иметь вид, изображенный на графике.



Точно так же по формуле Л. С. Лейбензона (\*\*\*) можно рассчитать оттаивание грунта. В этом случае:

$$\beta_{\text{отт}} = \frac{-\frac{\lambda_1(\vartheta_0 - \vartheta_{\text{нач}})}{\sqrt{\pi a_1}} + \sqrt{\frac{\lambda_1^2(\vartheta_0 - \vartheta_{\text{нач}})^2}{\pi a_1} + 2\gamma n L \lambda_2(\vartheta_{\text{пов}} - \vartheta_0)}}{\gamma n L}$$

Здесь  $\vartheta_{\text{нач}} = \ominus$ ;  $\vartheta_0 = 0$ ;  $\vartheta_{\text{пов}} = \oplus$ .

# Учет зависимости $\lambda = f(\vartheta)$ в задачах о стационарной теплопроводности [Богословский, 1957]

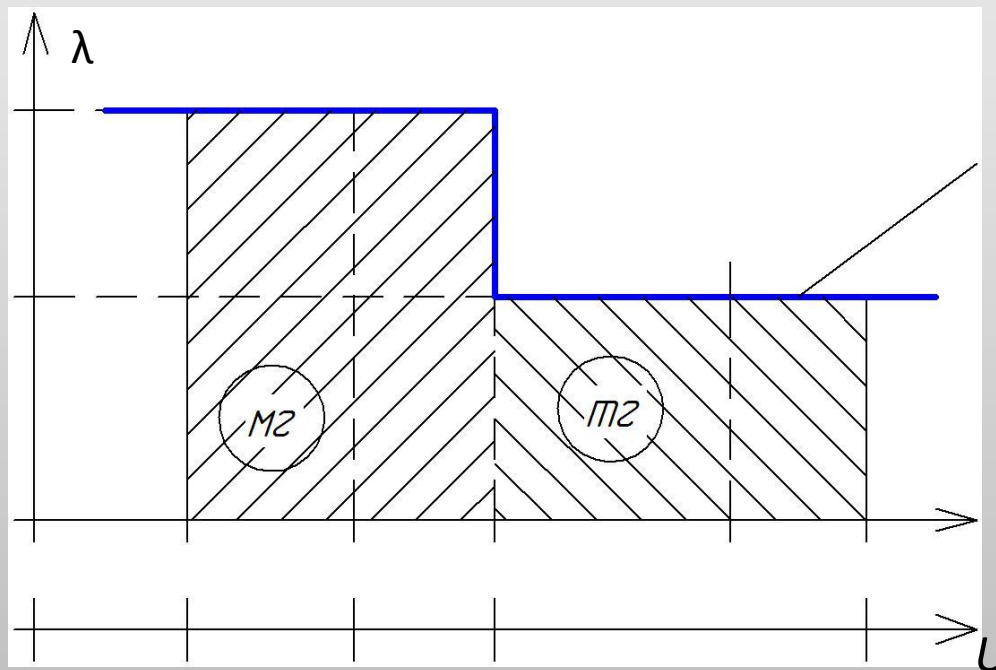
Уравнение стационарной теплопроводности для температуры  $\vartheta$ , при  $\lambda = f(\vartheta)$ :

$$-\left( \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right) \right) = 0$$

Уравнение стационарной теплопроводности для относительной температуры  $U$  при  $\lambda = f(\vartheta)$ :

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial U}{\partial x} \right) = 0$$

В практических расчетах обычно принимают



Вводят шкалу относительной температуры  $U$ .

Связь между (вывод опущен) записывается в виде:

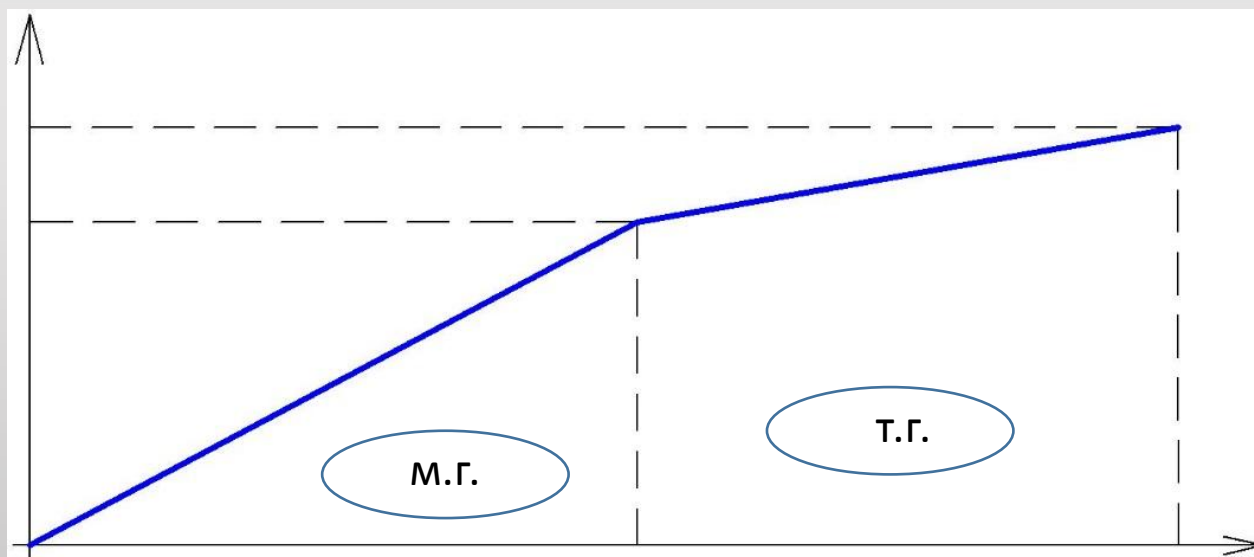
для зоны мерзлого грунта:

$$\frac{(\quad)}{(\quad)}$$

для зоны талого грунта:

$$\frac{(\quad)}{(\quad)}$$

Связь линейная, т.е. зависимость  $U = f(\vartheta)$  в зонах мг и тг – прямая линия:

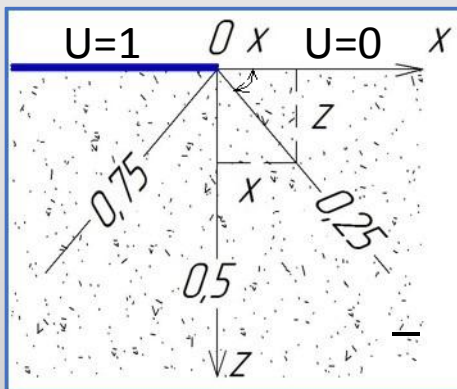


Задачи о стационарной теплопроводности удобно решаются в относительной температуре  $U$ , связь между  $\vartheta$  и  $U$  осуществляется по вышеприведенным зависимостям.

# Задача о стационарном температурном состоянии основания сооружения (двухразмерные условия)

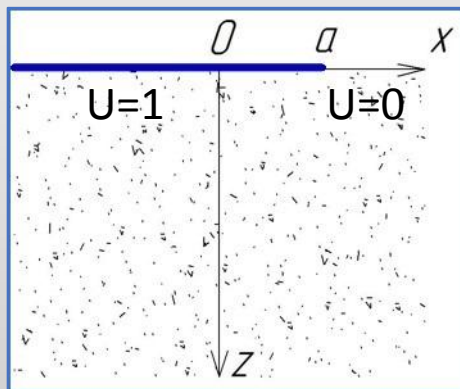
Хотим получить решение задачи **Г**. Применим уравнение Лапласа для температуры  $U$ . Воспользуемся приемом суперпозиции **Б** - **В** = **Г**.

**А** Возьмем задачу



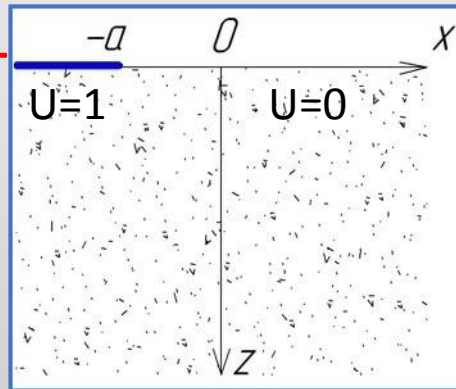
Решение ее элементарно:  
- arctg -

**Б** Воспользуемся приемом суперпозиции предварительно сместив координатные оси

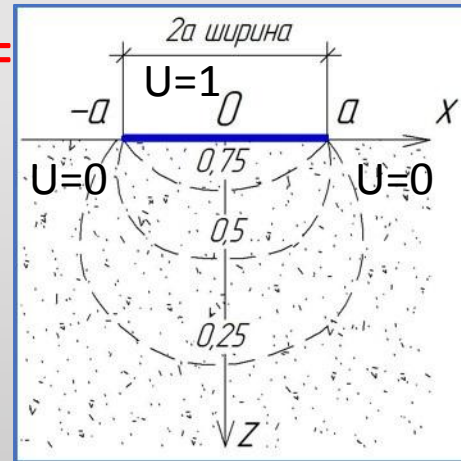


- arctg -

**В** **Г** Получим решение



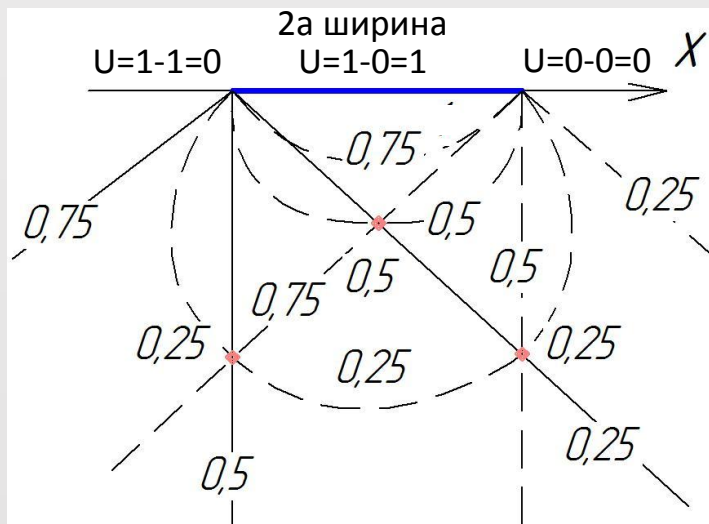
- arctg -



- arctg -

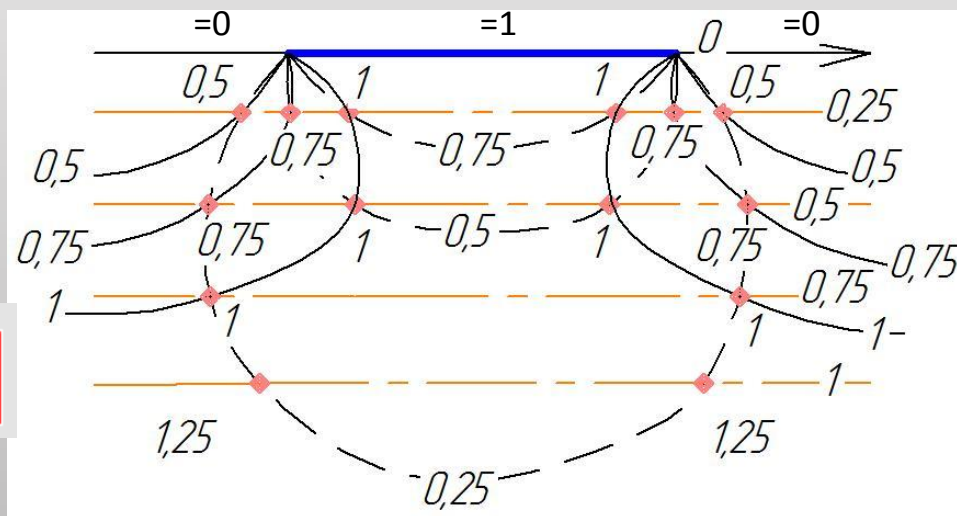
- arctg -

Суперпозицию температурных полей можно осуществить графически:



$$U_{\Gamma} = U_{\text{Б}} - U_{\text{В}}$$

При необходимости путем суперпозиции можно прибавить температурное поле недр Земли, изображенное в относительной температуре в виде горизонтальных изотерм:



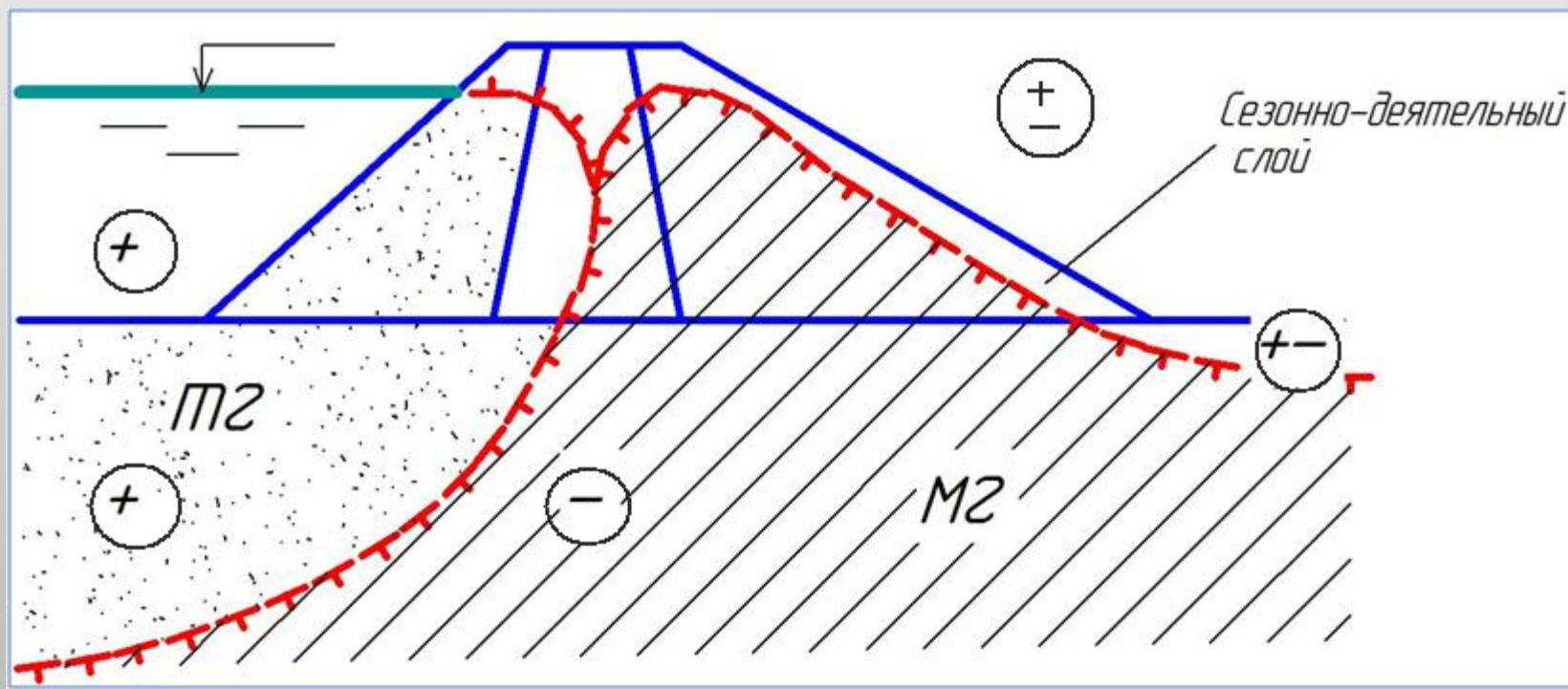
$$U = U_{\Gamma} - U_{\text{недр}}$$

Затем температуру  $U$  можно привести в температуру град.

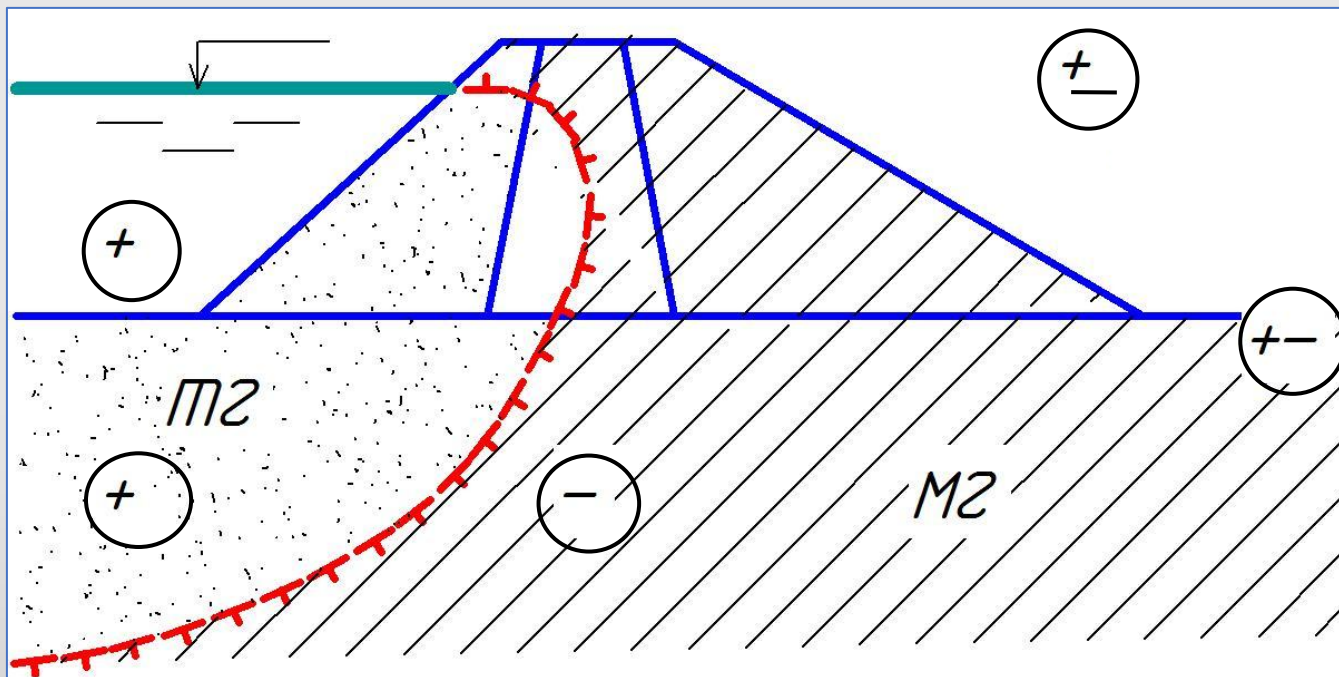
# Расчеты температурного режима нефльтрующих мерзлых земляных плотин

## Виды температурного режима

- 1 В процессе эксплуатации температура тела и основания плотины изменяется со временем:  $\vartheta = f(x, y, z, t)$ . Это нестационарный температурный режим.
- 2 По прошествии времени (20 – 50 – 100 лет) температурный режим плотины стабилизируется, наступает предельное температурное (квазистационарное) состояние  $\vartheta = f(x, y, z, t)$ .



3 Показателем предельного состояния плотины при постоянных (среднемесячных) температурах воздуха и воды является стационарное температурное состояние ( ) от времени не зависит.



При проектировании плотины необходим прогноз температурного режима:

а) для оценки размеров и конфигурации мерзлой зоны, обеспечивающей прочность и водонепроницаемость плотины;

б) для создания в период строительства в плотине температурных условий, близких к предельным, чтобы избежать возможных деформаций, связанных с переформированием температуры после постройки.



# Нестационарная плоская задача теплопроводности: решение методом конечных разностей

Процесс описывается уравнением

Фурье:

$$a \left( \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} \right) = \frac{\partial \vartheta}{\partial t}, \quad \vartheta = f(x, y, 0, t)$$

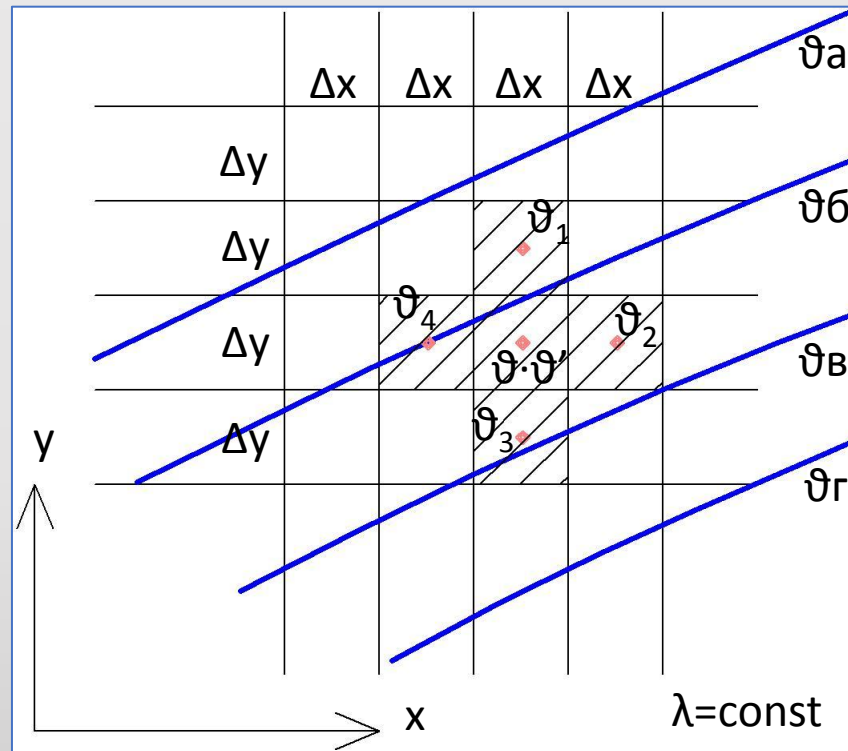
Поле покрыто конечноразностной сеткой с квадратными ячейками  $\Delta x = \Delta y$ .

Решение уравнения Фурье в конечных разностях явным методом имеет вид:

$$\vartheta' = \frac{1}{4} (\vartheta_1 + \vartheta_2 + \vartheta_3 + \vartheta_4)$$

при условии  $\Delta x = \sqrt{4 \cdot a \cdot \Delta t}$ .

Температурное поле на момент времени  $t$



Здесь температуры

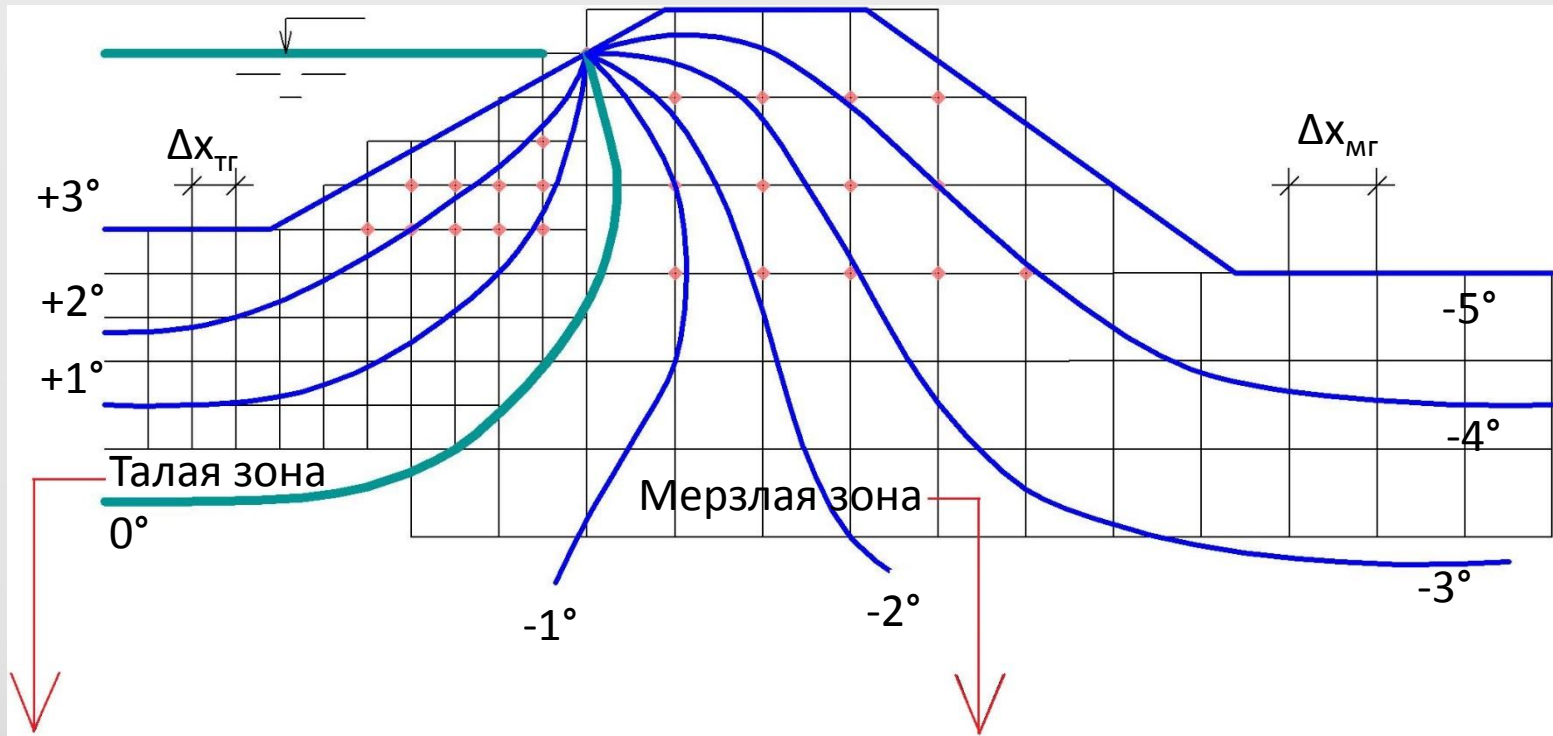
соответствуют моменту времени ;

температура на момент времени

коэффициент теплопроводности грунта,

Рассчитав температуры во всех ячейках (узлах) сетки можно построить изотермы температурного поля на момент времени .

На профиле грунтовой плотины конечноразностная сетка разбивается так:



$$\left( \frac{\Delta x_{тр}}{\Delta x_{мг}} \right) \frac{\Delta t}{\Delta t} = \frac{\Delta x_{тр}}{\Delta x_{мг}}$$

$$\left( \frac{\Delta x_{тр}}{\Delta x_{мг}} \right) \frac{\Delta t}{\Delta t} = \frac{\Delta x_{тр}}{\Delta x_{мг}}$$

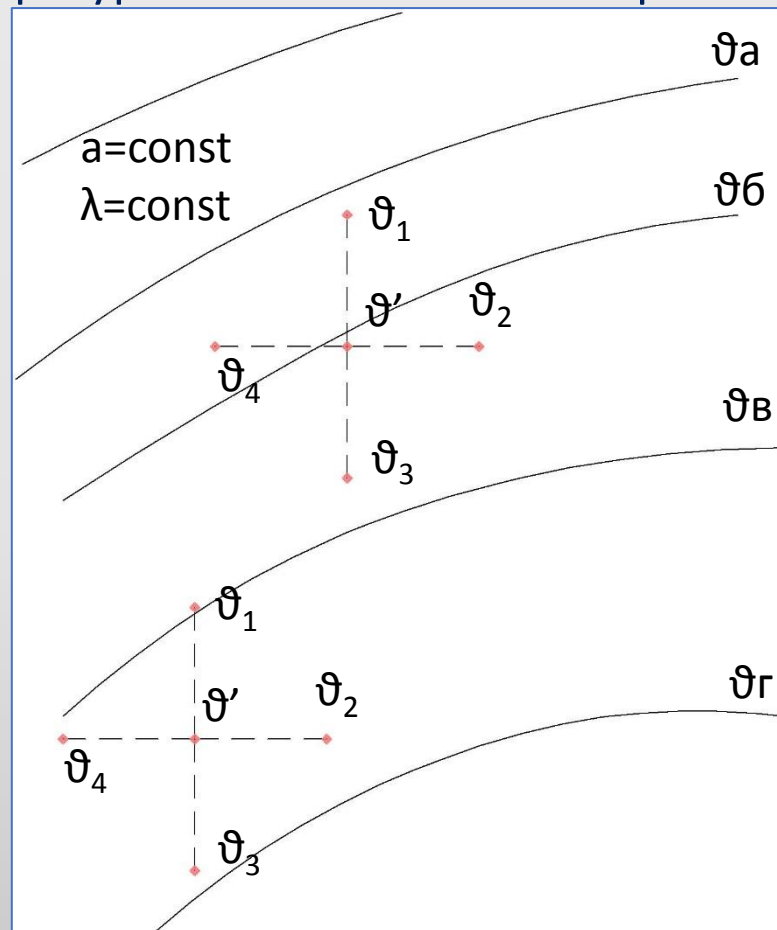
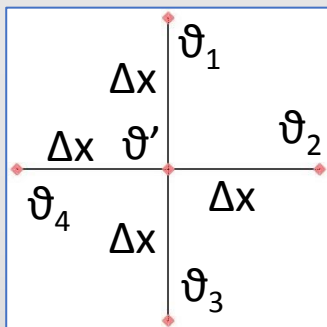
Так как  $\frac{\Delta x_{тр}}{\Delta x_{мг}} \neq 1$ , то для получения единого шага по времени  $\Delta t$  сетка в талой и мерзлой зонах будет иметь разные размеры  $\Delta x$ .

Неудобство: откосы плотины и линию раздела талой и мерзлой зон приходится аппроксимировать ломаными линиями.

П. А. Богословским был предложен метод расчета температур  $\vartheta'$  с помощью креста-трафарета (без закрепления координатных осей и разбиения сетки).

Температурное поле на момент времени  $t$

Крест-трафарет с лучами длиной  $\Delta x$



Передвигая крест-трафарет по полю температур на момент времени , можно вычислить температуру на момент времени в любых точках, по значениям которой построить изотермы температурного поля на момент времени [Богословский, 1957]

## Постановка и решение двумерной задачи расчета температурного режима мерзлой земляной плотины

Рассматривается земляная плотина из мерзлого грунта с температурой  $-12^{\circ}\text{C}$ , возникшая в момент времени  $t = 0$  на мерзлом основании.

Решается двумерная задача о нестационарной теплопроводности в однородном грунте тела и основания плотины с учетом изменения агрегатного состояния влаги в порах.

Начальные и граничные условия показаны на рис. А. Требуется построить температурные профили на моменты времени  $t = 1$  год, 3 года, 5 лет с начала эксплуатации плотины.

**Распределение температуры** описывается дифференциальным уравнением Фурье:

в зоне талого грунта

$$\left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

в зоне мерзлого грунта

$$\left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

где  $T$  — температура грунта,

$x, y$  — прямоугольные координаты, м;

$t$  — время, сутки;

$\lambda_1, \lambda_2$  — коэффициент теплопроводности талого, мерзлого грунта,

## Условия на границе раздела талой и мерзлой зон:

$$\vartheta_{\text{МГ}} = \vartheta_{\text{ТГ}} = \vartheta_0 = 0^\circ\text{C};$$

$$\lambda_{\text{МГ}} |\text{grad} \vartheta_{\text{МГ}}| - \lambda_{\text{ТГ}} |\text{grad} \vartheta_{\text{ТГ}}| = \gamma_{\text{Л}} n L \frac{\partial \xi}{\partial t},$$

где:  $\vartheta_{\text{МГ}}$  – температура мерзлого грунта,  $^\circ\text{C}$ ;  $\vartheta_{\text{ТГ}}$  – то же, талого грунта;  
 $\text{grad} \vartheta$  – градиент температуры,  $^\circ\text{C}/\text{м}$ ;  $\xi$  – подвижка изотермы  $\vartheta_0 = 0^\circ\text{C}$ , м;  
 $\lambda_{\text{МГ,ТГ}}$  – коэффициент теплопроводности мерзлого, талого грунта,  
 Мкал/(м·сутки·град).

Решение уравнений для температуры ( ) методом конечных разностей имеет вид:

$$\vartheta' = \frac{1}{4} (\vartheta_1 + \vartheta_2 + \vartheta_3 + \vartheta_4), \text{ } ^\circ\text{C},$$

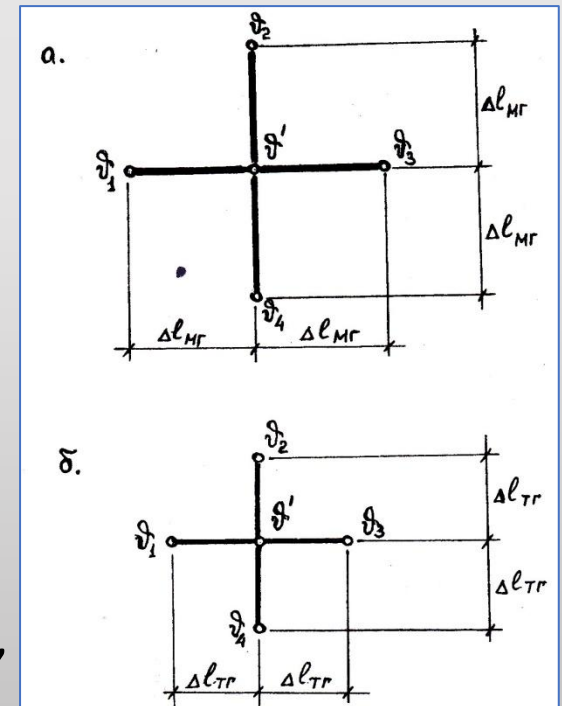
при условии

$$\Delta l = 2\sqrt{a \cdot \Delta t}, \text{ м},$$

где  $\Delta l$  – размер луча креста-трафарета, если сетка не используется;

$a$  – коэффициент температуропроводности талого, либо мерзлого грунта,  $\text{м}^2/\text{сутки}$ ;

$\Delta t$  – элементарный период времени, сутки;



**Схема крестов-трафаретов**

$a$  – для зоны мерзлого грунта;  $b$  – для зоны талого грунта ( $\Delta l_{\text{МГ}} > \Delta l_{\text{ТГ}}$ ).

$\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3, \vartheta_4$  – температура грунта на концах лучей креста-трафарета в момент времени  $t$  ;

$\vartheta'$  – температура в центральном узле креста-трафарета в момент времени  $t + \Delta t$ .

**Подвижка границы раздела талого и мерзлого грунтов** (нулевой изотермы)

$\Delta \xi$ , м, за период  $\Delta t$  суток, равна:

$$\Delta \xi = \Delta \xi_{\text{МГ}} - \Delta \xi_{\text{ТГ}} = \lambda_{\text{МГ}} |\text{grad} \vartheta_{\text{МГ}}| \frac{\Delta t}{\gamma_{\text{Л}} n L} - \lambda_{\text{ТГ}} |\text{grad} \vartheta_{\text{ТГ}}| \frac{\Delta t}{\gamma_{\text{Л}} n L} .$$

Положительное значение  $\Delta \xi$  указывает на продвижение нулевой изотермы в сторону талого грунта, отрицательное – в сторону мерзлого грунта.

## Этапы расчета температурного режима плотины

### 1. Температурное состояние плотины на момент времени $t = 1$ год.

Определяется глубина оттаивания верхового откоса плотины и дна водохранилища за интервал времени от  $t=0$  до  $t=1$  год по нескольким направлениям (№1, №2, №3 на рис. А), перпендикулярным поверхности контура, по формуле Л. С. Лейбензона

$\xi = \beta \sqrt{\Delta t}$ , м, в которой  $\Delta t = 365$  суток, а коэффициент  $\beta$  определяется по выражению:

$$\beta_{\text{отт}} = \frac{-\frac{\lambda_{\text{МГ}}(\vartheta_0 - \vartheta_{\text{нач}})}{\sqrt{\pi a_{\text{МГ}}}} + \sqrt{\frac{\lambda_{\text{МГ}}^2(\vartheta_0 - \vartheta_{\text{нач}})^2}{\pi a_{\text{МГ}}} + 2\gamma_{\text{Л}} n L \lambda_{\text{ТГ}}(\vartheta_{\text{в}} - \vartheta_0)}}{\gamma_{\text{Л}} n L},$$

где:  $\vartheta_0 = 3^\circ$  – температура поверхности дна водохранилища и верхового откоса плотины;  $\vartheta_{\text{нач}}$  – начальная температура грунта вблизи от его поверхности, в направлениях № 1, 2  $\vartheta_{\text{нач}} = -12^\circ$ , в направлении № 3  $\vartheta_{\text{нач}} = -5,68^\circ$ .

Согласно величинам  $\xi$  на рис. Б проводится изотерма  $\vartheta_0 = 0^\circ$  для момента времени  $t = 1$  год.



С помощью креста-трафарета с длиной лучей  $\Delta l_{\text{МГ}} = 2 \cdot \sqrt{\alpha_{\text{МГ}} \cdot 365} = 16,36$  м вычисляются значения температуры соответствующие  $t = 1$  год в нескольких точках рис. Б, по ним строятся изотермы в зоне мерзлого грунта (методом интерполяции). Размеры талой зоны так малы, что в нее не укладывается крест-трафарет с лучами  $\Delta l_{\text{ТГ}}$ , т.о. в талой зоне произойдет стационарное распределение температуры.

## 2. Температурное состояние плотины на момент времени $t = 3$ года.

Элементарный период времени  $\Delta t = 2$  года = 730 суток.

Вычисляется подвижка нулевой изотермы  $\Delta \xi$  по выбранным ранее направлением № 1, 2, 3 перпендикулярными: изотерме  $0^\circ$  при  $t = 1$  год, на рис. В проводится изотерма  $0^\circ$  соответствующая  $t = 3$  года.

С помощью креста-трафарета с лучами  $\Delta l_{\text{МГ}} = 2 \cdot \sqrt{\alpha_{\text{МГ}} \cdot 730} = 32,1$  м на рис. В строятся изотермы для момента времени  $t = 3$  года.

## 3. Температурное состояние плотины на момент времени $t = 5$ лет определяется тем же способом (рис. Г).

### Заключение

Расчетом прослежен температурный режим плотины в течение 5-летнего периода от момента начала эксплуатации. За это время произошло оттаивание верхового откоса плотины и основания в верхнем бьефе на величину более 4 м. Температура тела плотины повысилась от  $-12^\circ$  примерно до  $-5^\circ$ . Температурные изменения в теле и основании плотины будут продолжаться.

Рис. А. Температурный разрез по плотине и основанию в начальный момент времени  $t = 0$

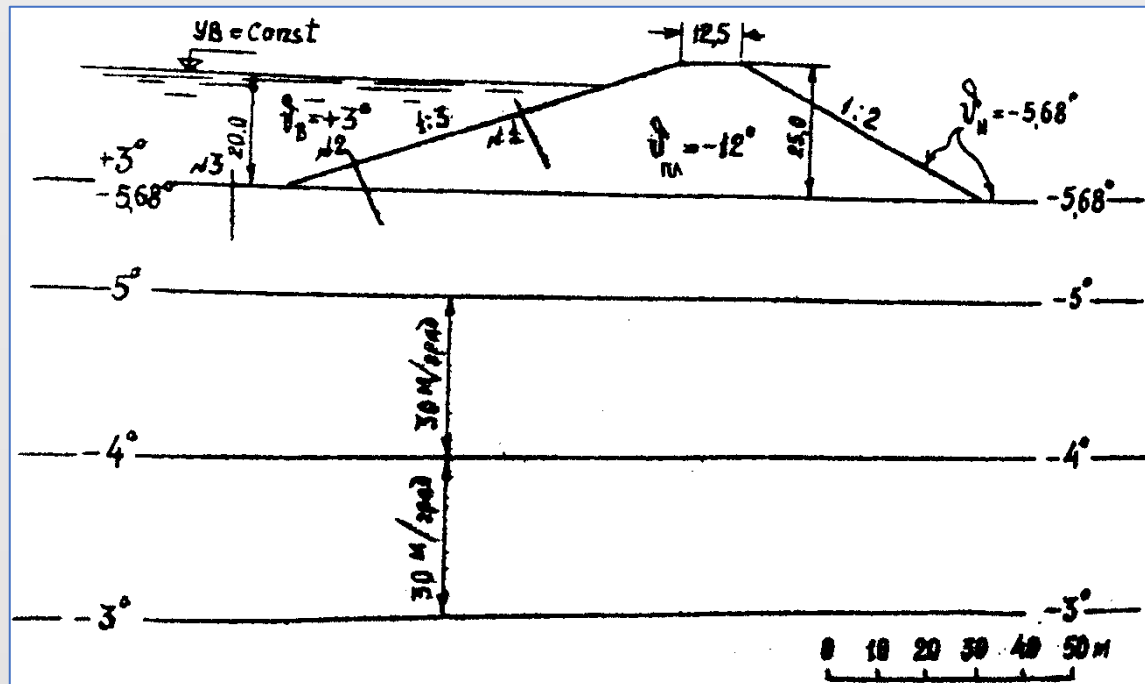


Рис. Б. Температурный разрез по плотине и основанию при  $t = 1$  год

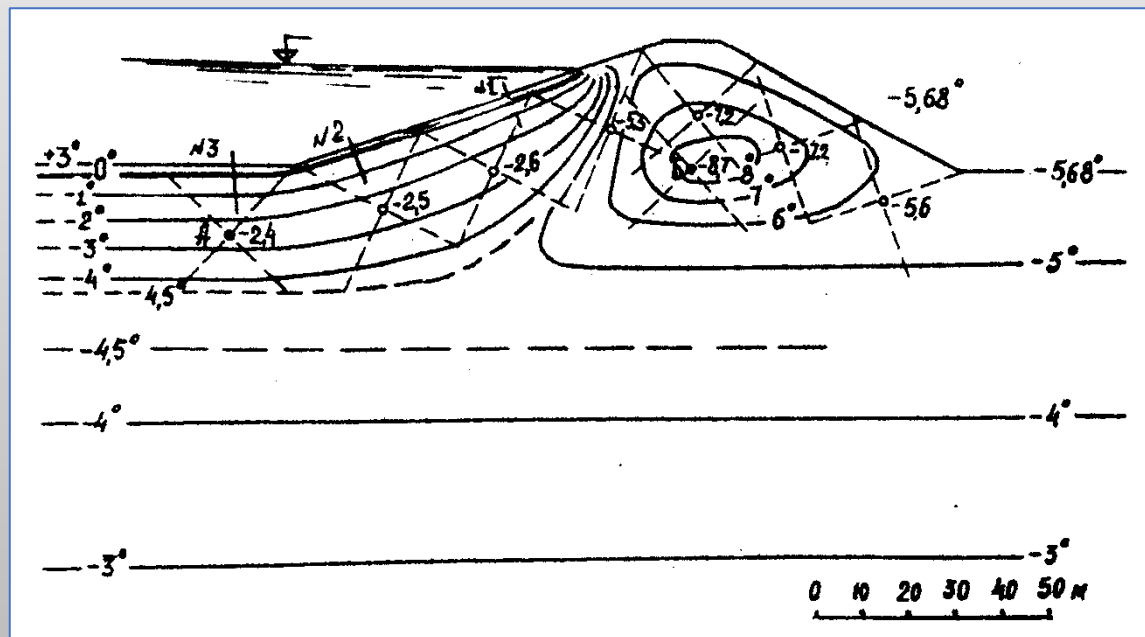




Рис. В. Температурный  
разрез по плотине и  
основанию при  $t = 3$  года

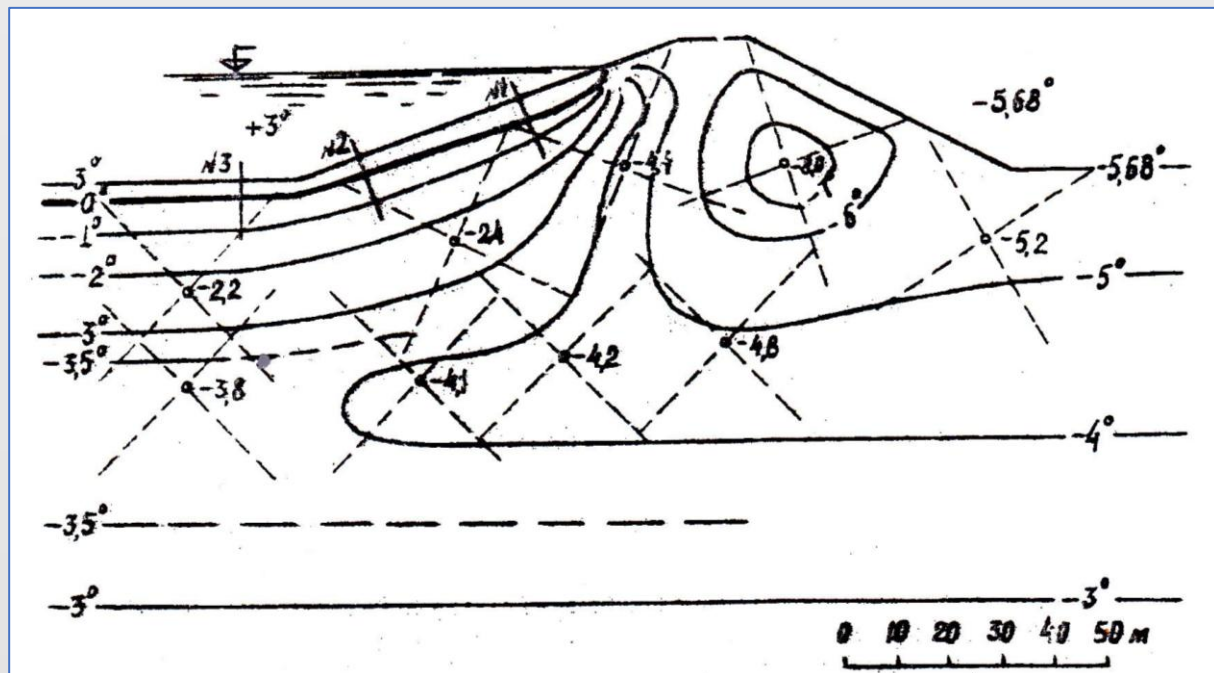
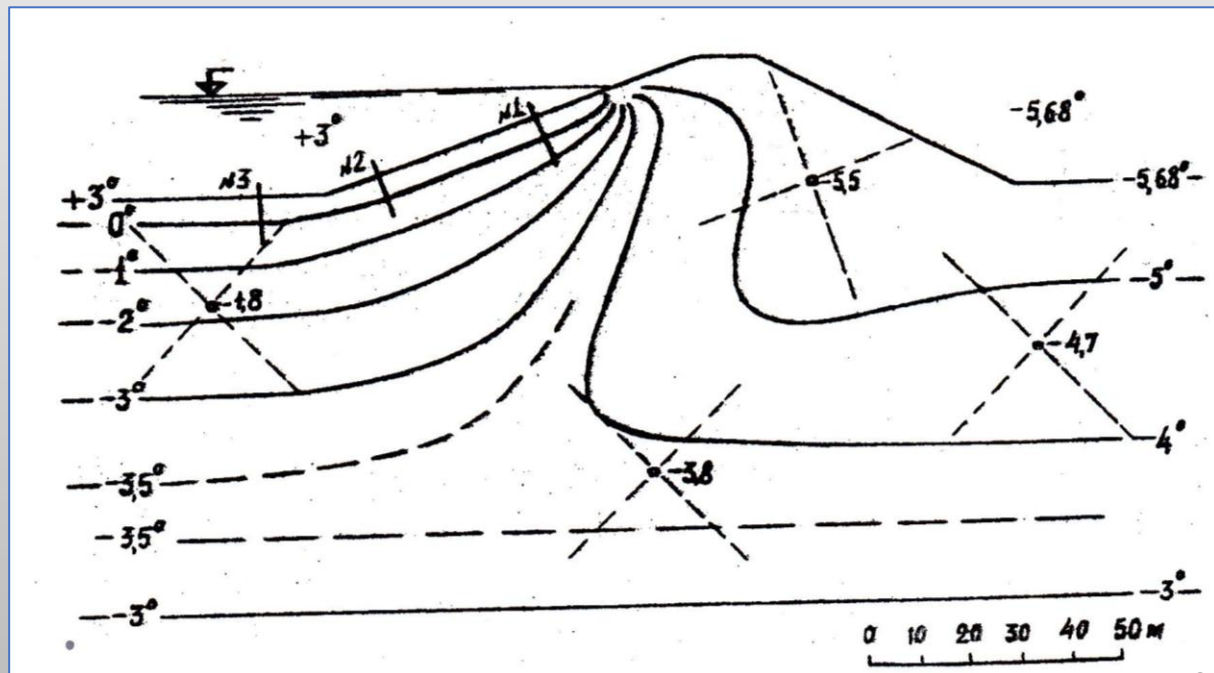


Рис. Г. Температурный  
разрез по плотине и  
основанию при  $t = 5$  лет



## Трехмерная модель температурного режима берегового примыкания плотины

Иллюстрируется простая (условная) ситуация примыкания грунтовой плотины к борту долины: грунты неоднородные; фильтрация воды отсутствует. Основными факторами формирования температурного режима являются: кондуктивная теплопередача в грунтах; фазовые превращения поровой влаги при оттаивании-замерзании, сопровождающиеся поглощением или выделением теплоты.

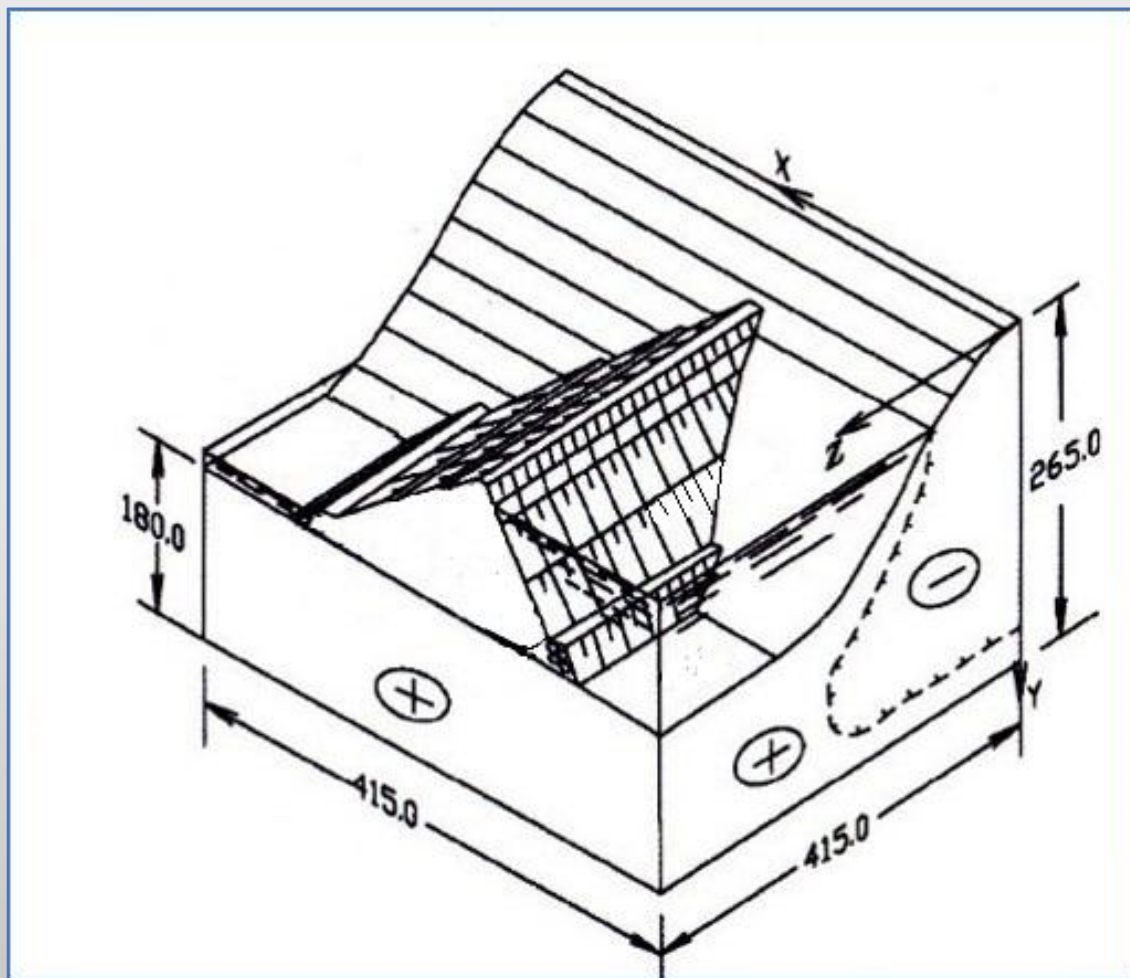


Схема расчетной области берегового примыкания плотины

## Уравнения нестационарного процесса теплопроводности

Процесс кондуктивной теплопередачи описывается уравнением теплопроводности Фурье:

$$(C\rho)_{\text{гр}} \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial X} \left( \lambda_{\text{гр}} \frac{\partial \vartheta}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left( \lambda_{\text{гр}} \frac{\partial \vartheta}{\partial Y} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left( \lambda_{\text{гр}} \frac{\partial \vartheta}{\partial Z} \right), \quad (1)$$

где  $(C\rho)_{\text{гр}}$  - объемная теплоемкость грунта:

$$(C\rho)_{\text{гр}} = (C\rho)_{\text{т}} - [1 - (C\rho)_{\text{л}}] \cdot R \cdot n \cdot b;$$

$\vartheta$  - температура грунта;

$t$  - время;

$X, Y, Z$  - декартовы координаты в пространстве расчетной области;

$\lambda_{\text{гр}}$  - коэффициент теплопроводности грунта:

$$\lambda_{\text{гр}} = \lambda_{\text{т}} + R(\lambda_{\text{м}} - \lambda_{\text{т}}).$$

Для грунтов, находящихся при температуре ниже температуры замерзания свободной воды, уравнение теплопроводности записывается в виде:

$$(C\rho)_{\text{гр}} \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial X} \left( \lambda_{\text{гр}} \frac{\partial \vartheta}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left( \lambda_{\text{гр}} \frac{\partial \vartheta}{\partial Y} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left( \lambda_{\text{гр}} \frac{\partial \vartheta}{\partial Z} \right) + \rho_{\text{л}} n L \frac{\partial R}{\partial t} b, \quad (2)$$

где  $\rho_{\text{л}}$  - плотность льда, кг/м<sup>3</sup>;

$n$  - пористость грунта;

$L$  - удельная скрытая теплота при замерзании воды или плавлении льда;

$$L = 336 \text{ кДЖ/кг};$$

$b$  - степень влажности (льдистости) грунта;

$R$  - относительная льдистость грунта, представляющая собой отношение массы льда в некотором объеме грунта к массе воды в том же объеме.  $R = 1$  - если вся вода замерзла, и  $R = 0$  - если весь лед растаял.

## Пояснения к уравнению (2)

Последний член — в уравнении (2) описывает выделение или поглощение тепла при фазовых превращениях поровой влаги в грунте, а входящая в него льдистость является функцией температуры:

при ;  
при ;  
при ,

то есть, если вся вода замерзла, то , а если весь лед растаял, то [Февралев, 1981].

## Краевые условия задачи теплопроводности

Для расчета полей температуры в расчетной области должны быть назначены начальное температурное состояние (на момент начала расчета) и граничные условия: для подводных поверхностей условия I рода; для поверхностей соприкасающихся с воздухом, условия I или III рода; для плоскостей, ограничивающих расчетную область, условия одномерности теплового потока — — —

## Численная модель температурного режима

Расчет температурного режима выполняется на ЭВМ. Применяется метод конечных разностей. В расчетной области строится пространственная разностная сетка. Для аппроксимации дифференциальных уравнений (1) и (2) численными аналогами используется неявная разностная схема, которая является абсолютно устойчивой. Поэтому значение расчетного временного интервала выбирается только из требуемой точности расчета. На этот интервал отстоят друг от друга временные слои «K» и «K+1». Система численных уравнений решается приближенно с использованием итерационного метода Зейделя.

По результатам расчетов строят температурные поля на заданные моменты времени в заданных сечениях расчетной области.

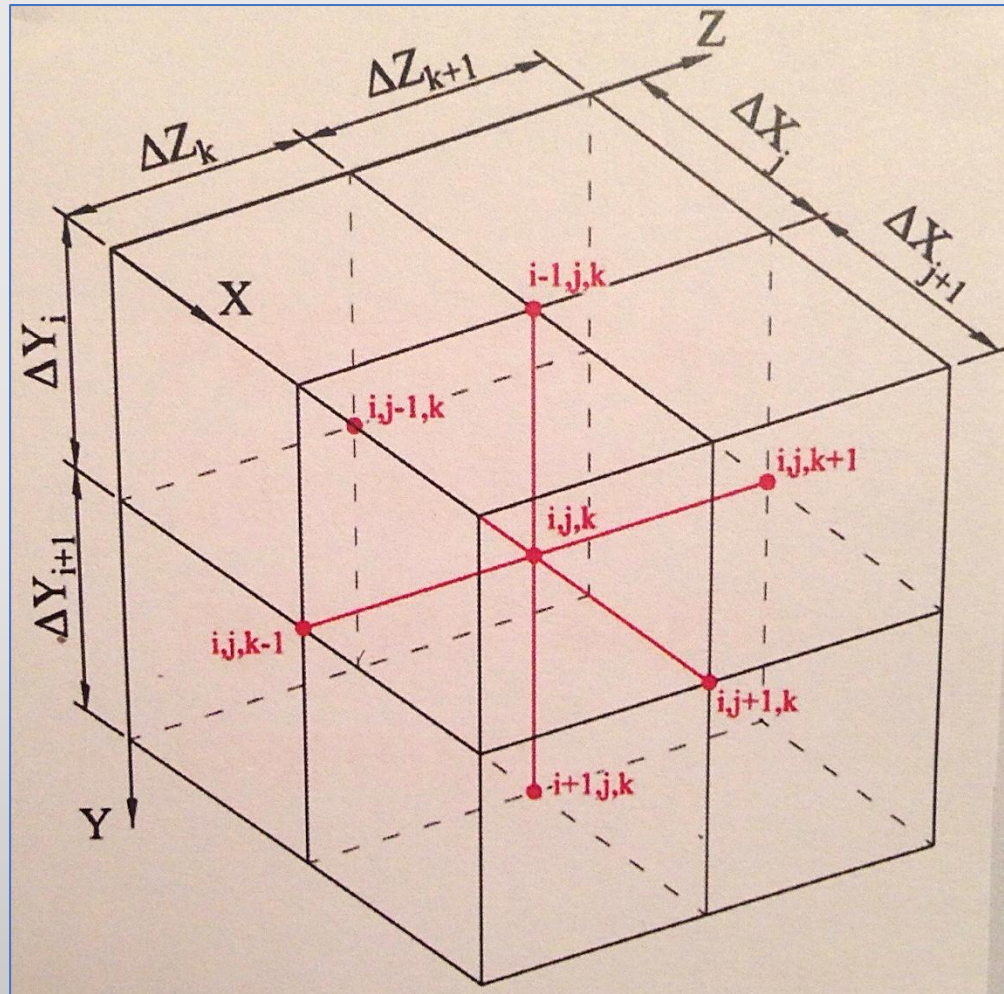
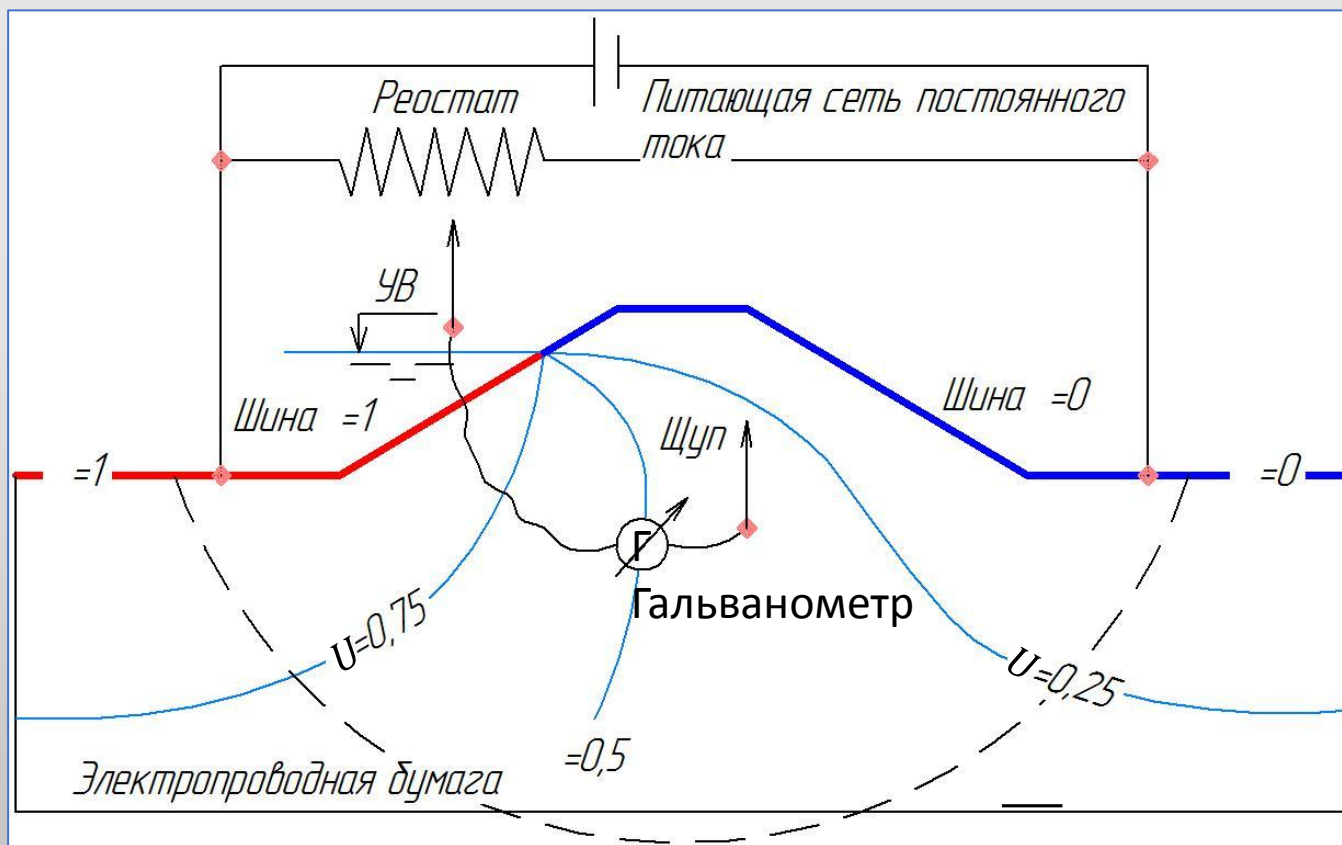


Схема семиточечного шаблона для разностной аппроксимации дифференциальных уравнений

# Построение стационарного температурного поля в плотине методом электротепловой аналогии (ЭТА)

Электротепловая аналогия – это аналогия между стационарным полем электрического тока в проводящей среде и стационарным полем относительной температуры. Аналогичные величины – электрический потенциал вольт, и относительная температура описываются обе уравнением Лапласа. Геометрические формы токопроводящей среды и температурной области должны быть одинаковы.



Модель плотины из электропроводной бумаги, подключенная к электроинтегратору

Результат моделирования: изотермы относительной температуры в плотине и основании.

# Расчеты замораживающих систем в грунтовых плотинах

## Приближенный метод расчета воздушной замораживающей системы [Руководство, 1976]

### Рекомендуемые параметры замораживающей системы:

- длина колонок не более  $30 \div 35$  м;
- диаметр внешней трубы колонки  $150 \div 200$  мм;
- количество колонок в системе  $40 \div 60$  штук;
- скорость движения воздуха не менее  $10$  м/с;
- систему устраивают после возведения плотины; она должна быть запроектирована так, чтобы в первую зиму сомкнулись диаметры ледогрунтовых цилиндров и образовалась мерзлотная завеса.

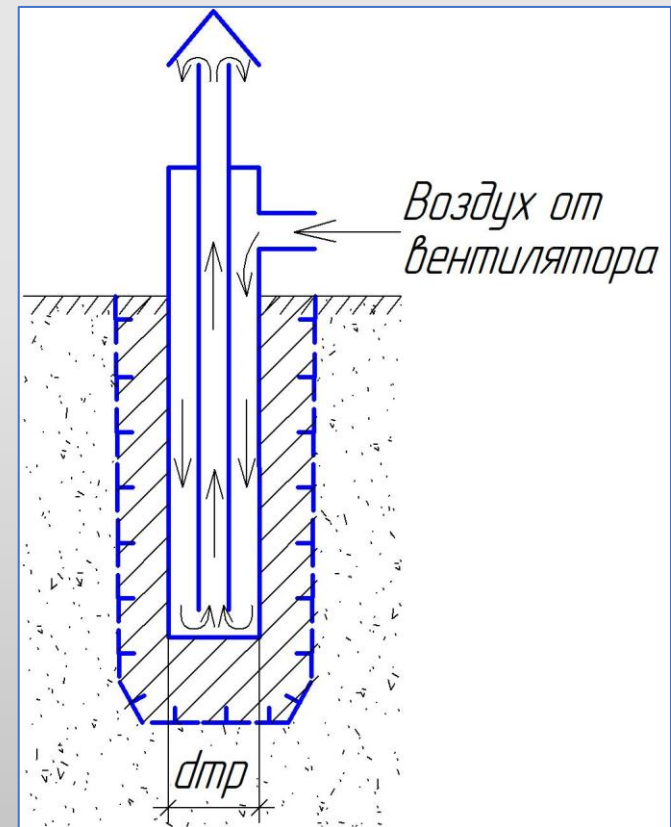
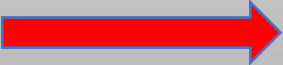


Схема замораживающей колонки

Диаметр ледогрунтового цилиндра, образующегося вокруг замораживающей колонки в нефилтующем грунте, определяют по формуле:

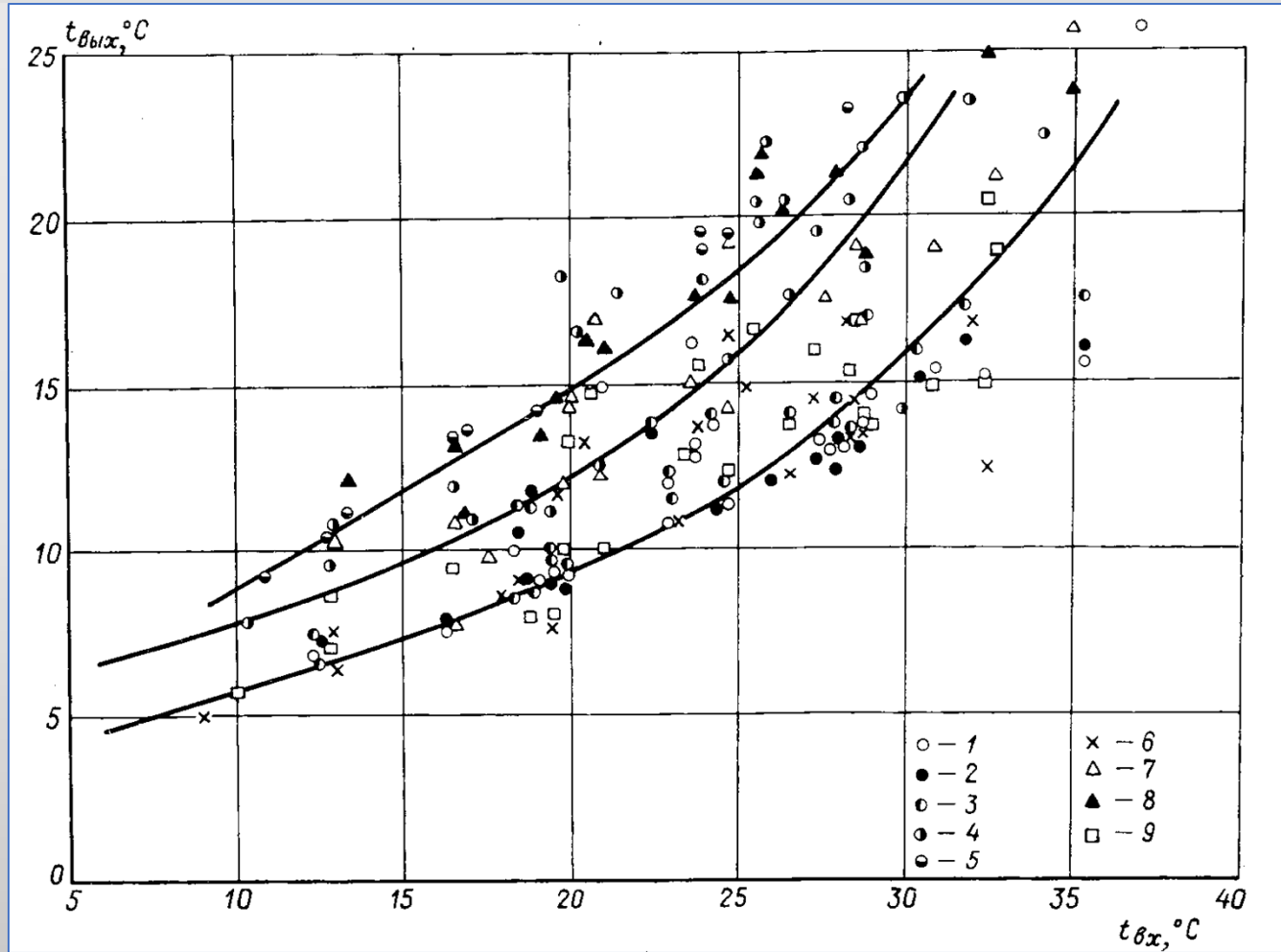
$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot Q \cdot t}{\pi \cdot (\gamma_{\text{л}} \cdot \rho_{\text{л}} \cdot \lambda_{\text{л}} \cdot \Delta T_{\text{г}} + \gamma_{\text{с}} \cdot w \cdot \lambda_{\text{г}} \cdot \Delta T_{\text{г}} + \gamma_{\text{в}} \cdot \rho_{\text{в}} \cdot \lambda_{\text{в}} \cdot \Delta T_{\text{в}})}} \quad (1)$$

где  $D$  — диаметр замораживающей колонки, м; обычно 0,15 - 0,20 м;  
 $\gamma_{\text{л}}$  — объемный вес (плотность) талого грунта, т/м<sup>3</sup>;  
 $\rho_{\text{л}}$  — теплоемкость талого грунта, ккал/(кг · град);  
 $\lambda_{\text{л}}$  — перепад температуры в грунте, охлаждаемом от начальной температуры до  $T_{\text{г}}$ ;  
 $\gamma_{\text{с}}$  — объемный вес скелета грунта, т/м<sup>3</sup>;  
 $w$  — весовая влажность грунта, доли единицы;  
 $\lambda_{\text{г}}$  — скрытое тепло таяния-замерзания льда, ккал/кг;  
 $Q$  — количество теплоты, отбираемой одним метром длины колонки за время  $t$ ;  
 $V$  — средний расход воздуха на 1 м длины колонки, м<sup>3</sup>/с. Задается при проектировании колонок не менее  $V_{\text{н}}$ ;  
 $\gamma_{\text{в}}$  — удельный вес воздуха, т/м<sup>3</sup>;  
 $\rho_{\text{в}}$  — теплоемкость воздуха, ккал/(кг · град), при  $T_{\text{в}}$ ;  
 $\lambda_{\text{в}}$  — перепад температуры в воздухе, охлаждаемом от начальной температуры до  $T_{\text{в}}$ .





$\Delta\vartheta$  – перепад температур в колонке (т.е. разность температур входящего и выходящего воздуха), °С. По натурным данным на плотине Иреляхского гидроузла этот перепад составлял в среднем  $\Delta\vartheta = 10^\circ\text{C}$ ;



Экспериментальные зависимости для колонок воздушной замораживающей системы на плотине Иреляхского гидроузла между температурами наружного воздуха, подаваемого в колонку  $t_{\text{вх}}$ , и выходящего из нее  $t_{\text{вых}}$ : 1 – 9 – данные для девяти разных колонок [Бучко, 1978]

$t$  – время работы вентилятора, часы. Система включается при температуре воздуха минус  $(15 - 20)^\circ\text{C}$ , тогда она эффективна. Работает около 4-х месяцев (декабрь, январь, февраль, март),  $t = 2000$  часов;  
 $Q_2$  – боковой приток тепла к колонке от незамороженных грунтов:

$$Q_2 = \frac{\lambda_T \cdot A \cdot (t_{\text{нач}} - t_{\text{г}})}{l} \cdot t$$

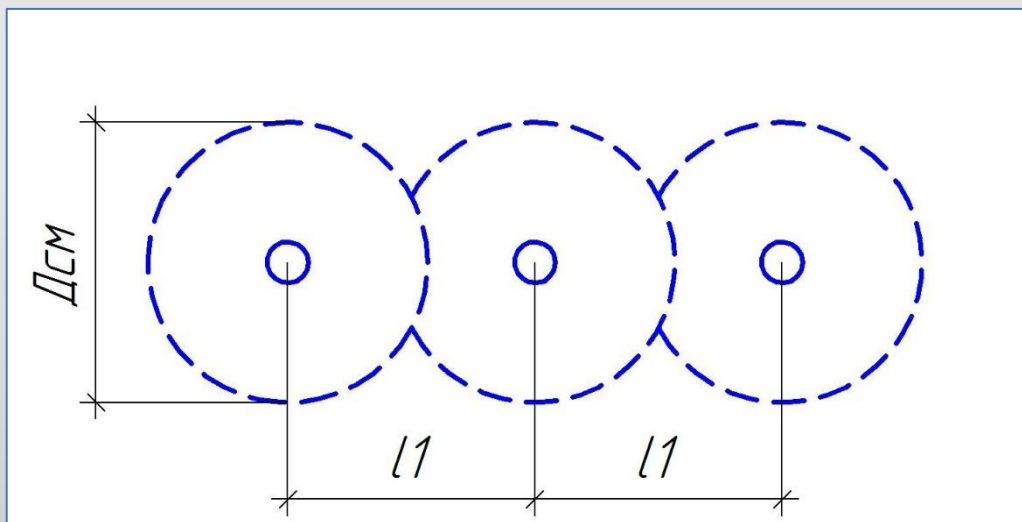
- $\lambda_T$  – коэффициент теплопроводности грунта, ккал/ (м·час·град);
- $a_T$  – коэффициент температуропроводности талого грунта, м<sup>2</sup>/час;
- $A$  – площадь притока тепла на 1 пог. м колонки, м<sup>2</sup>;
- $l$  – приведенная толщина стенки колонки для расчета бокового притока тепла, м;
- $t_{\text{нач}}$  - начальная температура грунта, град;
- $t$  – время работы колонки (вентилятора), часы.

## Влияние совместной работы колонок учитывают по зависимости:

( )

где  $d$  - диаметр, при котором происходит фактическое смыкание ледогрунтовых цилиндров;

$l$  - расстояние между колонками, м.



Горизонтальный разрез  
мерзлотной завесы

На практике по формуле ( ) можно посчитать диаметры ледогрунтовых цилиндров  $d$ , образующихся в первую зиму, затем по зависимости ( ) назначить шаг между колонками [Руководство, 1976].

# Расчетные, натурные и экспериментальные данные о работе воздушных замораживающих колонок

Данные расчета воздушной замораживающей системы плотины Иреляхского гидроузла, подтвержденные натурными наблюдениями:

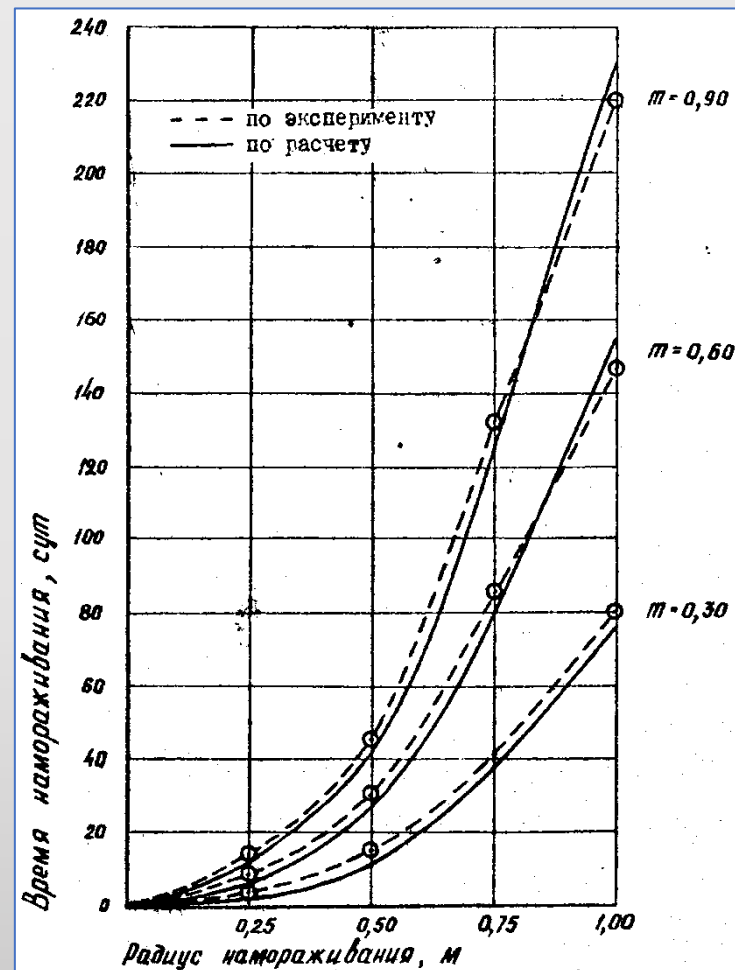
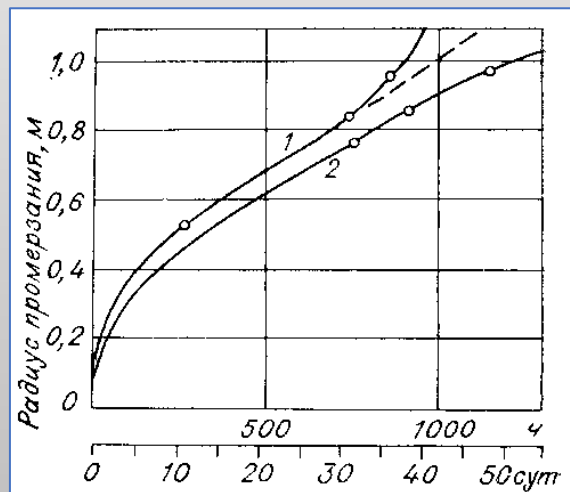
$t = 1824$  часа – время работы системы в первую зиму;

$\Delta\theta = 10^\circ\text{C}$  – разность температур входящего и выходящего воздуха в колонке;

$d = 2,0$  м – диаметр льдогрунтовых цилиндров, замороженных в первую зиму;

$s = 1,5$  м – шаг между колонками [Руководство, 1976].

Изменение радиуса промерзания грунтов во времени для парных и одиночных колонок в плотине Сытыканского гидроузла: 1 – парные колонки диаметром 219 мм; 2 – одиночная колонка диаметром 159 мм [Макаров, 1985]

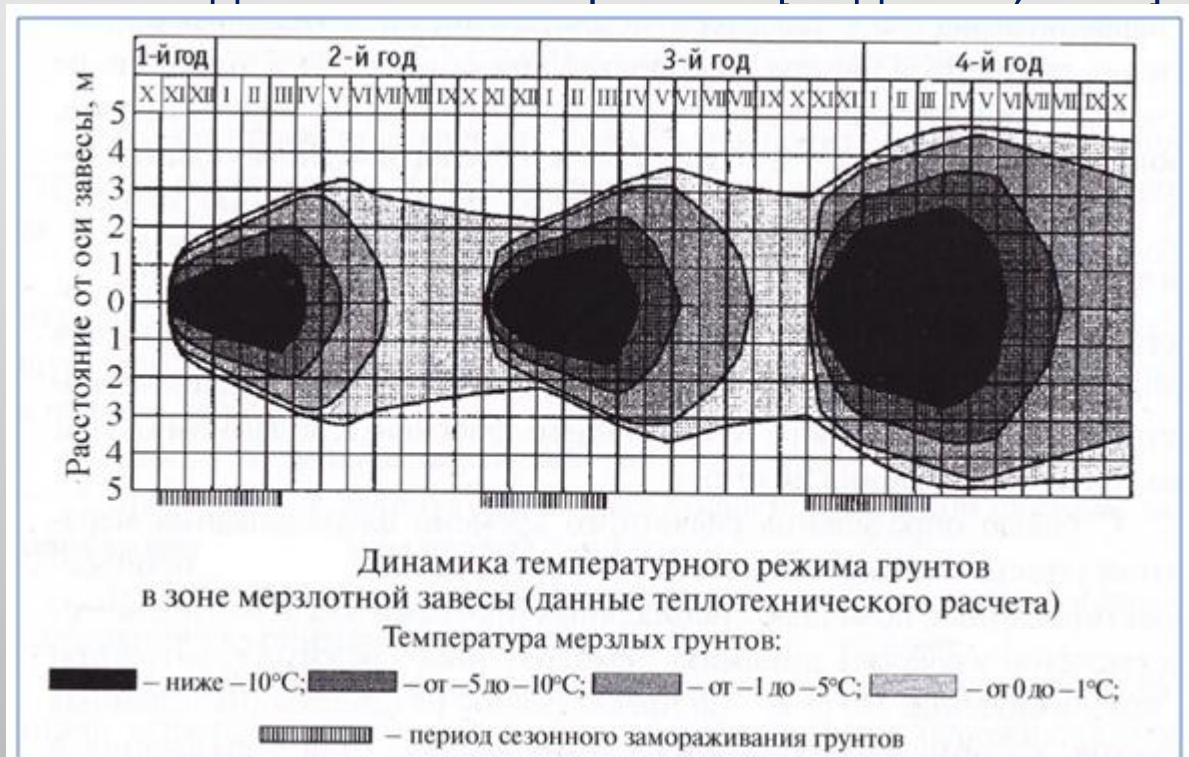


Зависимость между временем и радиусом намораживания льдогрунтовых цилиндров в песчаном талом грунте разной плотности с температурой  $6,5^\circ\text{C}$ :  $m$  – коэффициент пористости грунта [Немцев, 1983]

## Результаты расчета мерзлотной завесы в фильтрующем грунте

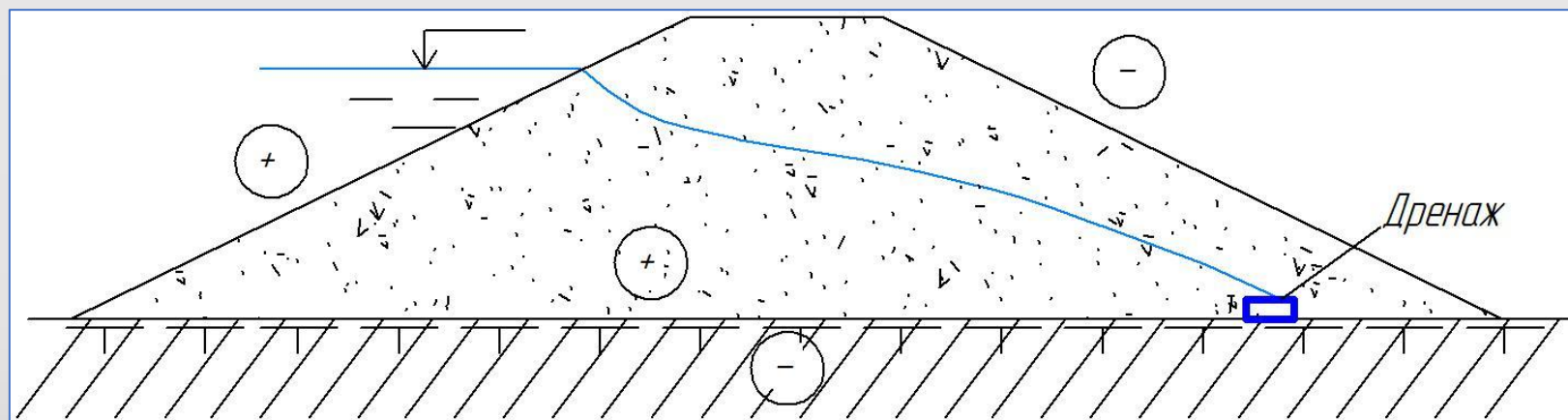
В процессе создания завесы фильтрационный поток, омывая льдогрунтовые цилиндры вокруг замораживающих колонок, передает им часть своего тепла, замедляя процесс намораживания.

Для аварийного фильтрующего участка эксплуатируемой плотины мерзлого типа Сытыканского гидроузла проводились расчеты замораживающей системы с колонками парожидкостного типа при следующих параметрах: коэффициент фильтрации в зоне замораживания 0,5 – 1,0 м/сут; шаг колонок 1,5 м. Получалось, что надежная мерзлотная завеса может быть создана в течении трех зим [Федосеев, 2009].



# Понятие о расчете температурного режима фильтрующих талых земляных плотин

Рассматривается однородная земляная плотина, возведенная из грунта с положительной температурой на мерзлом основании. Плотина будет фильтрующей.



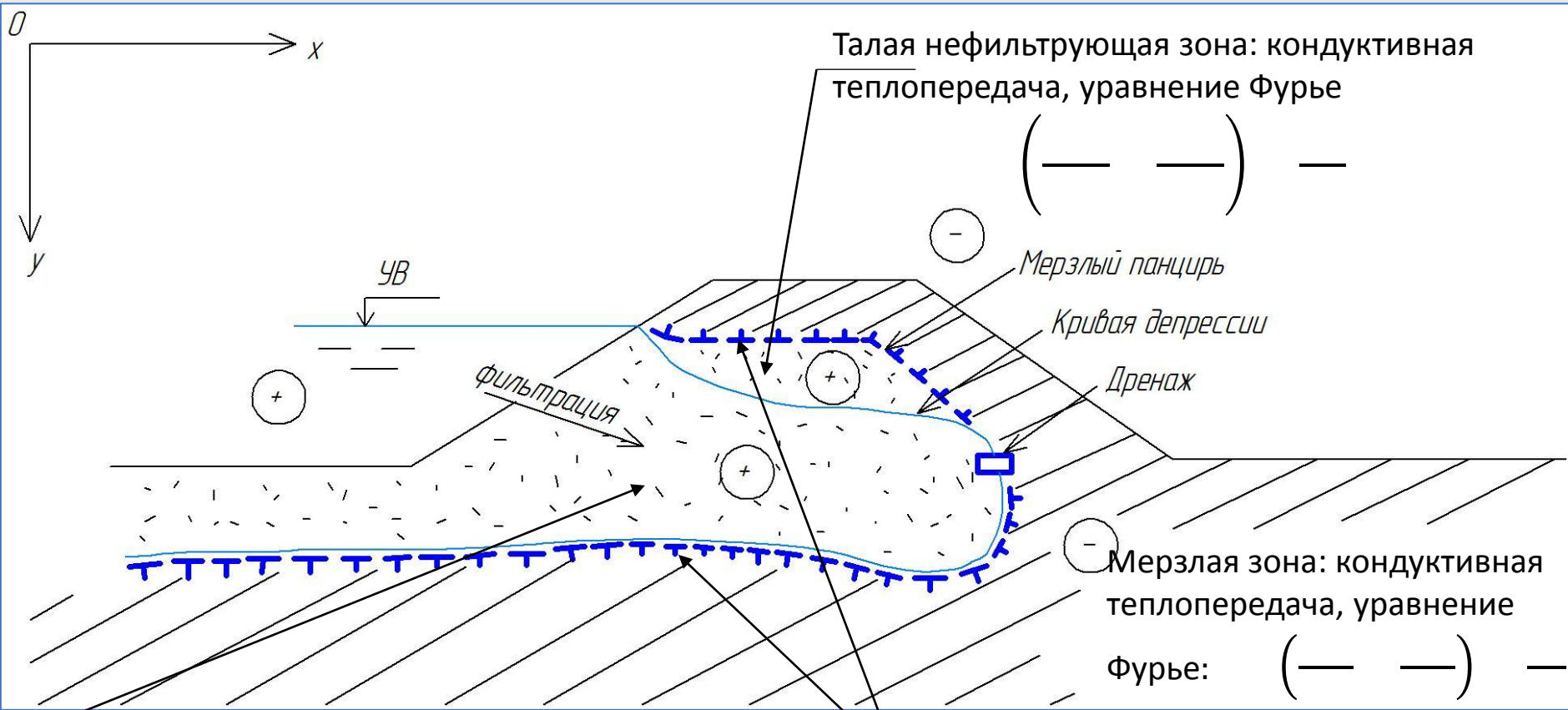
Развитие среднегодовых температурных процессов в теле и основании плотины будет происходить следующим образом.

а). Часть тела плотины от гребня и низового откоса, расположенная выше кривой депрессии, будет промерзать под воздействием отрицательной среднегодовой температур воздуха.

б). Основание водохранилища в удалении от плотины будет оттаивать под воздействием тепла воды водохранилища.

в). Основание плотины будет оттаивать под воздействием тепла, переносимого фильтрационным потоком, следующим в дренаж.

Математически процессы нестационарной теплопередачи в однородном грунте тела и основания фильтрующей земляной плотины описываются нижеприведенными уравнениями.



Фильтрующая талая зона: теплопередача вынужденной конвекцией+кондукцией, уравнение Фурье-Кирхгофа

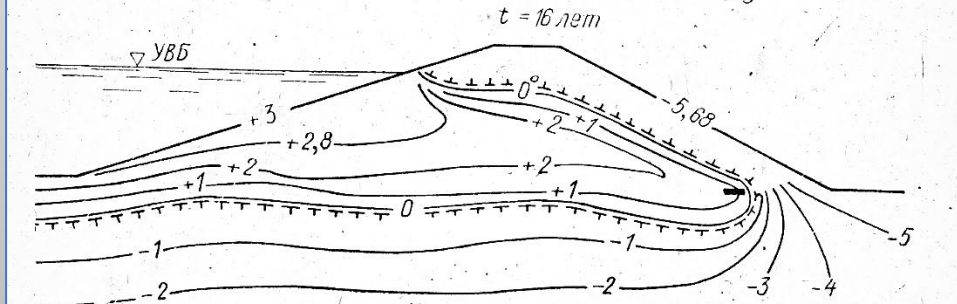
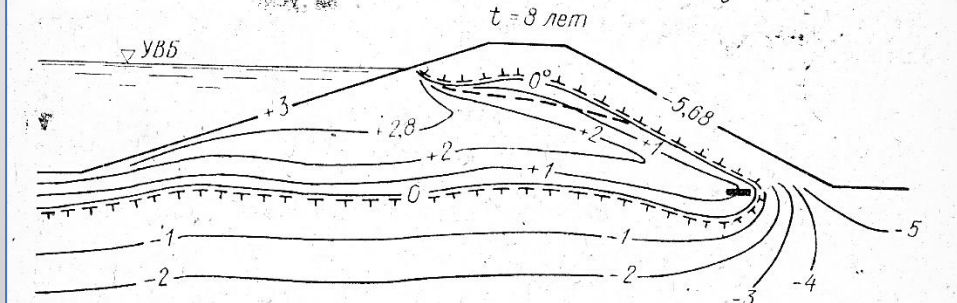
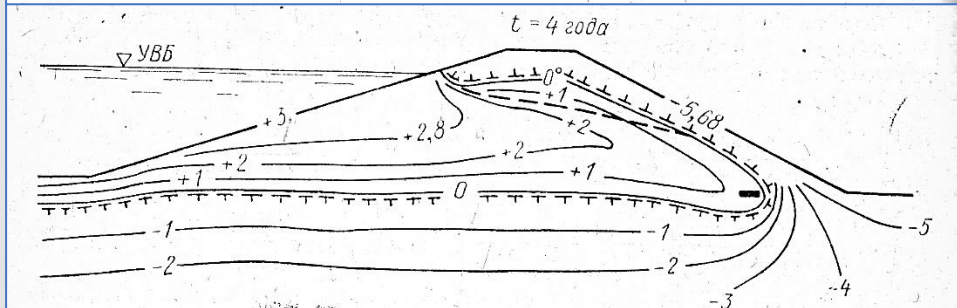
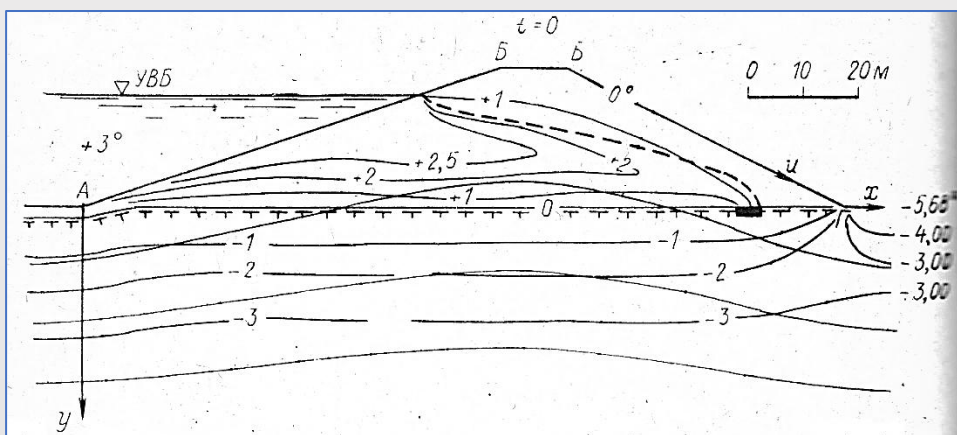
$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial T}{\partial x} \left[ \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) \right]$$

где  $\alpha$  — коэффициент фильтрации;  $H$  — напор;  $c$  — объемная теплоемкость грунта и воды;  $k$  — коэффициент конвективной теплопроводности.

Расчеты ведут на ЭВМ.

Фильтрационная задача решается в одной программе вместе с тепловой. Для этого вышеприведенные уравнения представляют в конечных разностях. Система уравнений решается для всей расчетной области в целом методом простой интеграции.

Расчетным путем на примере прослежено развитие среднегодовых температурных процессов в теле и основании фильтрующей земляной плотины [Февралев, 1979].



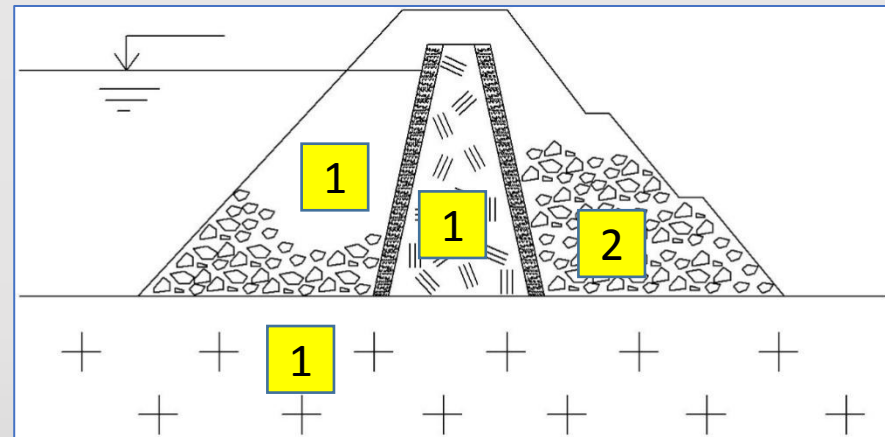
Температурные разрезы фильтрующей плотины



# Понятие о расчете температурного режима каменно-земляных плотин

Температурный режим каменно-земляной плотины формируется под влиянием процессов тепло- и массообмена, протекающих в верховой призме, противодиффузионном элементе, переходных зонах, низовой призме и основании.

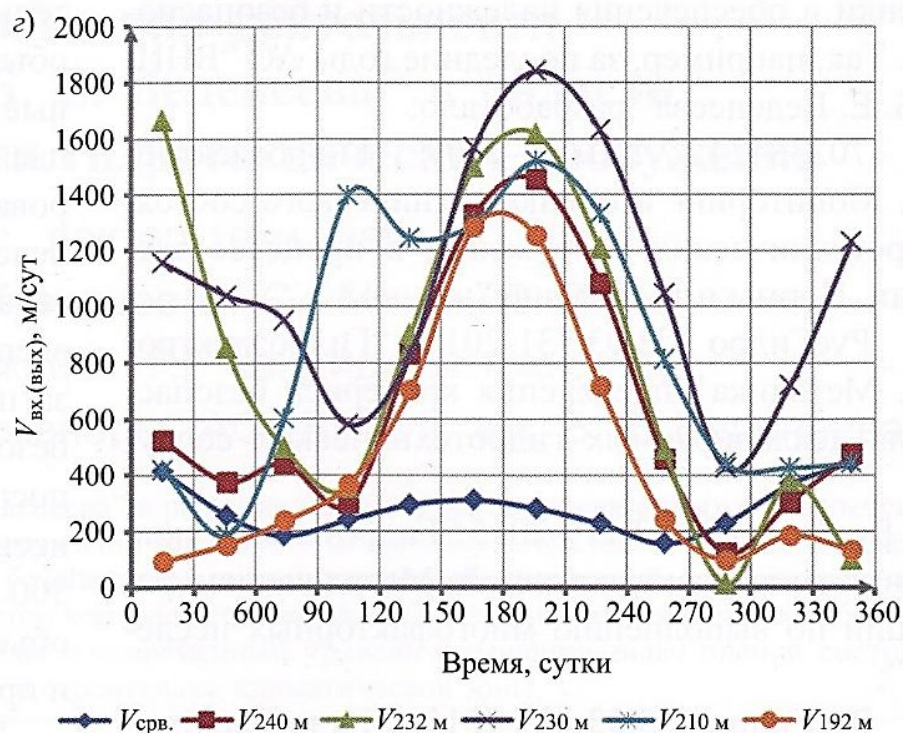
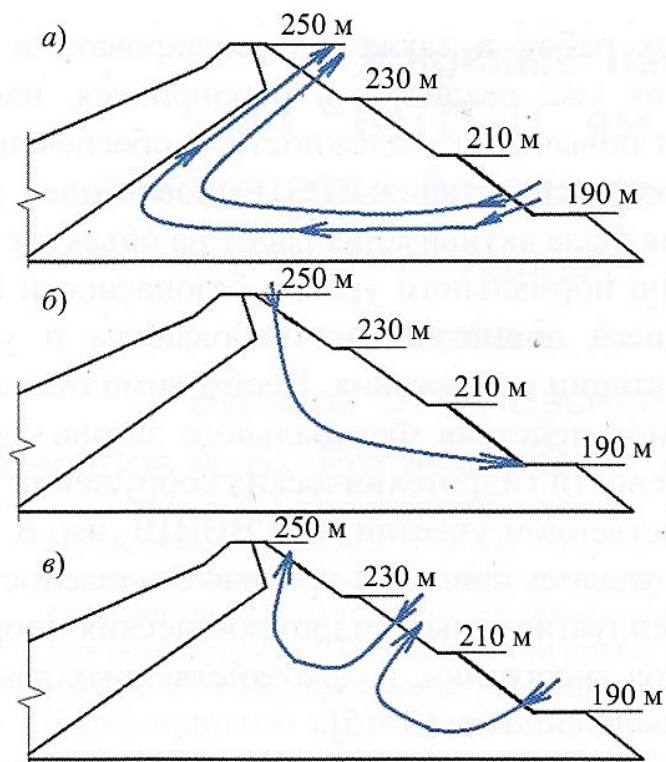
Элементы каменно-земляной плотины, различающиеся преобладающими факторами формирования температурного режима



**1** Преобладающими факторами в формировании температурного режима верховой призмы, противодиффузионного элемента, переходных зон и основания являются кондукция, конвективный перенос тепла при фильтрации воды и фазовые превращения воды.

**2** Температурный режим низовой призмы есть следствие более сложных процессов: теплообмена между камнем и влажным воздухом в порах наброски, конвективного переноса тепла при движении (вынужденном и свободном) этого воздуха, фазовых превращений влаги, находящейся в воздухе.

В порах каменной наброски низовой призмы циркулируют конвективные потоки воздуха, направленные в летний период сверху вниз, а зимой – снизу вверх. Эти потоки являются причиной сезонных изменений температурного режима низовой призмы. Скорость потоков и интенсивность изменения температур с течением времени снижаются в связи с заполнением пор наброски льдом [Панов, 2016].



Восходящая (а), нисходящая (б) и смешанная (в) схемы движения воздуха и графики скорости этого движения на различных отметках низового откоса плотины (г) Вилюйского гидроузла

Математическая модель тепло- массопереноса в элементах плотины строится при следующих допущениях:

- каменная наброска недеформируема во времени, теплофизические характеристики составляющих наброску фаз – камня, льда, воздуха, воды и пара – не зависят от температуры;

- движение воды в порах наброски низовой призмы отсутствует;

- отсутствует теплообмен между составляющими твердой фазы наброски – камнем и льдом;

- поры материала, через который фильтруется вода, полностью ею заполнены;

- скорости движения воздуха и водяного пара совпадают и равны  $v$ , также совпадают между собой температуры камня и льда и равны  $\vartheta$ , воздух и водяной пар полностью заполняют поровое пространство наброски, не занятое льдом;

- плотность воздуха незначительно изменяется во времени и поэтому принимается постоянной;

- фильтрация воды рассматривается установившейся и ламинарной.

Полная система уравнений тепло- и массопереноса для многокомпонентной системы, каковой является каменная наброска, должна содержать уравнения неразрывности, движения, энергии и зависимости для различных коэффициентов. Ниже приведены основные уравнения системы.

1 Уравнения теплопереноса для основания, противофльтрационного элемента и переходных зон.

1. Уравнение теплопереноса в скелете грунта:

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T_g}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_{\text{в}} \frac{\partial T_{\text{в}}}{\partial x} \right) + \rho_{\text{л}} \frac{\partial T_{\text{л}}}{\partial t} + \rho_{\text{в}} \frac{\partial T_{\text{в}}}{\partial t} + \rho_{\text{г}} \frac{\partial T_{\text{г}}}{\partial t} \quad (1)$$

где индекс «г» означает принадлежность к грунту противофльтрационного элемента, переходных зон и основания плотины;

- объемная теплоемкость грунта;
- температура грунта;
- время;
- декартовы координаты;
- коэффициент теплопроводности грунта;
- объемный коэффициент теплообмена между скелетом грунта и водой в порах;
- температура воды;
- плотность льда;
- пористость грунта;
- удельная теплота фазовых превращений воды;
- насыщенность пор грунта льдом.

2. Уравнение переноса теплоты фильтрующейся водой:

$$U \frac{\partial \theta}{\partial x} + V \frac{\partial \theta}{\partial y} = - \frac{\alpha_{\vartheta_r} (\theta - \vartheta)}{C_{ж} \rho_{ж}}, \quad (2)$$

где  $U, V$  – составляющие вектора скорости фильтрации воды;

$\theta$  – температура воды;

$x, y$  – декартовы координаты;

$\alpha_{\vartheta_r}$  – объемный коэффициент теплообмена между скелетом грунта и водой в порах;

$\vartheta$  – температура грунта;

$C_{ж} \rho_{ж}$  – объемная теплоемкость жидкости (воды).

Составляющие вектора скорости фильтрации воды в верховой призме, противодиффузионном элементе и основании плотины находятся по значениям пьезометрического напора  $H$ , который определяется уравнением неразрывности Лапласа:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K \frac{\partial H}{\partial y} \right) = 0. \quad (3)$$

Движение воды в порах грунта принимается ламинарным, поэтому проекция вектора скорости фильтрации определяются исходя из формулы Дарси:

$$U = -K \frac{\partial H}{\partial x}, \quad V = -K \frac{\partial H}{\partial y}, \quad (4)$$

где  $K$  – коэффициент фильтрации грунта;

$H$  – пьезометрический напор.

2 Здесь представлена упрощенная методика оценки температурного режима каменно-земляной плотины без учета влажности воздуха. В этих условиях уравнения тепло- и массопереноса в каменной наброске низовой призмы плотины принимают следующий вид.

1. Уравнение теплопереноса в скелете:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial T}{\partial x} \left[ -\left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right] = \frac{\partial T}{\partial x} \quad (5)$$

где  $T$  – температура камня;

$t$  – время;

$\alpha$  – пористость наброски;

$c$  – объемная теплоемкость камня;

$x, y$  – декартовы координаты;

$\lambda$  – коэффициент эффективной теплопроводности наброски;

$\beta$  – объемный коэффициент теплообмена между камнем и воздухом в наброске;

$T_a$  – температура воздуха;

## 2. Уравнение конвективного теплопереноса:

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} + \rho c_p (u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z}) = \rho c_p \frac{dT}{dt} + \rho c_p (u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z}) + \rho c_p \frac{dT}{dt} + \rho c_p (u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z}) \quad (6)$$

где производная — вследствие малой теплоемкости воздуха опущена;

- составляющие вектора скорости фильтрации воздуха;
- температура порового воздуха;
- объемный коэффициент теплообмена между камнем и воздухом в наброске;
- температура камня;
- объемная теплоемкость воздуха.

### 3. Уравнение неразрывности:

$$-\left( \quad \right) - \left( \quad \right) \quad ( \quad ) \quad (7)$$

где  $\quad$ ,  $A$  – эмпирический коэффициент;

– избыточное над атмосферным давление воздуха в порах наброски;

– коэффициент объемного расширения воздуха;

- плотность атмосферного воздуха в пределах высоты плотины;

– разность температур воздуха в порах наброски и воздуха, окружающего плотину.

Решение системы уравнений (1) – (7) осуществляется методом конечных разностей. Расчеты выполняются на ЭВМ с использованием итерационных схем по единой для всех элементов плотины программе [Богословский, 1986].

Более совершенная многофакторная математическая модель температурно-влажностного режима каменно-земляной плотины с учетом таяния – замерзания влаги в ее элементах (призмах из каменной наброски, противофильтрационном элементе, основании) приведена в работе [Горохов, 2005].



# Расчеты температурного режима грунтовых гидросооружений на ЭВМ

Большинство прогнозных задач о температурном режиме гидротехнических сооружений криолитозоны в постановке, отвечающей реальным ситуациям, можно решить лишь с помощью ЭВМ.

В ННГАСУ имеется опыт расчетов на ЭВМ нестационарного температурного режима грунтовых плотин и других гидросооружений методом конечных разностей в двумерных условиях [Богословский, 1986; Битюрин, 1993, 1994; Горохов 2011; Долгих, 2007; Соболев, 1989; Февралев, 1979, 1981, 1993], а также и в трехмерных условиях [Горохов, 2005, 2012].

Наиболее универсальной разработанной в ННГАСУ компьютерной программой для температурных расчетов является программный комплекс Nord – 3D [Горохов, 2000], имеющий свидетельство о государственной регистрации [Свидетельство №2012617703, 2012].

Комплекс Nord – 3D позволяет моделировать температурно-фильтрационный режим каменно-земляных, каменнонабросных, земляных плотин и других гидросооружений из грунтовых материалов мерзлого и талого типов в трехмерных (соответственно и двумерных) условиях.

## Программный комплекс Nord – 3D

Функционирует под управлением операционной системы Windows 2007. Состоит из двух независимых программных блоков: NordCalc и NordView.

### Блок NordCalc

Предназначен для:

- подготовки и автоматизированного формирования исходных данных о геометрической форме исследуемого объекта, определения физических (и других) свойств грунтовых материалов, слагающих объект исследования, и задания внешних возмущающих факторов, характерных для природноклиматических условий района строительства объекта;
- моделирования температурного режима исследуемого объекта на основе совместного решения системы разностных аналогов сеточных уравнений тепло- и массопереноса совместно с начальными и граничными условиями.

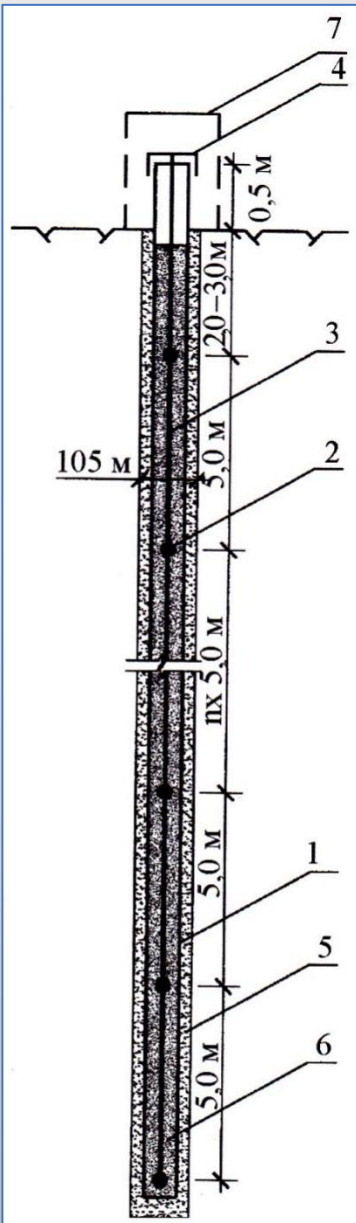
### Блок NordView

Предназначен для графической обработки получаемых программой NordCalc результатов моделирования температурного режима исследуемого объекта, которая заключается в автоматизированном построении температурных и векторных (для воды и для порового воздуха) полей в запрашиваемых исследователем сечениях расчетной области.

Пользоваться услугами блока NordView можно независимо от блока NordCalc:

- или параллельно (в режиме “online”) с работой вычислителя NordCalc;
- или после завершения сеанса работы с ПК Nord – 3D.

# Натурные наблюдения температурного режима



Расчеты дают возможность приблизительно оценить температурный режим сооружений на перспективу. Для представления о фактическом течении процесса ведут натурные наблюдения.

Температурные наблюдения выполняют с помощью измерительных приборов – термисторов (полупроводниковых датчиков), помещенных в наблюдательные температурные скважины.

Измерения температуры проводят периодически. По ним строят температурные поля в различных плоскостях на разные моменты времени [Федосеев, 2009]

Схема оборудования стационарной температурной скважины:  
1 – герметичная колонна из труб 89×3; 2 – термодатчик;  
3 – кабель; 4 – крышка с клеммами для вывода кабеля;  
5 – цементно-песчаный раствор; 6 – трансформаторное масло; 7 – съемный колпак



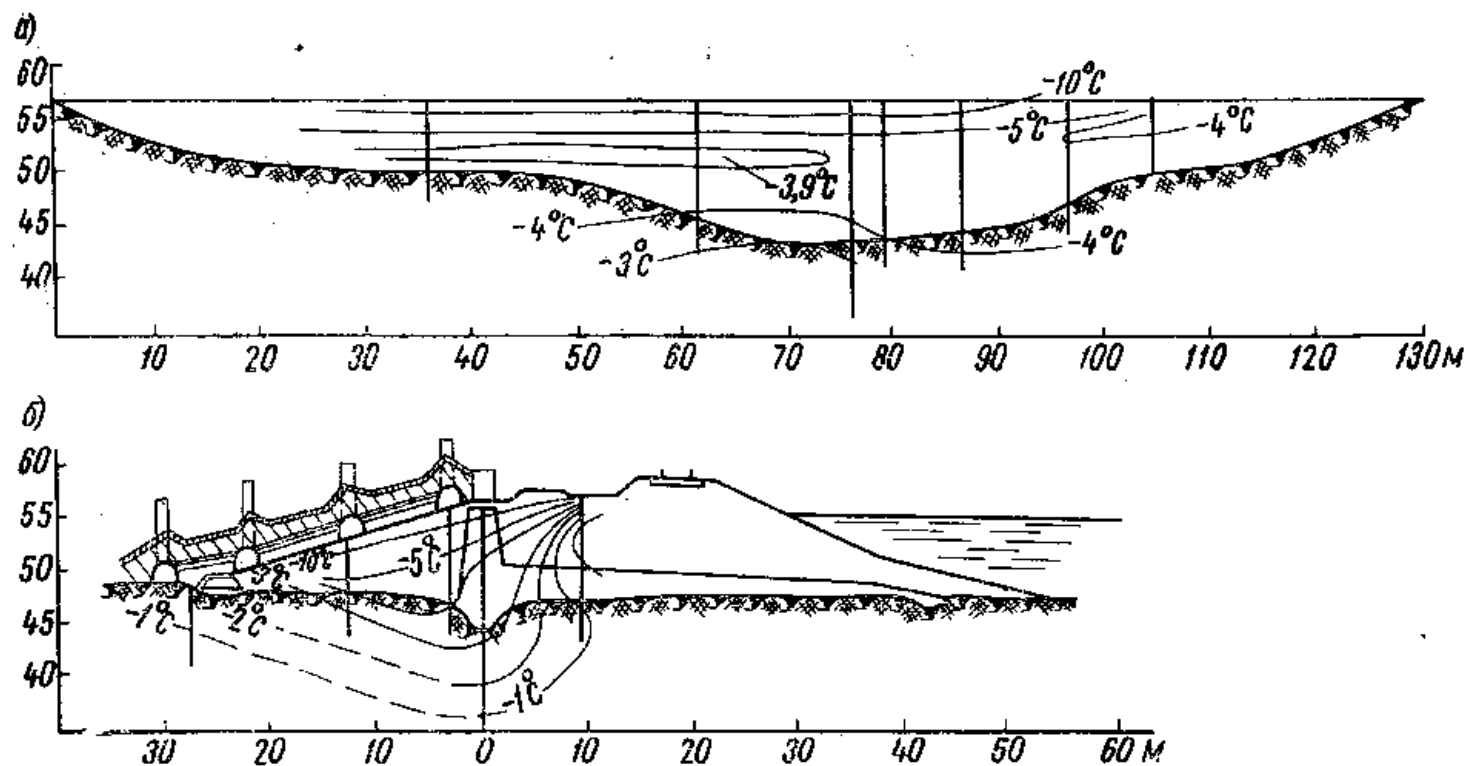
Вид на гребень плотины гидроузла на р. Ойуур – Юреге. Плотина снабжена автоматизированной системой дистанционного контроля температурного режима. 2012 г.

# **6. Температурный режим гидротехнических сооружений по расчетам и наблюдениям**

# Температурный режим грунтовых плотин мерзлого типа

## Плотина на р. Долгая в г. Норильске

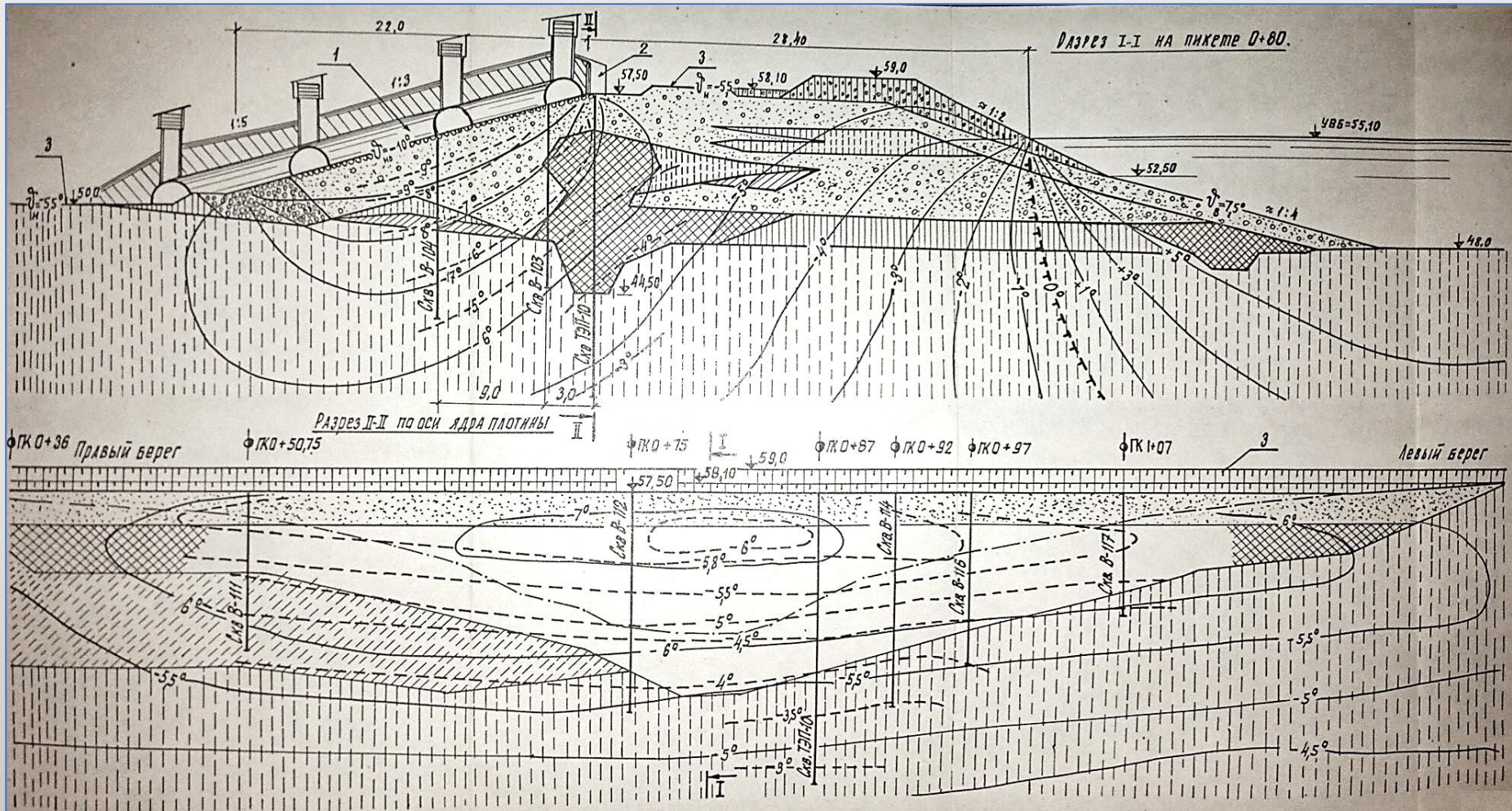
Плотина земляная с ядром построена в 1942 г. До 1979 г. эксплуатировалась с воздушной замораживающей системой и ледником на низовом откосе, далее – с системой из колонок СОУ.



Распределение температур в теле плотины на р. Долгая к концу 1955 г. [Трупак, 1970]:

а—продольный температурный профиль по глиннобетонному ядру плотины; б—поперечный температурный профиль

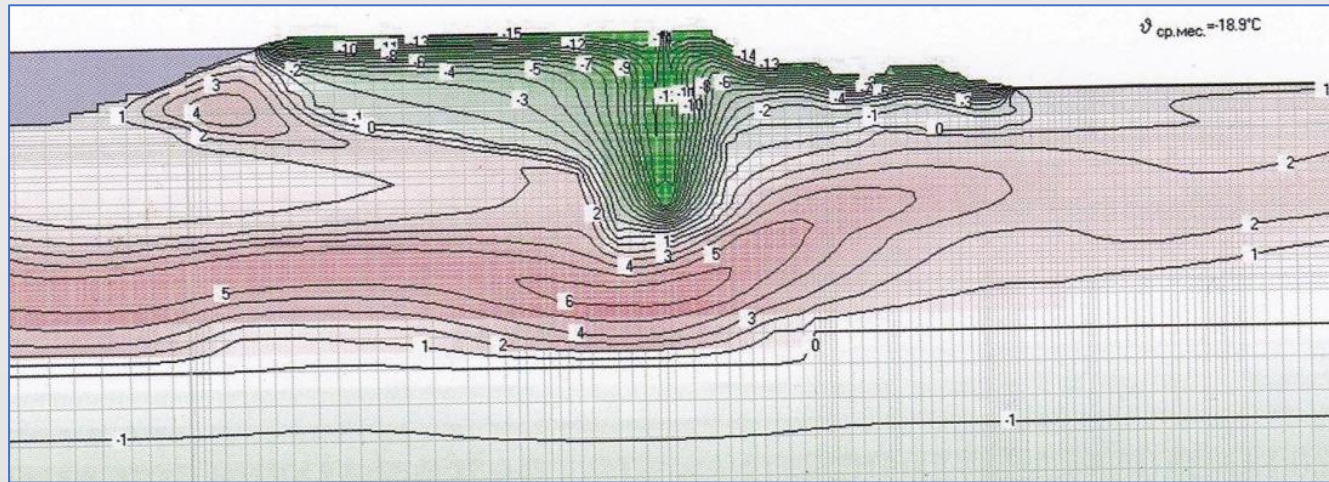
Через 30 лет эксплуатации (к 1972 г.) плотина достигла предельного (стационарного) температурного состояния [Анисимов, 1978].



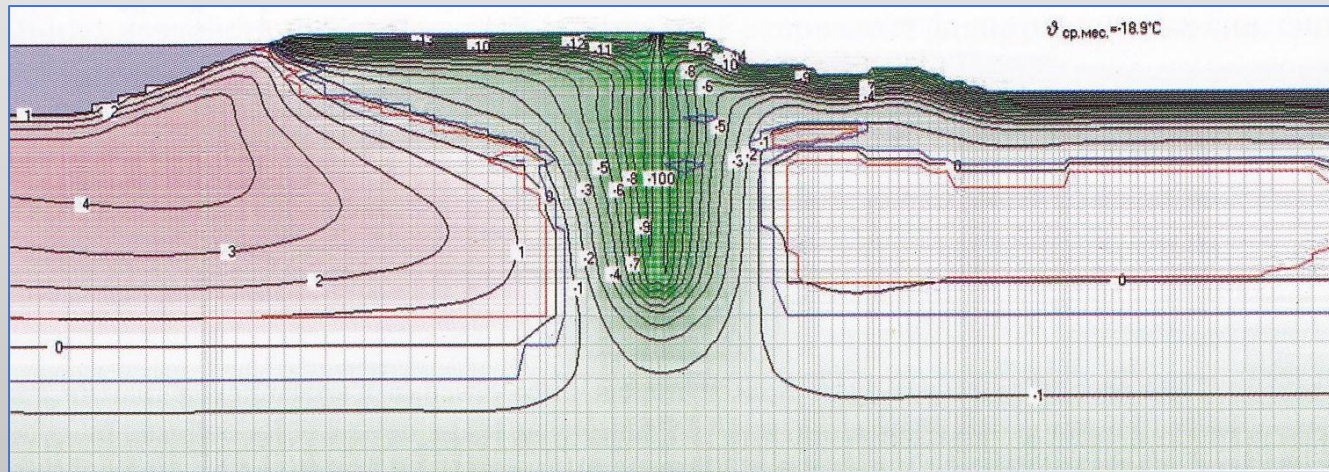
Поперечный разрез плотины на р. Долгая с изотермами стационарной температуры:  
 1 – ледяная галерея; 2 – деревянная галерея, закрывавшая устья скважин замораживающей системы; 3 – поверхность земли, соприкасающаяся с наружным воздухом; — — — -5° — — — расчетные изотермы; - - - -5° - - - - натурные изотермы

## Плотина Иреляхского гидроузла на р. Ирелях

Плотина земляная высотой 20 м с мерзлотной завесой, построена в 1965 г. В течение многолетней эксплуатации произошло растепление основания ниже мерзлотной завесы. Прогноз температурного режима, сделанный в 2005 г., показал, что при замораживающей системе, выполненной до глубины 61,5 м, возможна полная ликвидация талика под плотиной [Долгих, 2007].



Температурное поле в поперечном сечении Иреляхской плотины в марте 2015 г. (по данным расчета для существующих колонок СОУ)

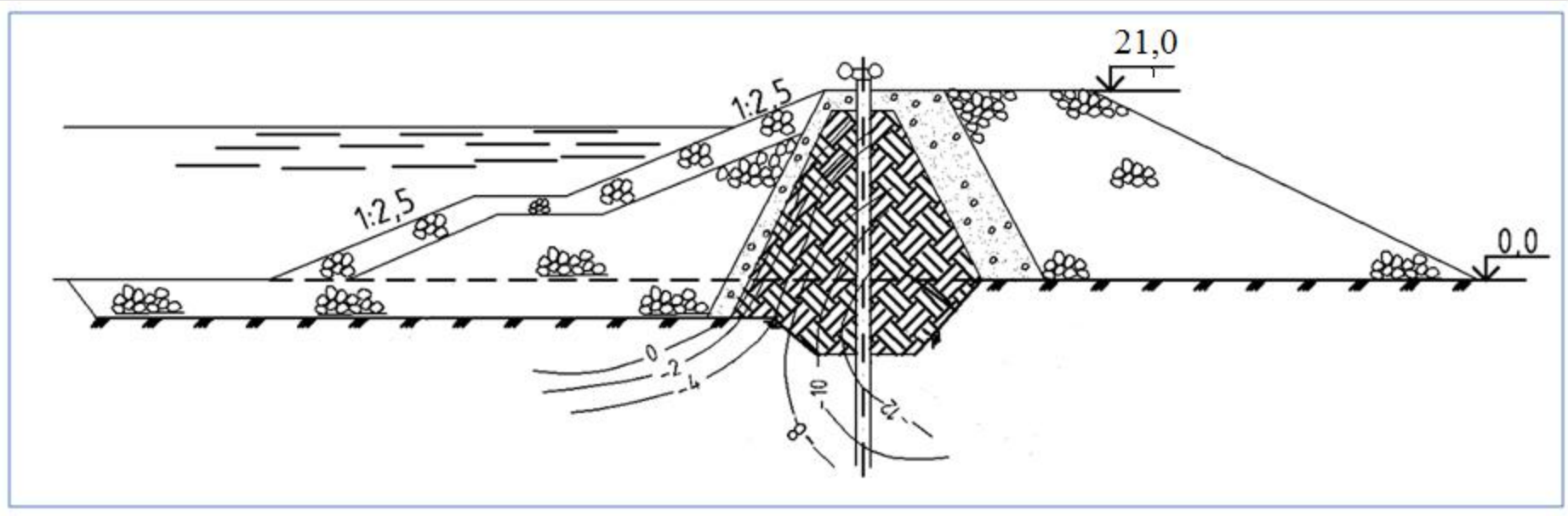


Температурное поле в поперечном сечении Иреляхской плотины в марте 2015 г. (по данным расчета при условии удлинения колонок СОУ)



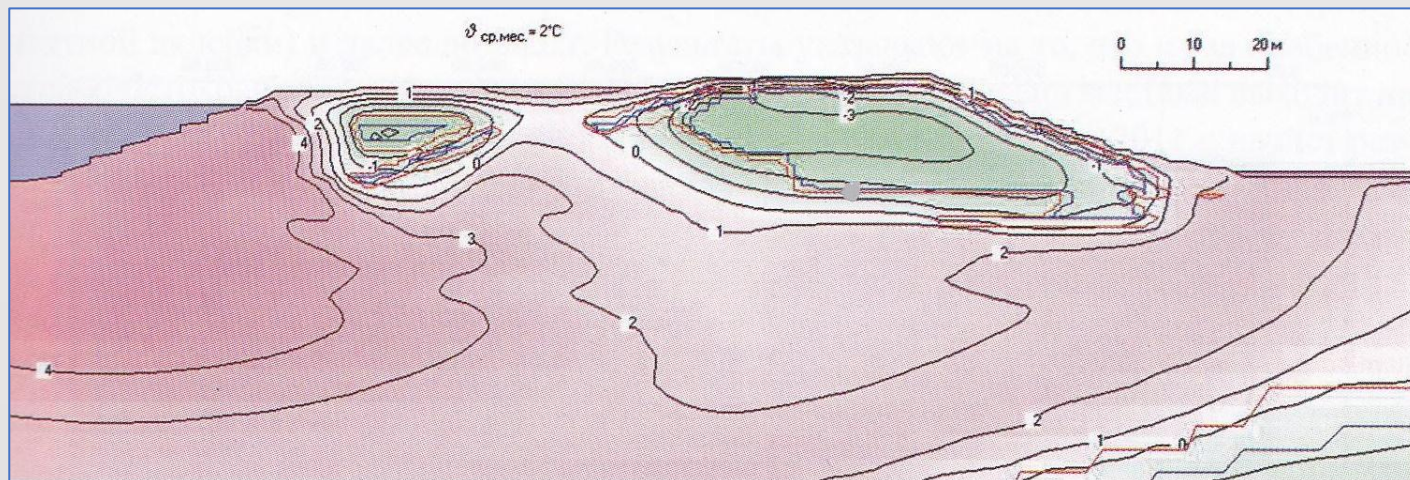
## Плотина Сытыканского гидроузла на р. Сытыкан

Плотина высотой 21 м с призмами из каменной наброски, ядром и воздушной замораживающей системой завершена строительством в 1977 г. Среднегодовая температура воздуха в районе  $-12,7^{\circ}\text{C}$ . Ядро плотины изначально было проморожено.

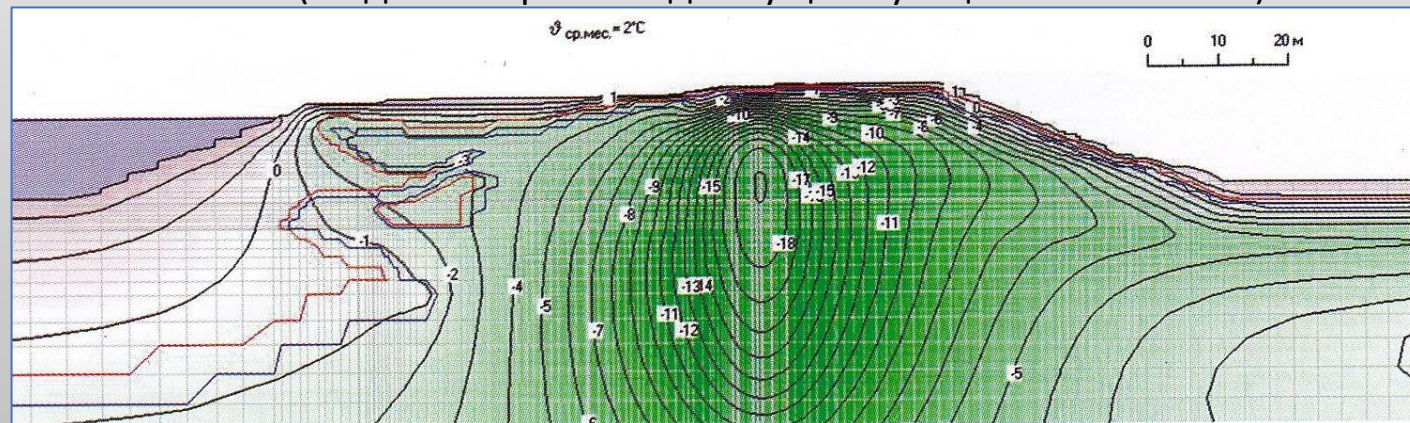


Температурное поле в плотине и ее основании в первые годы эксплуатации по натурным данным

К 2000-м гг. у плотины на р. Сытыкан проявилась ситуация с растеплением основания и фильтрацией воды в обход колонок СОУ. Прогноз температурного режима, сделанный в 2005 г., показал, что при выполненной цементационной завесе и удлинении колонок СОУ возможна планомерная ликвидация талика в основании плотины [Долгих, 2007].



Прогнозируемое температурное поле в поперечном сечении Сытыканской плотины в сентябре 2030 г. (по данным расчета для существующих колонок СОУ)

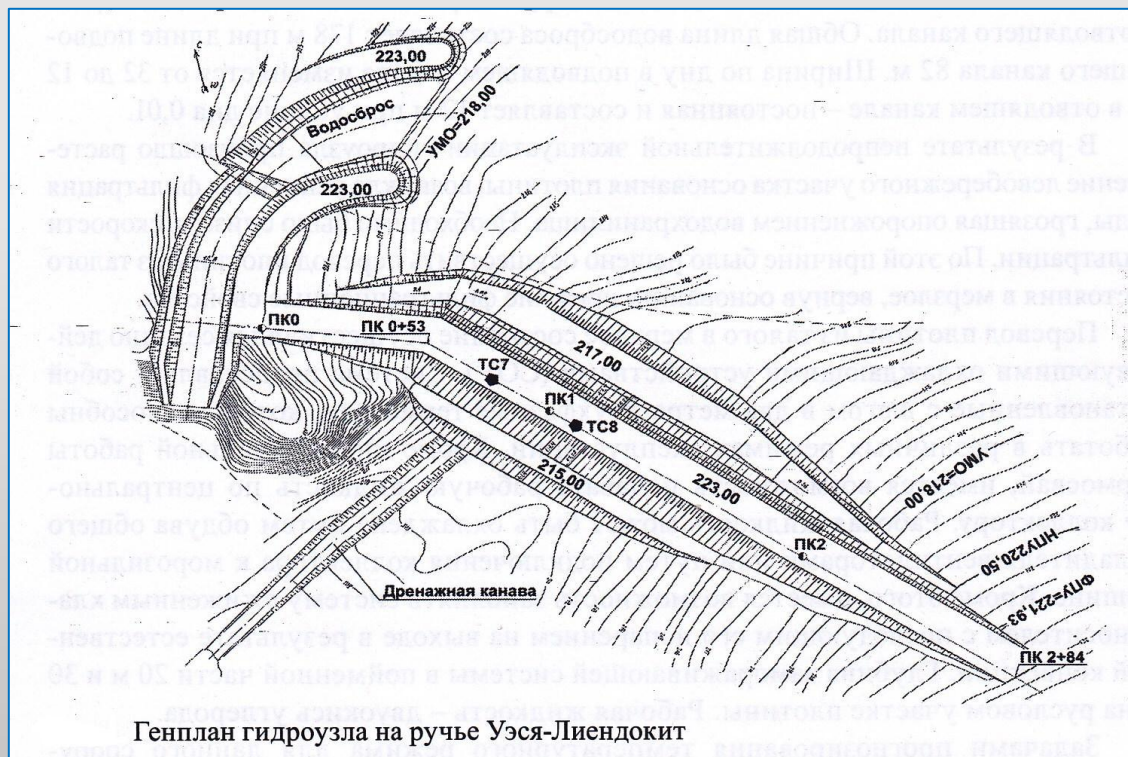


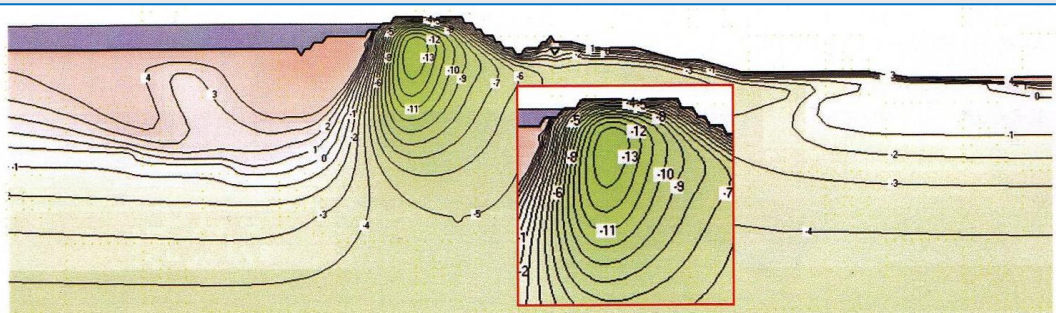
Прогнозируемое температурное поле в поперечном сечении Сытыканской плотины в сентябре 2030 г. (по данным расчета при условии проведения цементации основания и удлинения колонок СОУ)

## Плотина гидроузла на ручье Уэся-Лиендокит в бассейне р. Вилюй

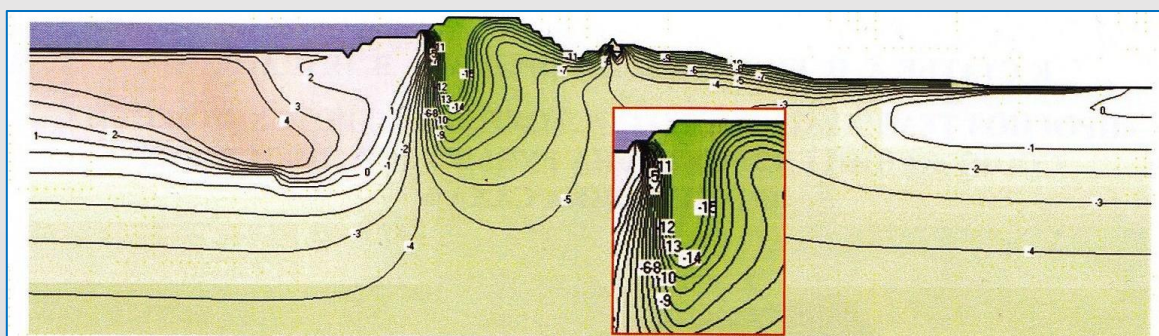
Плотина длиной по гребню 284 м высотой до 12,5 м каменно-земляная с упорными призмами из долерита, ядром из суглинка, была построена в 2003 г. по талому типу. После непродолжительной эксплуатации гидроузла произошло растепление основания с возникновением усиленной фильтрации воды. Пришлось перевести плотину из талого состояния в мерзлое, устроив в 2006 г. замораживающую систему из СОУ глубиной 20 – 30 м.

Был выполнен прогнозный расчет температурного режима плотины с замораживающей системой по схеме трехразмерной задачи на период 2006 – 2020 гг. [Белов, 2010].

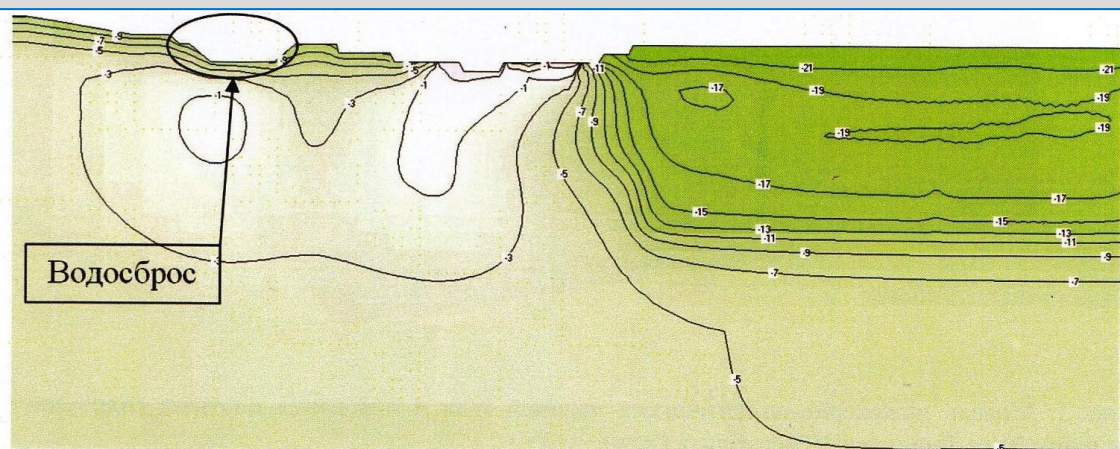




Температурный поперечный профиль тела плотины на пикете 0+75, июнь 2020 г.



Температурный поперечный профиль тела плотины на пикете 0+75, январь 2020 г.

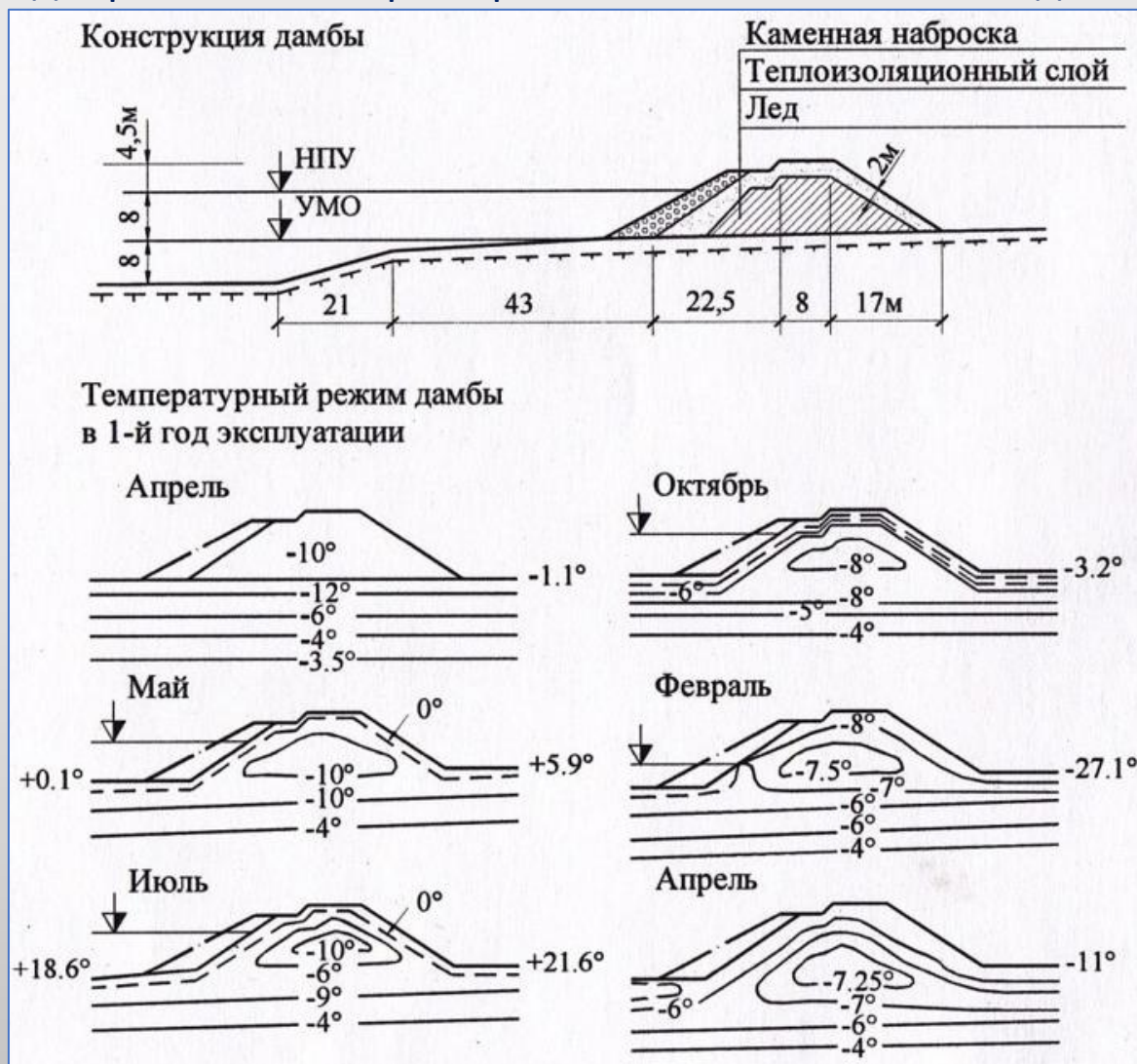


Температурный продольный профиль по ряду колонок, январь 2020 г.

Результаты прогнозного расчета дали возможность предвидеть развитие температурного режима в плотине на руч. Уэся-Лиендокит и ее основании при нормальной эксплуатации замораживающей системы.

# Ледогрунтовая защитная дамба в условиях Центральной Якутии

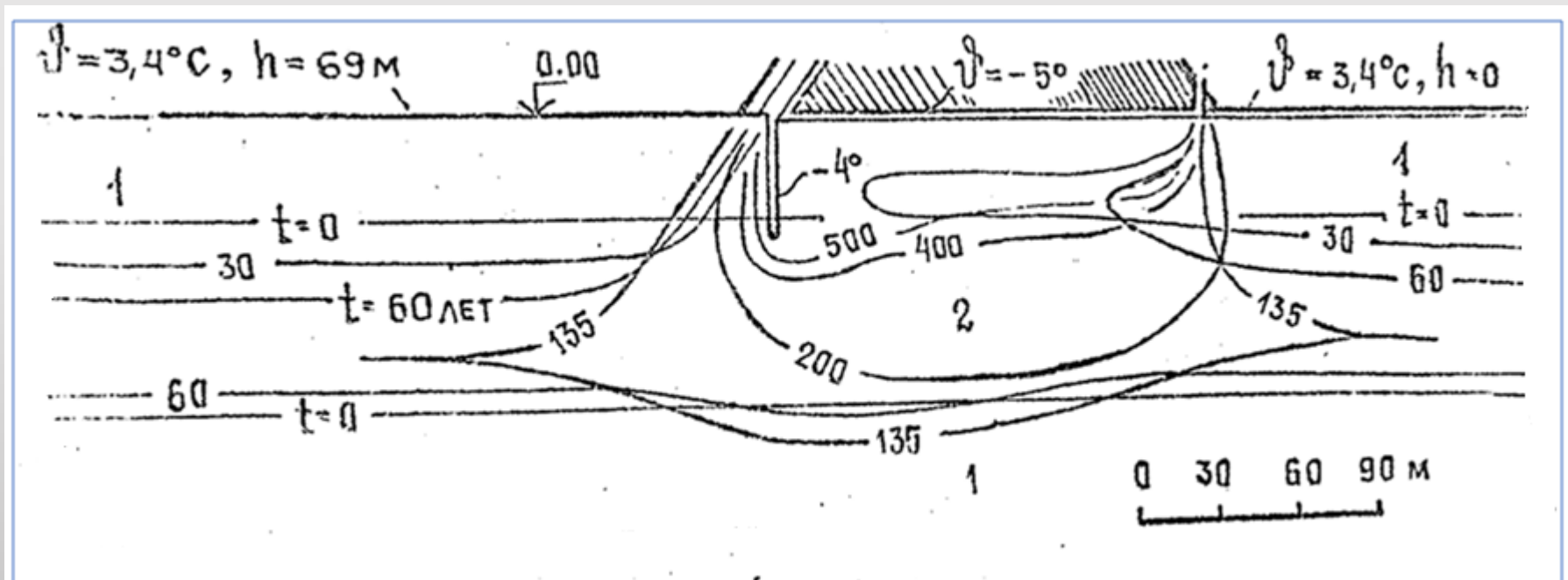
Дамба в период строительства проморожена естественным холодом.



Результаты расчета температурного режима дамбы по среднемесячным данным о температурах воздуха и воды водохранилища за первый год эксплуатации [Гоголев, 1984]

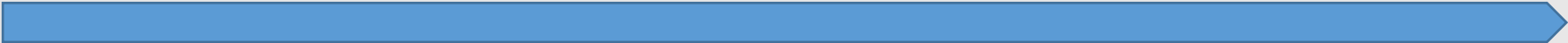
## Проектный вариант плотины мерзлого типа Амгуэмского гидроузла на р. Амгуэма

Расчетным путем прослежен температурный процесс в основании плотины в ходе долговременной эксплуатации. Показано, что сквозное протаивание мерзлоты под водохранилищем произойдет за 135 лет, затем возникнет фильтрация из водохранилища в нижний бьеф, способствующая оттаиванию мерзлого массива под плотиной снизу, которое завершится примерно за 500 лет [Битюрин, 1989].



Деградация мерзлоты в основании водохранилища и плотины на р. Амгуэма в русловом сечении: показаны границы раздела талых 1 и мерзлых 2 грунтов

# Температурный режим каменно-земляных и каменнонабросных плотин талого типа



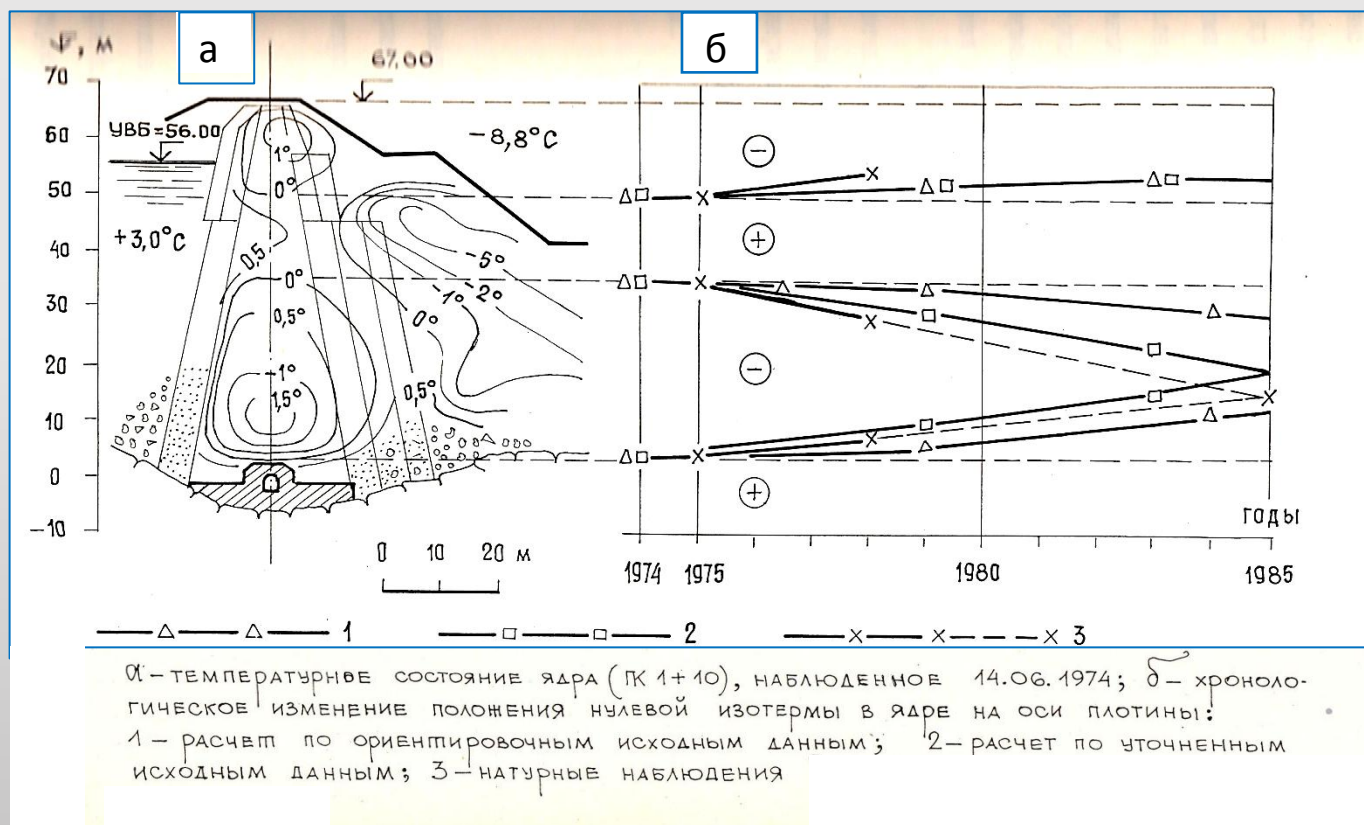
Наиболее существенная перестройка температурного поля в плотине, полученного ею к моменту окончания строительства, происходит в период начальной эксплуатации.

Затем (по прошествии лет) температурный режим плотины устанавливается и приобретает квазистационарный характер. При этом низовая призма из каменной наброски промерзает.

Важно, чтобы в талом (фильтрующем) состоянии оставался грунтовый противифльтрационный элемент с переходными зонами, обеспечивая штатный режим эксплуатации плотины.

## Каменно-земляная плотина с ядром Усть-Хантайского гидроузла на р. Хантайке

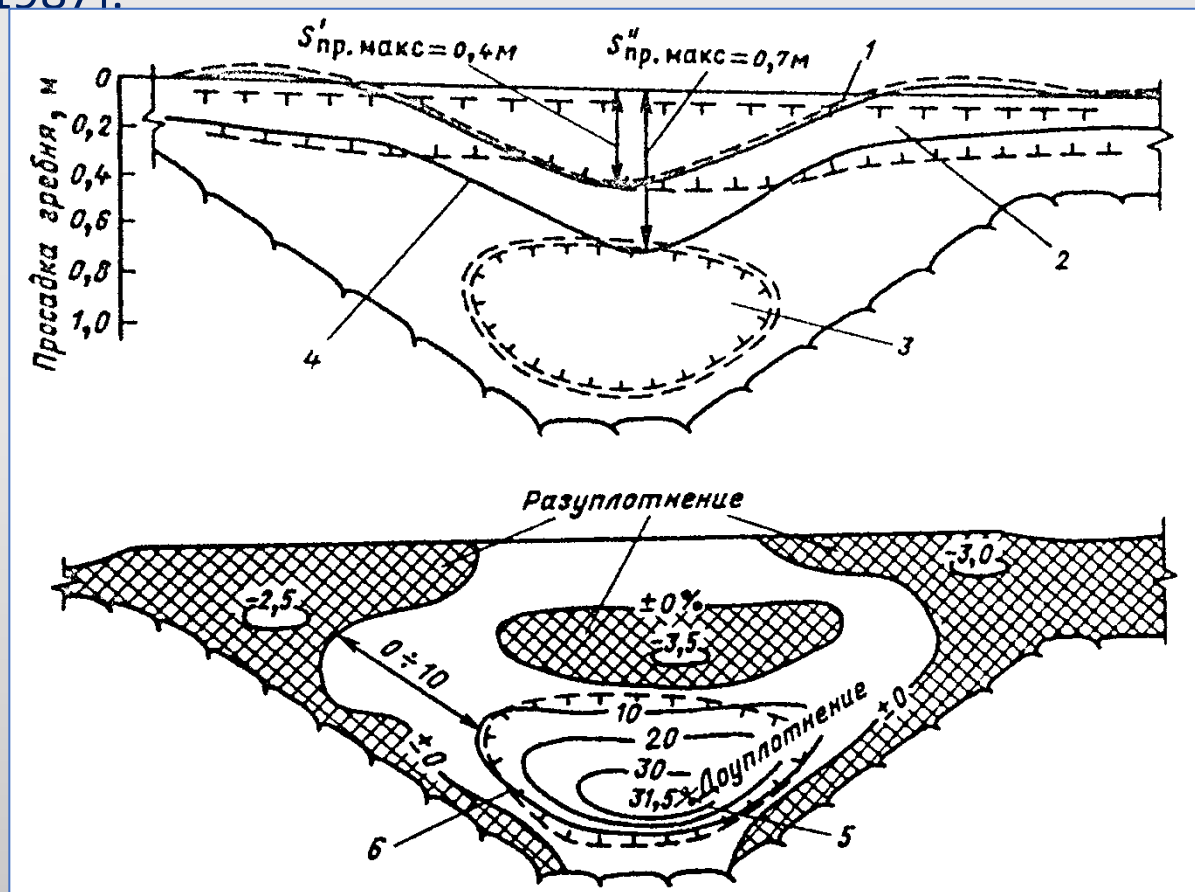
В период строительства ядро плотины было частично заморожено. Плотина начала принимать напор в 1970 г. Нижняя мерзлая зона ядра оттаяла к 1985 г.



Температурный режим грунтового ядра русловой каменно-земляной плотины Усть-Хантайского гидроузла в период начальной эксплуатации по прогнозируемому расчету ННГАСУ и натурным наблюдениям [Богословский, 1975; 1982]

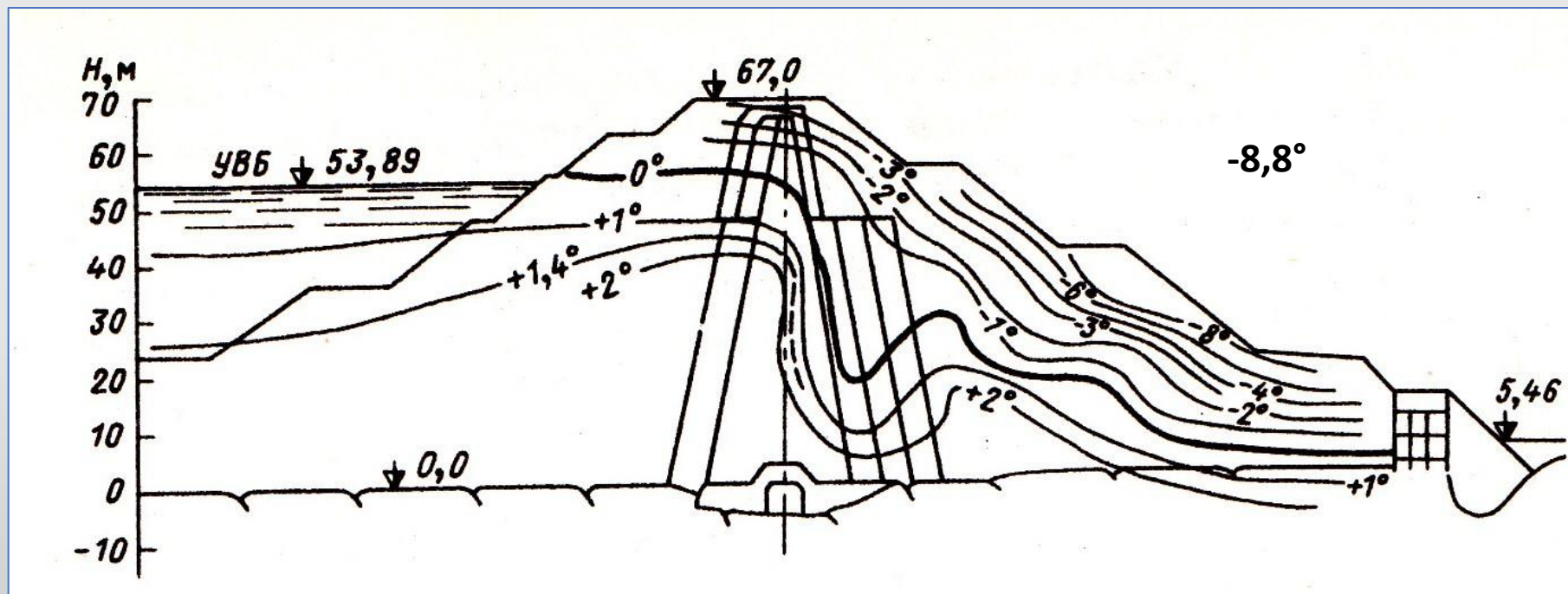


После оттаивания мерзлых зон в ядре плотины Усть-Хантайского гидроузла произошли его осадки и образовались зоны разуплотнения грунта. Однако, осадки гребня ядра не превысили его строительный подъем, и в ядре не возникли опасные для эксплуатации зоны трещинообразования [Куперман, 1987].



Эпюры осадок и зоны разуплотнения грунта ядра каменно-земляной плотины Усть-Хантайского гидроузла после оттаивания мерзлых зон: 1 – просадка при оттаивании нижней зоны; 2 – верхняя мерзлая зона; 3 – нижняя мерзлая зона; 4 – просадка при оттаивании верхней и нижней зон; 5 – изолинии изменения плотности; 6 – расчетное положение исходной границы мерзлоты

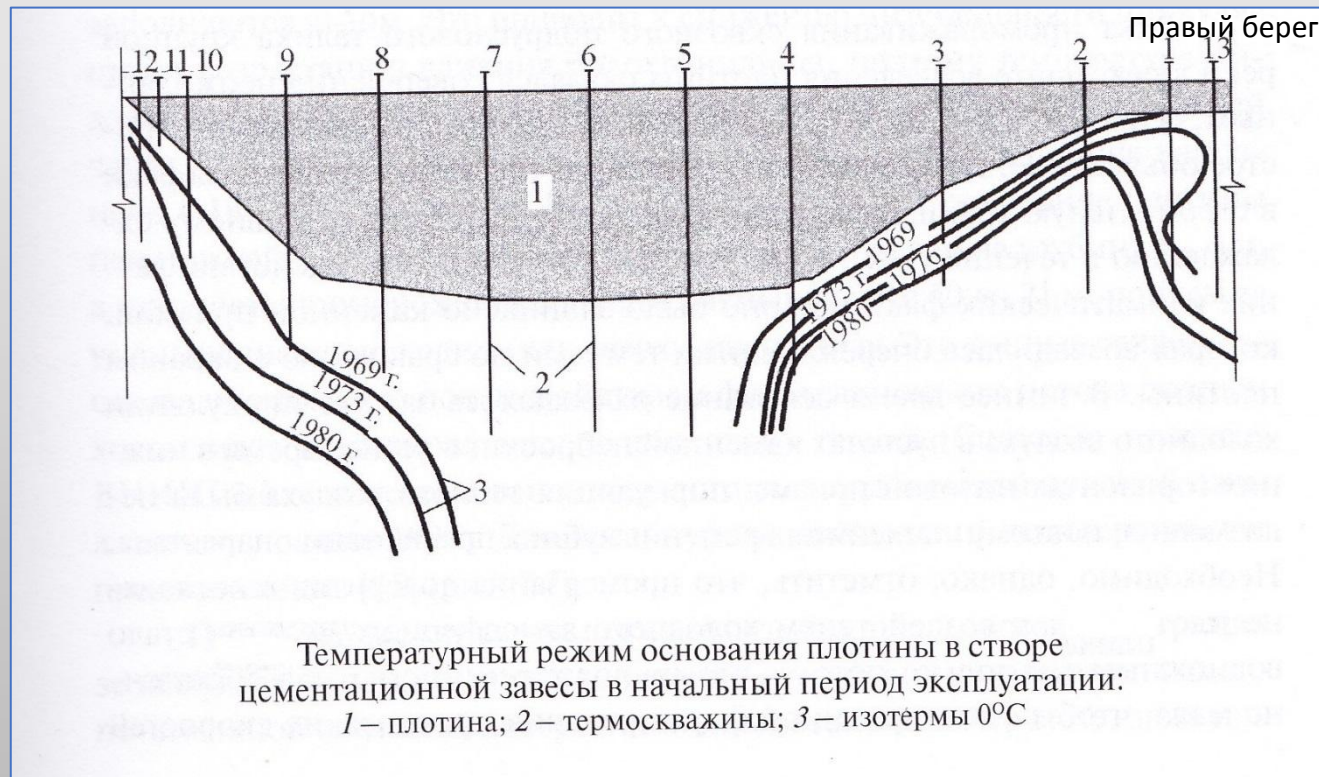
Через 15 лет после начала эксплуатации температурное поле в плотине было близко к установившемуся. Верхняя зона ядра оставалась частично промороженной.



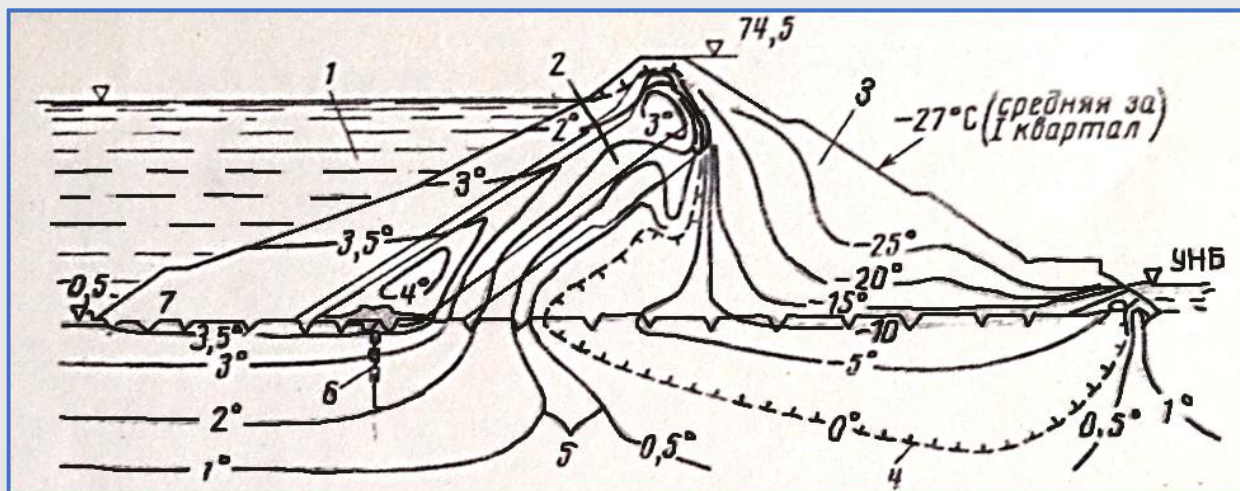
Среднегодовое температурное поле русловой каменно-земляной плотины Усть-Хантайского гидроузла в 1984 г. через 15 лет от начала эксплуатации по данным натуральных наблюдений [Куперман, 1987]

## Каменно-земляная плотина с экраном Вилюйского гидроузла на р. Вилюй

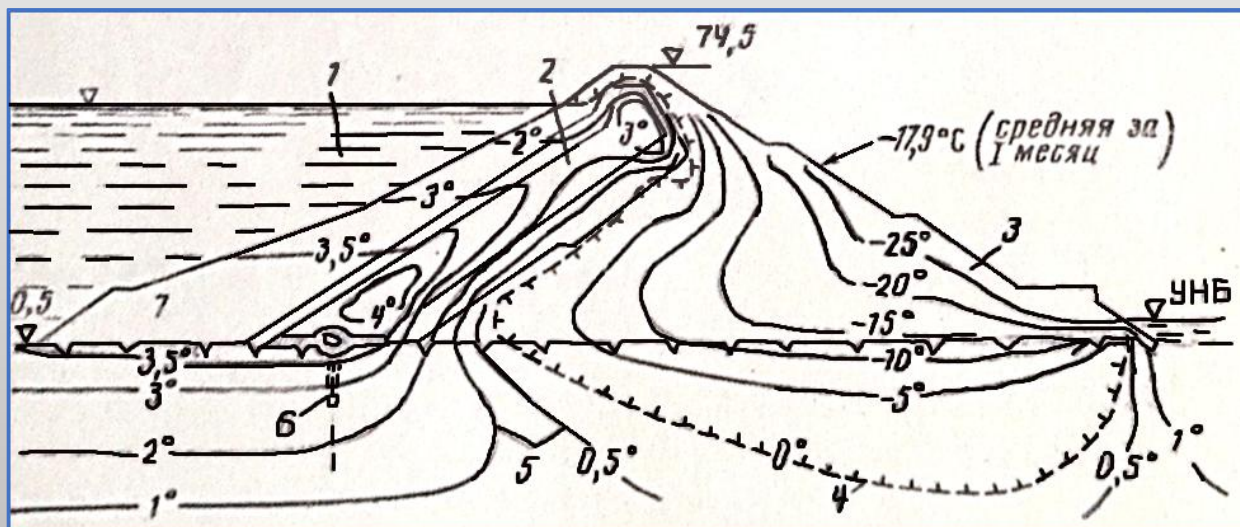
Вилюйское водохранилище было наполнено до НПУ = 67,90 м БС за 1967-1969 гг. (при УМО = 59,80). К 1969 г. была оборудована система скважин для контроля температурного режима основания и тела плотины. Замеры температур показали, что основание плотины начало оттаивать в сторону бортов, причем скорость оттаивания грунтов основания на левом берегу была выше, чем на правом [Федосеев, 2009].



К весне 1973 г. низовая каменнонабросная призма плотины была уже мерзлой, что показали результаты расчетов и наблюдений, которые между собой хорошо согласуются [Богословский, 1986]. Вместе с низовой призмой подрусловой талик под ней оказался промороженным на глубину 40 м.

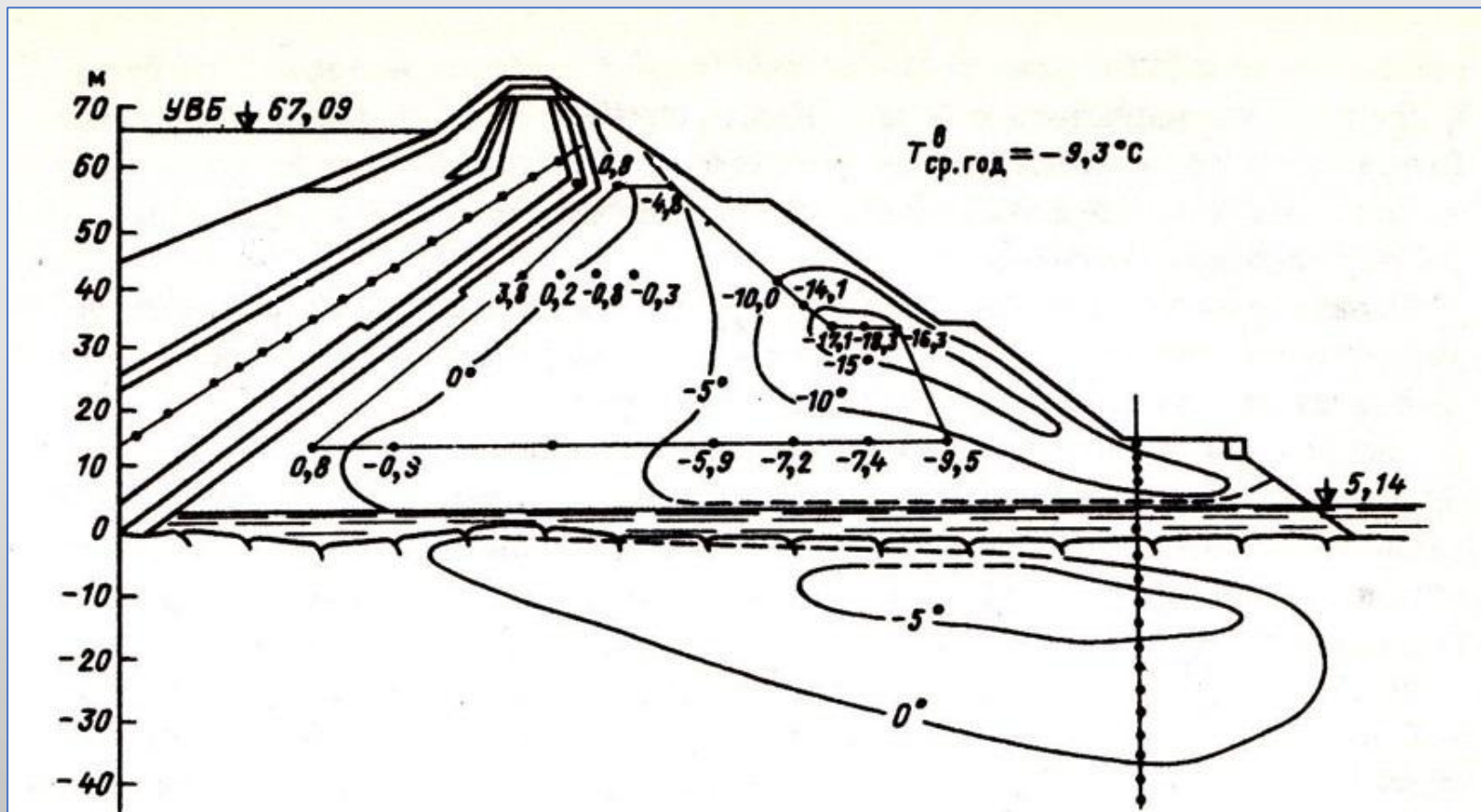


Расчетный температурный профиль плотины по сечению на ПК 2+40 на конец I квартала 1973 г.: 1 – водохранилище; 2 – противофильтрационный экран с переходными зонами; 3 – низовая призма из каменной наброски; 4 – линия раздела между талым и мерзлым грунтами; 5 – изотермы; 6 – цементационная завеса; 7 – верховая призма



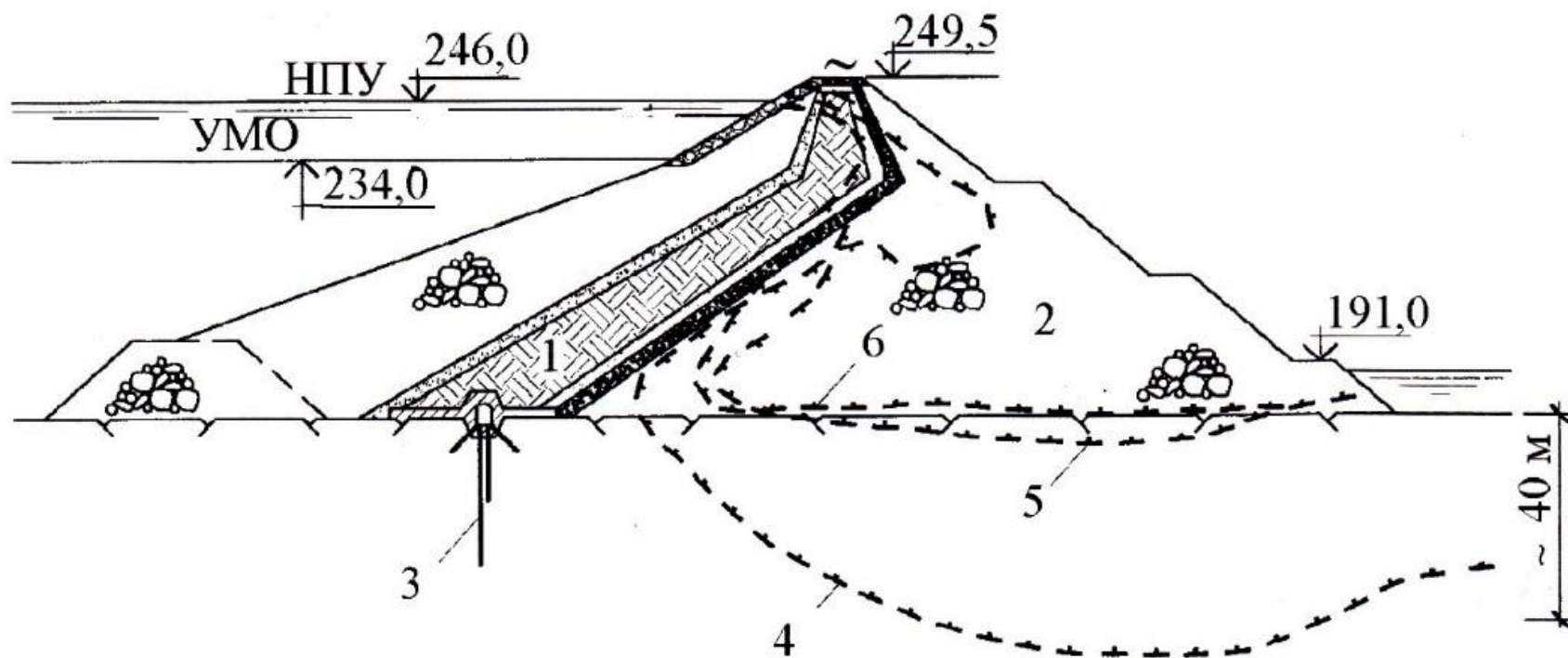
Фактический температурный профиль плотины по сечению на ПК 2+40 к концу марта 1973 г.: обозначения те же, что и на верхнем рисунке

В дальнейшем температурное поле в плотине мало изменилось: низовая призма плотины круглогодично оставалась мерзлой, экран и переходные зоны – талыми. К концу 1979 г. основание под низовой призмой плотины оттаяло на глубину 5 - 6 м и мощность промороженной толщи уменьшилась.



Среднегодовое натурное температурное состояние плотины Вилюйского гидроузла в 1979 г., сечение на ПК 2+40 [Куперман, 1987]

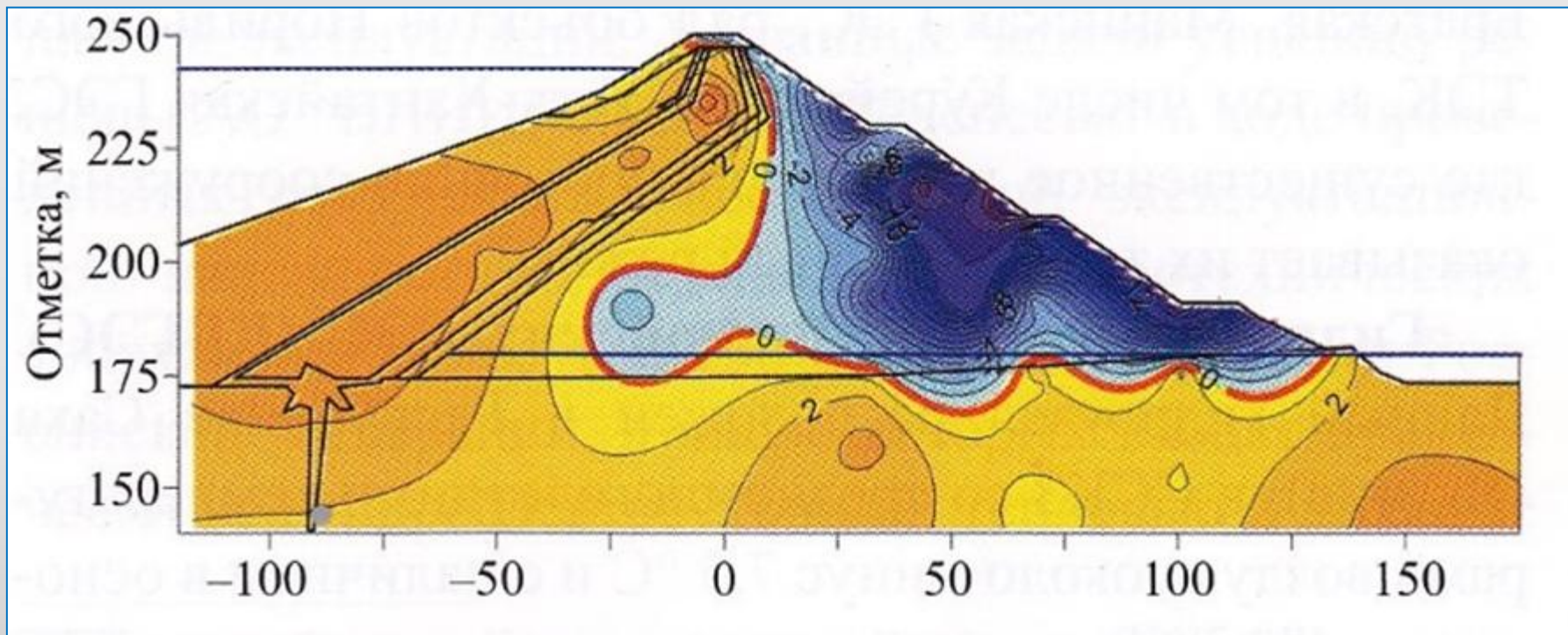
По натурным данным к 1990 г. низовая призма плотины оставалась мерзлой, а замороженная толща в основании под низовой призмой исчезла [Федосеев, 2009].



Положение изотермы  $0^{\circ}\text{C}$  под низовой призмой плотины  
на участке руслового талика (ПК 2+40):

1 – суглинистый экран плотины; 2 – низовая призма плотины;  
3 – цементационная завеса; 4, 5, 6 – изотерма  $0^{\circ}\text{C}$  в 1971, 1980 и 1988 гг.

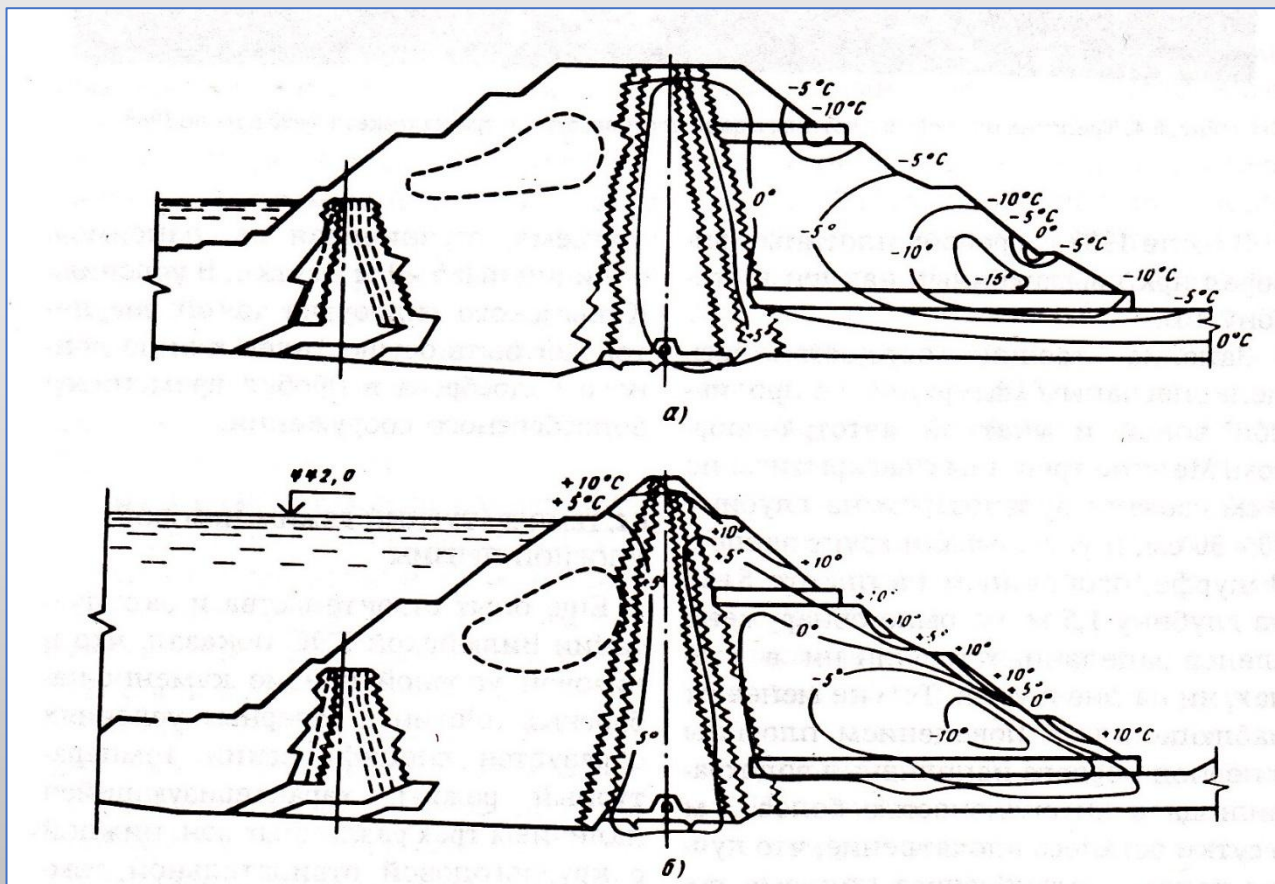
В настоящее время температурное состояние плотины опасений не вызывает [Панов, 2016].



Результаты расчетной оценки современного температурного состояния плотины Вилюйского гидроузла с учетом конвекции воздуха в каменной наброске низовой призмы: температурное состояние плотины в конце зимнего периода

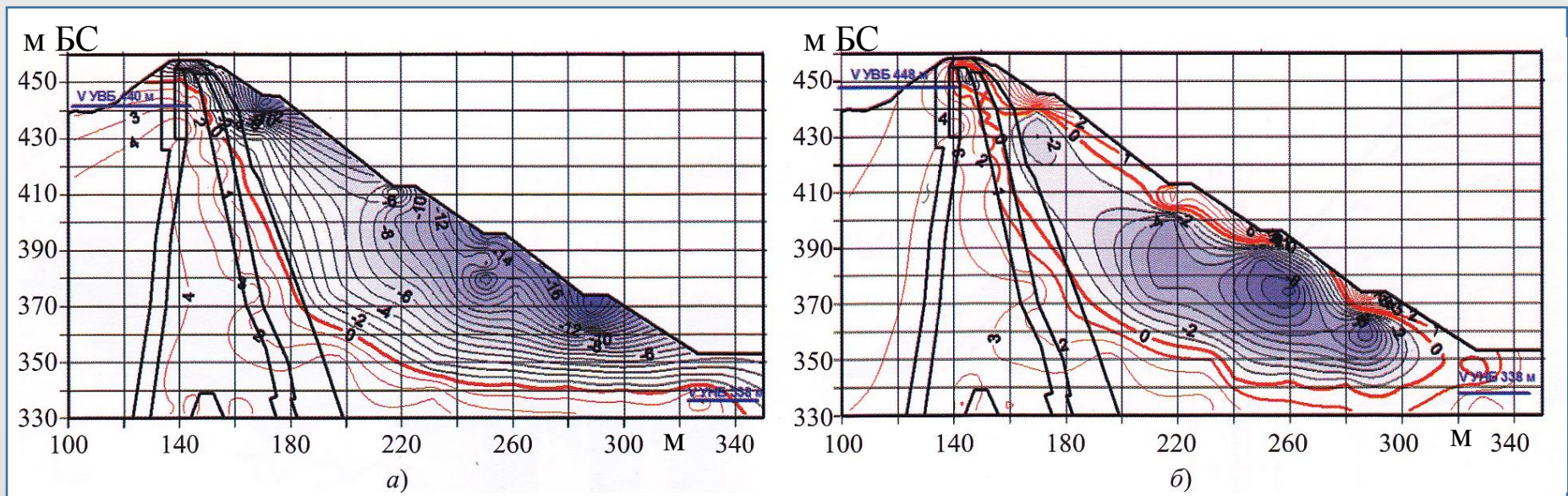
# Каменно-земляная плотина с ядром Колымской ГЭС на р. Колыме

Среднегодовая температура воздуха в районе – 12 °С. Строительство плотины высотой 130 м завершено в 1988 г. К этому времени ядро и переходные зоны находились в талом состоянии, а в низовой упорной призме сформировалась область круглогодичного отрицательных температур [Когодовский, 1996].



Температурные поля в теле плотины на пикете 4+00 в максимальном по высоте сечении по натурным данным: а – в апреле 1988 г.; б – в сентябре 1988 г.



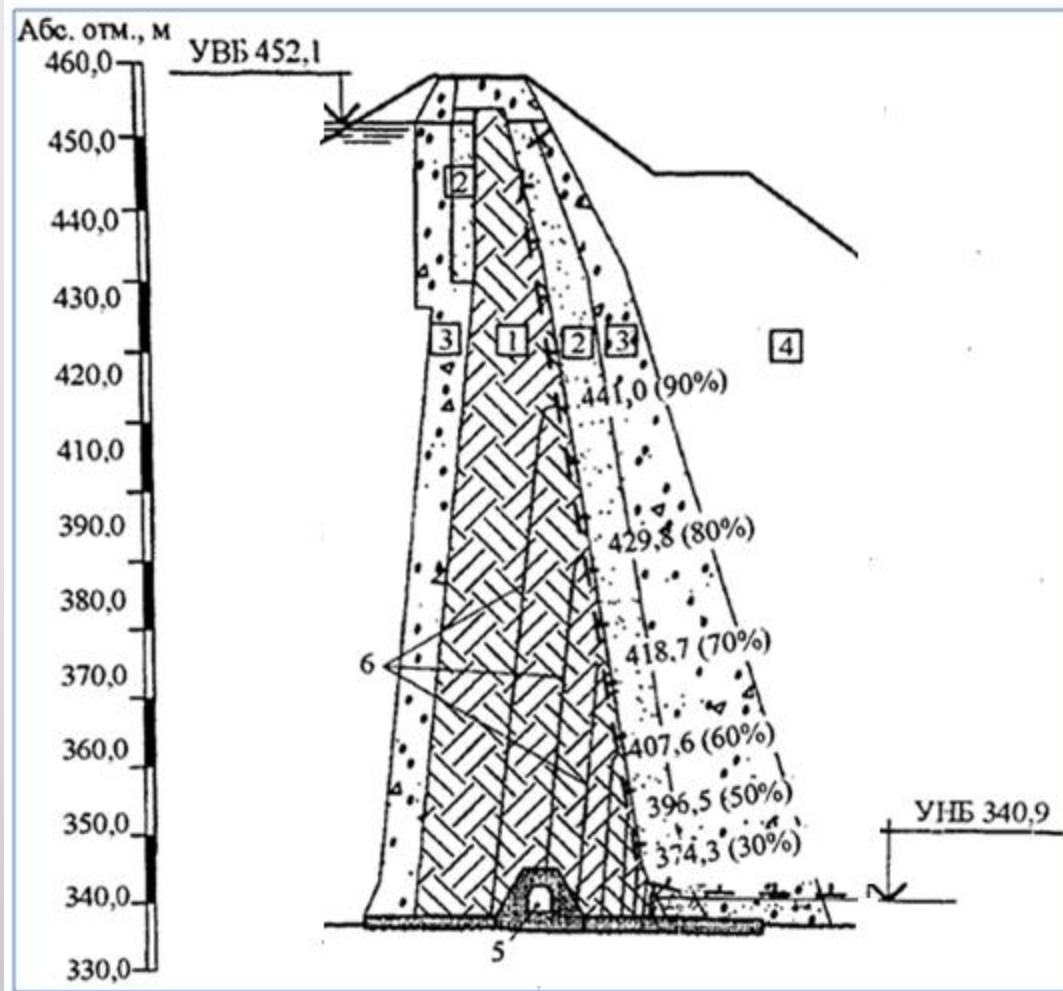


Современное температурное состояние плотины Колымской ГЭС по данным натуральных наблюдений: а – в конце зимы; б – в конце лета [Панов, 2011]

Низовая призма плотины мерзлая. Нулевая изотерма захватывает низовые переходные зоны (фильтры) ядра, что может затруднить отвод фильтрационного потока и вызвать непроектную фильтрацию в ядре плотины.

Непроектная фильтрация воды в ядре плотины Колымской ГЭС из-за предполагаемого промерзания низовых фильтров

Из-за предполагаемого промерзания низовых фильтров ядра почти по всей их высоте отвод фильтрационного потока в нижний бьеф происходит только через небольшую талую зону фильтров у подошвы плотины. Вследствие этого в ядре сложилась непроектная фильтрационная ситуация с повышенными напорами. Конструктивным решением может быть организация подогрева контактной зоны фильтров и ядра [Федосеев, 2009].



Распределение напоров в ядре плотины при промерзании низовых фильтров (по данным моделирования МГСУ): 1 – ядро плотины; 2, 3 – первый и второй фильтры; 4 – каменная наброска; 5 – цементационная галерея с открылками; 6 – линии равных напоров

## Участок сопряжения каменно-земляной плотины с бетонными сооружениями строящегося Усть-Среднеканского гидроузла

Выполнено трехмерное прогнозное математическое моделирование температурного режима участка сопряжения бетонной водосливной и каменно-земляной плотин для 40-летнего периода нормальной эксплуатации гидроузла (без учета строительного периода) [Горохов, 2012].

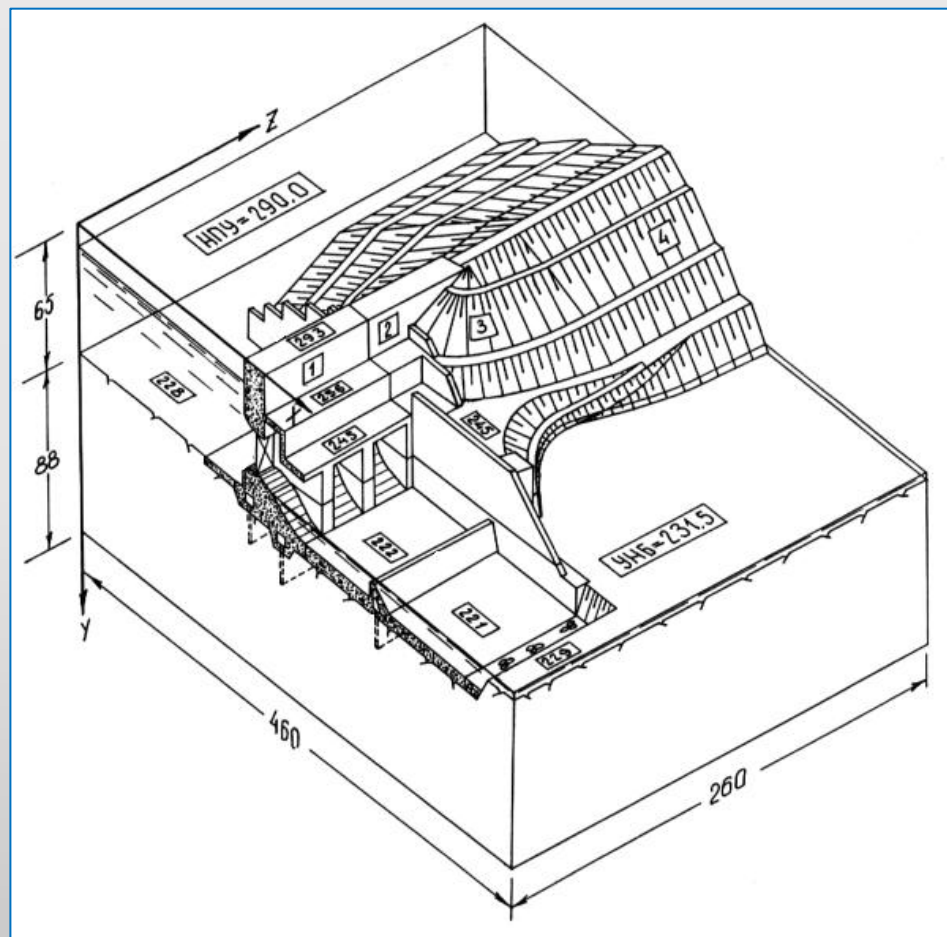
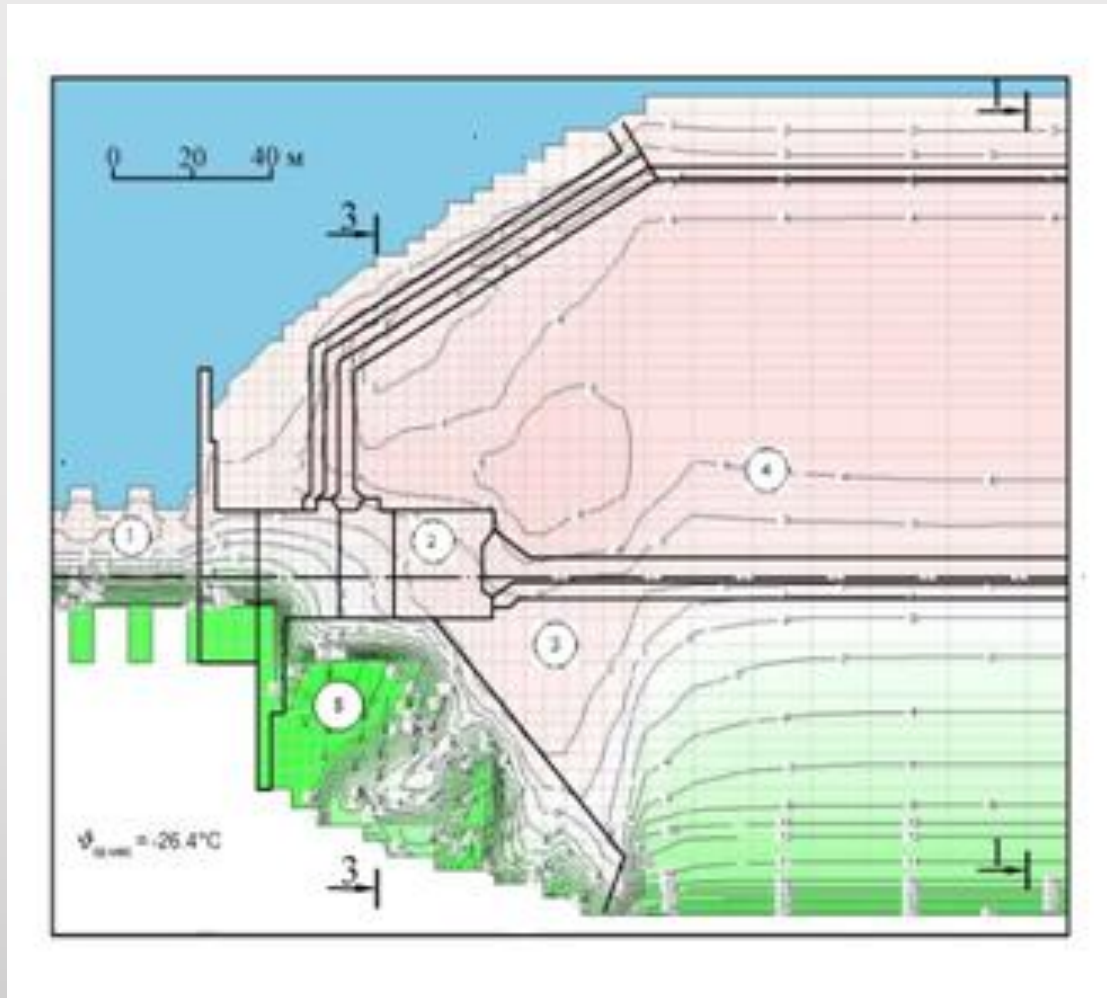
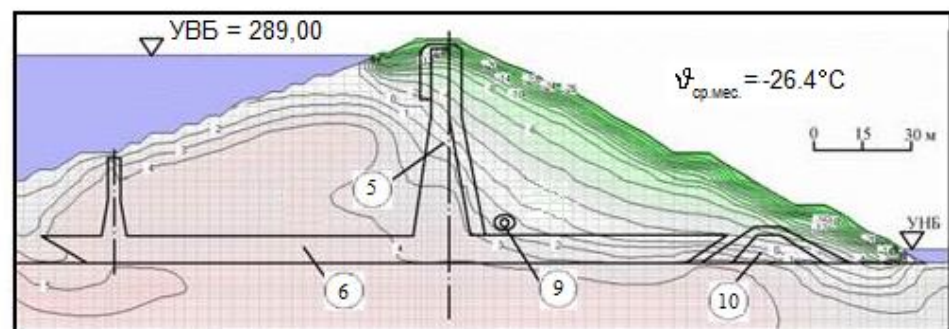


Схема расчетной области: 1 – бетонная водосбросная плотина; 2 – центральный сопрягающий устой; 3 – сопрягающий участок русловой плотины; 4 – русловая грунтовая плотина

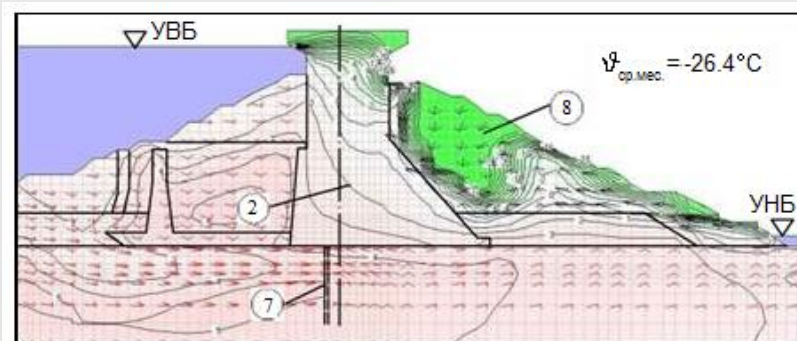


Расчетное температурное поле в марте 40 года в горизонтальном сечении на отметке 255,00 м: 1 – бетонная водосбросная плотина; 2 – центральный сопрягающий устой; 3 – сопрягающий участок русловой плотины; 4 – русловая грунтовая плотина; 8 – каменная наброска

Сечение 1 - 1



Сечение 3 - 3

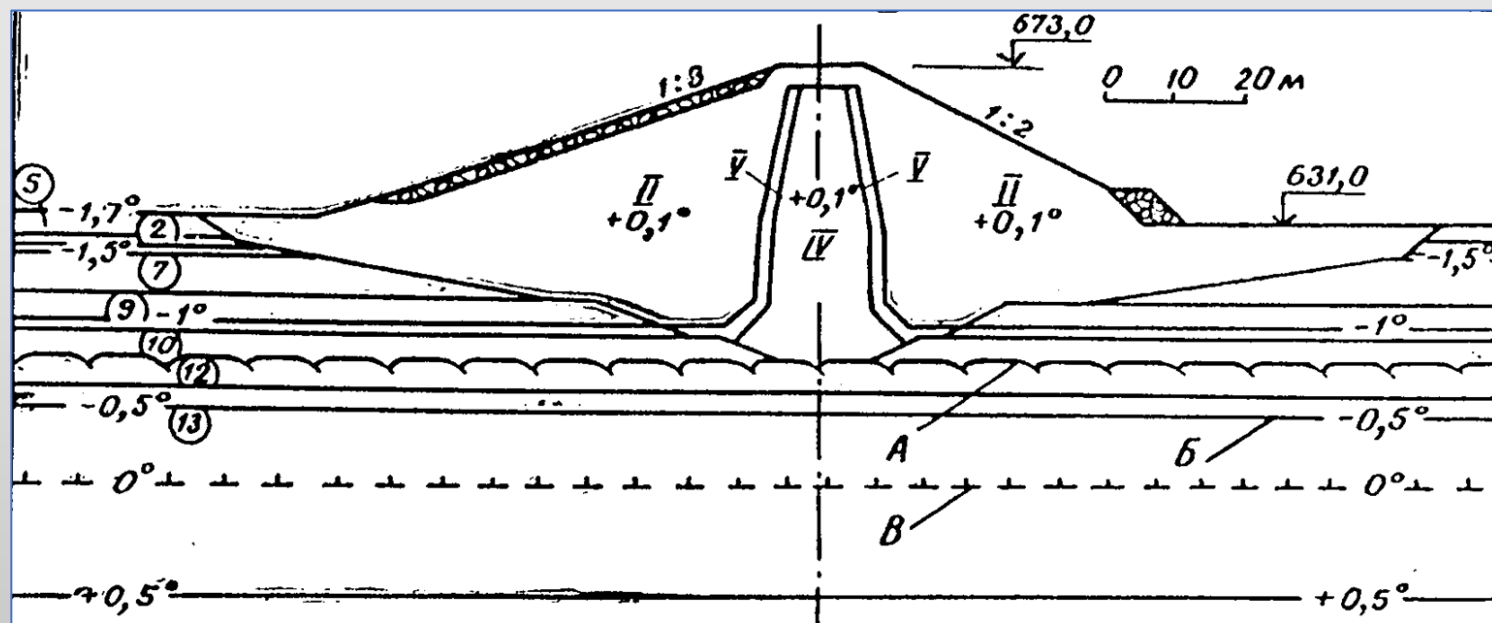


Расчетные температурные поля в марте 40 года в вертикальных сечениях 1 – 1 и 3 – 3 сопряжения грунтовой и бетонной плотин Усть-Среднеканского гидроузла: 2 – центральный сопрягающий устой; 5 и 6 – ядро и понур из суглинка; 7 – вертикальный дренаж; 8 – каменная наброска; 9 – трубчатый дренаж; 10 – каменный банкет

Анализ моделирования показал, что проектная работоспособность дренажных и противофильтрационных контуров сооружений за рассмотренный 40-летний период эксплуатации и далее будет обеспечена.

## Каменно-земляная плотина проектировавшегося гидроузла на р. Вача в Иркутской области

Среднегодовая температура воздуха в районе минус  $5,6^{\circ}\text{C}$ , мощность мерзлой толщи 40 м, под руслом реки сквозной талик. Плотина талого типа проектировалась из гравийно-галечникового грунта с супесчаным ядром. Русловая часть плотины основана на подрусловом талике. пойменные части плотины расположены на мерзлом основании. Они после возведения выдерживаются 4 года до заполнения водохранилища, пока строится русловая часть плотины.



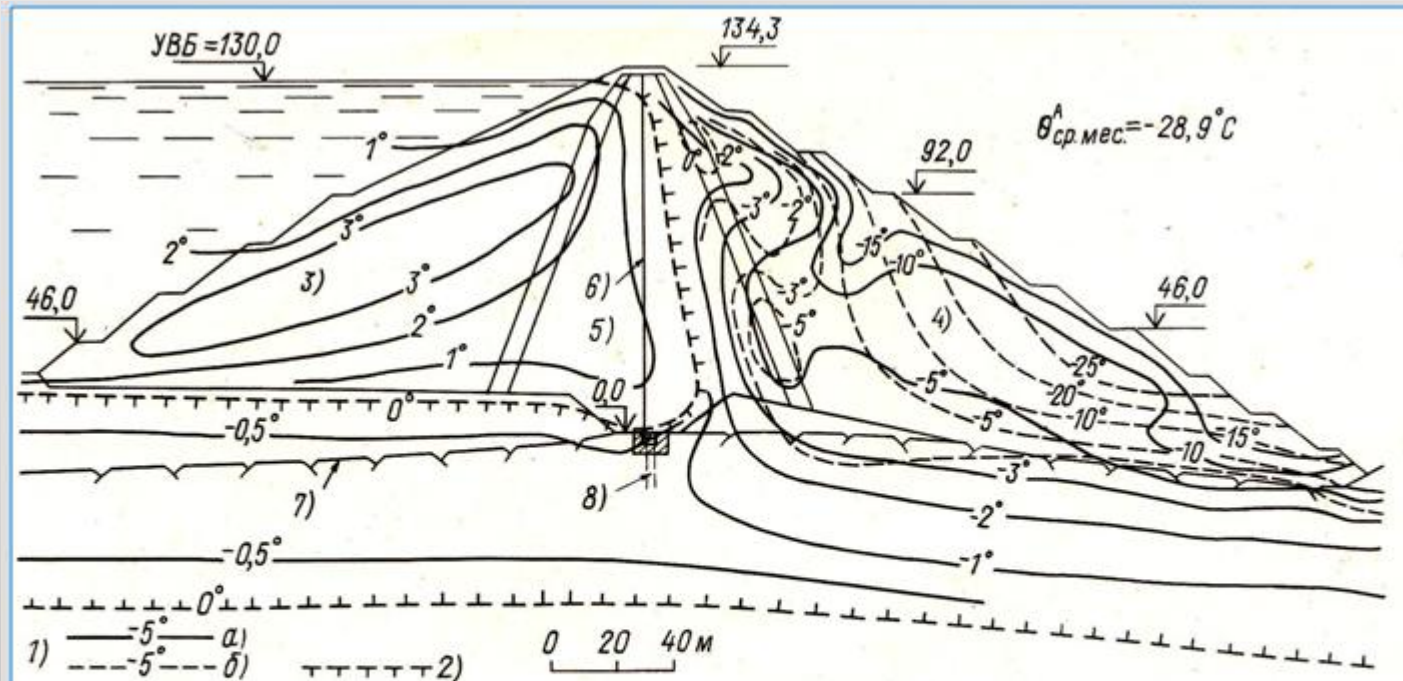
Конструкция плотины в пойменной части и ее начальное температурное состояние

Слои: 2 – щебенестые, дресвянистые грунты с супесью; 5 – галечниковый грунт; 7 – супесь иловатая; 9 – галечниковый грунт; 10 – супесь гравелистая; 12 – глинистые сланцы выветрелые; 13 – глинистые сланцы сохранные.

Зоны: II – гравийно-галечниковые упорные призмы; IV – супесчаное ядро; V – песчаные переходные зоны. А – кровля коренных пород; Б – изотермы; В – нижняя граница мерзлоты

## Каменнонабросная плотина Тельмамского гидроузла на р. Мамакан, проектные варианты

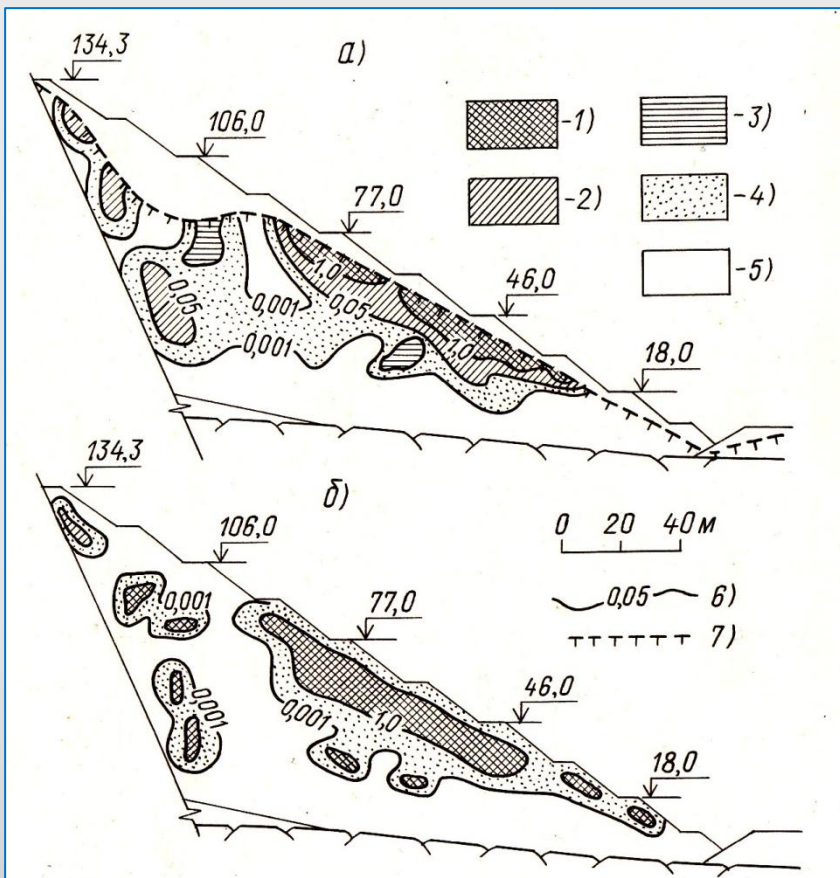
Плотина с асфальтобетонной диафрагмой в теле и цементационной завесой в основании. Основание под руслом реки талое, на поймах мерзлое. Расчетом исследован температурный режим плотины в начальный эксплуатационный период по среднемесячным значениям граничных температур и влажности воздуха с учетом и без учета ледообразования в низовой призме.



Температурный профиль Тельмамской плотины на ПК 7 + 00 в феврале 5 года:

- 1) изотермы: а) по данным расчетов с учетом ледообразования, б) тоже, без учета;
- 2) линия раздела между тальми и мерзлыми материалами;
- 3) и 4) верховая и низовая призмы;
- 5) зона из песчано-гравийного грунта;
- 6) асфальтобетонная диафрагма;
- 7) поверхность скального грунта;
- 8) цемзавеса.

## Распределение порового льда в низовой призме Тельмамской плотины:

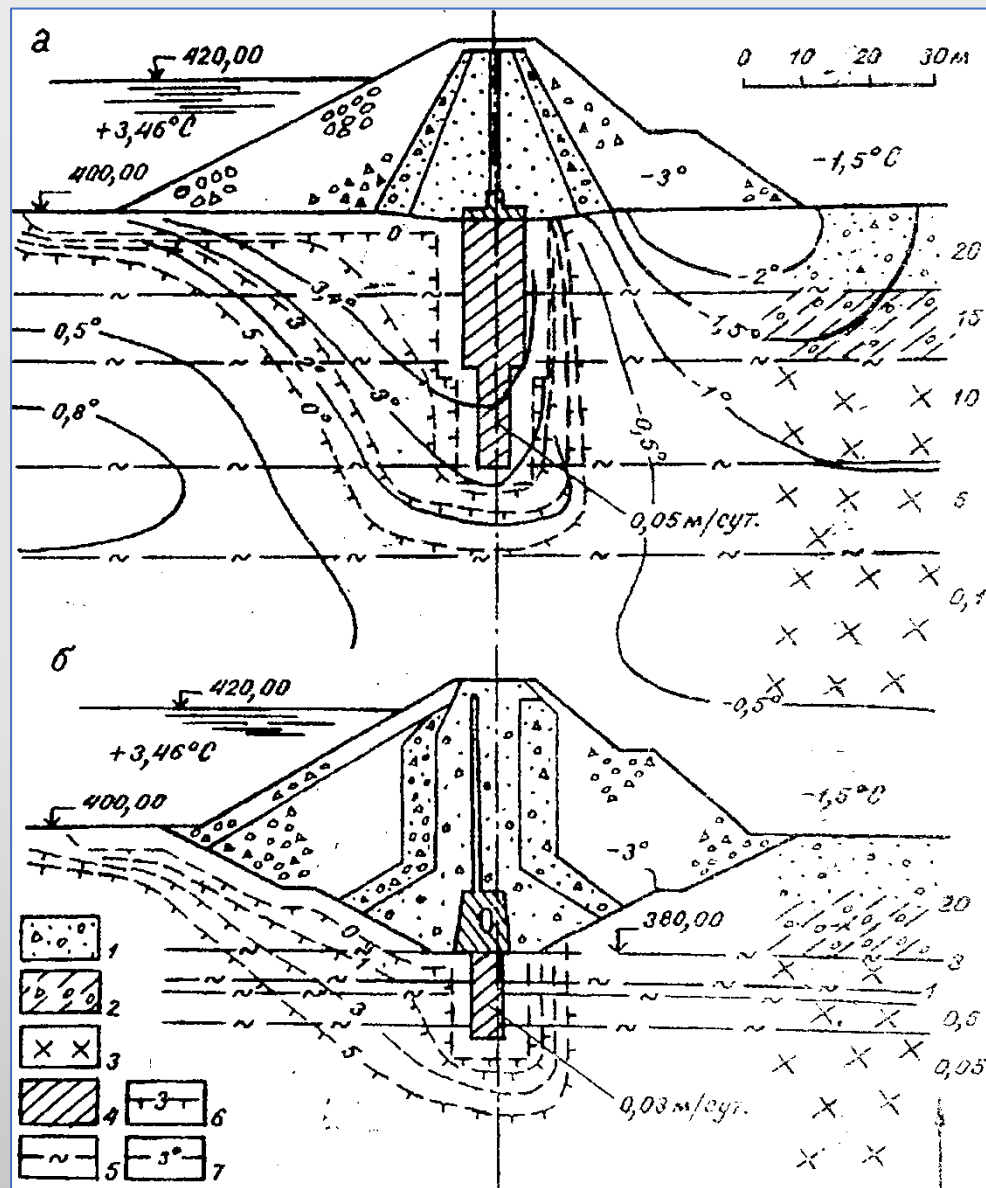


а) в июне 3 года, б) в феврале 5 года  
 1), 2), 3) и 4) – зоны наброски с содержанием льда в % от пористости соответственно 100, 5 ÷ 100, 5 ÷ 10 и > 0,1;  
 5) сухая наброска; 6) линии равной льдонасыщенности в долях ед.; 7) линия раздела между тальными и мерзлыми материалами

Расчет показал, что накопление сублимационного льда в низовой призме плотины оказывает существенное влияние на формирование ее температурного режима [Горохов, 1986].



Расчетом также исследован температурный режим изначально мерзлого основания плотины в ее пойменной части. При возникновении фильтрации вокруг завесы в варианте «а» за 5 лет возможно развитие талой зоны глубиной до 45 м с фильтрационным расходом до 45 м<sup>2</sup>/сутки. Это послужило причиной перехода в проекте к варианту «б» плотины [Битюрин, 1984].



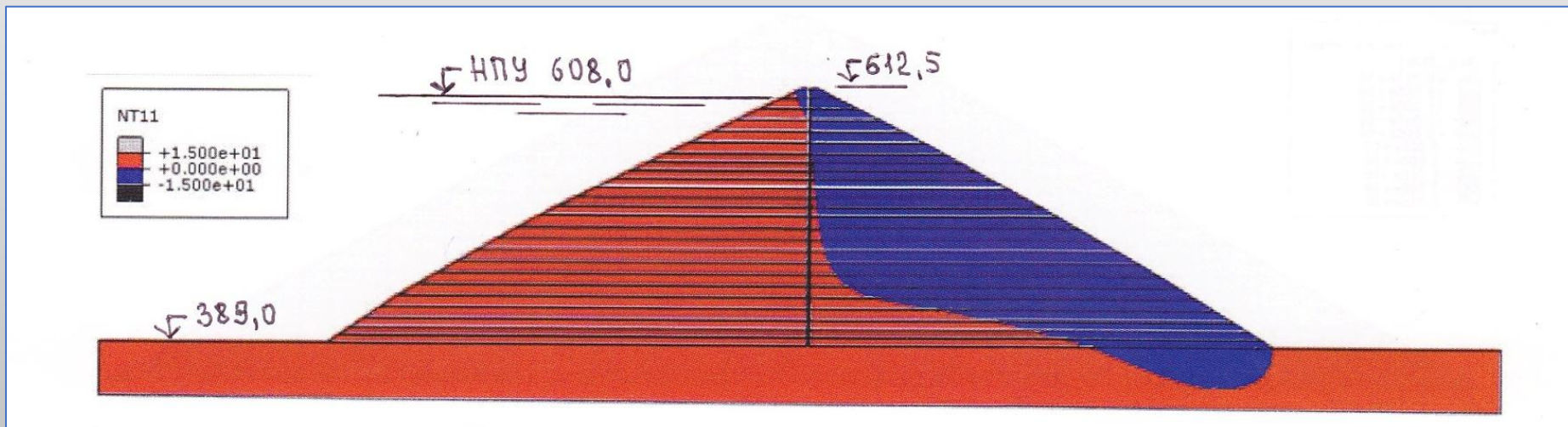
Развитие фильтрующего талика в основании пойменной части Тельмамской плотины:

1 – пески гравелистые; 2 – суглинки и супеси; 3 – граниты; 4 – цементационная завеса;  
 5 – границы слоев грунта; 6 – нулевая изотерма в различные моменты времени; 7 – изотермы температурного поля в момент времени 5 лет

## Каменнонабросная плотина проектируемого Канкунского гидроузла на р. Тимптон

Высота плотины 232,5 м, ширина по гребню 15 м, по основанию 898,5 м. Противофильтрационный преградой является асфальтобетонная диафрагма. Средняя многолетняя температура воздуха – 10,5 С, воды водохранилища ~4 С.

Прогноз температурного режима осуществлен решением нестационарной задачи теплопроводности (уравнение Фурье) методом конечных элементов с использованием программы «ABAQUS» [Вайнберг, 2015], что в случае с каменнонабросной плотиной некорректно.



Расчетное температурное поле в теле плотины через 90 лет эксплуатации (установившийся температурный режим)

# Предложение по регулированию температурного режима каменно-земляных плотин талого типа путем управления конвекцией воздуха в низовой призме

## Существо предложения:

- с целью снижения конвекции воздуха в низовой призме для уменьшения глубокого охлаждения призмы зимой низовой откос плотины покрывают слоем карьерной мелочи;
- для гарантированного поддержания переходной зоны ядра в талом состоянии в низовой призме с помощью воздухонепроницаемого экрана создают зону активной конвекции, которая включается в действие летом [Горохов, 2009].

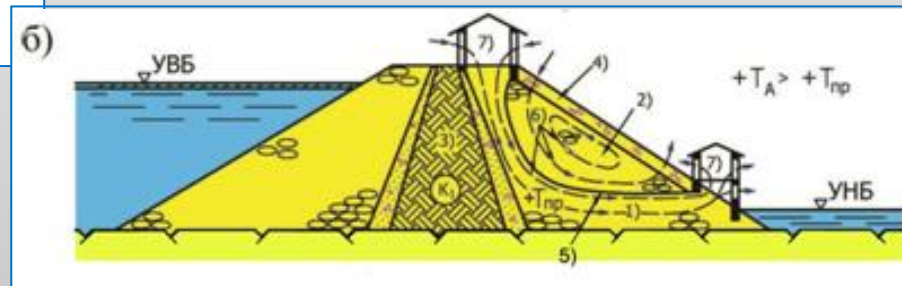
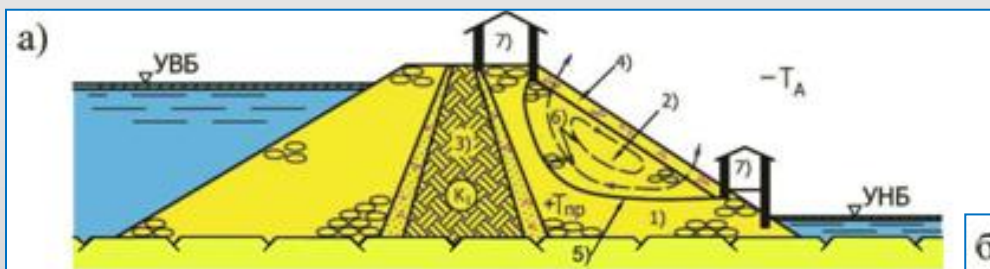


Схема регулирования температурного режима каменно-земляной плотины а) в холодный и б) в теплый период года: 1 – зона низовой призмы с сезонно развитой конвекцией; 2 – тоже, с ограниченной конвекцией; 3 – ядро из суглинка с переходными зонами; 4 – мелкий камень; 5 – воздухонепроницаемый экран; 6 – линия тока воздуха; 7 – крытые ангары

# Температурный режим ограждающих дамб хвостохранилищ

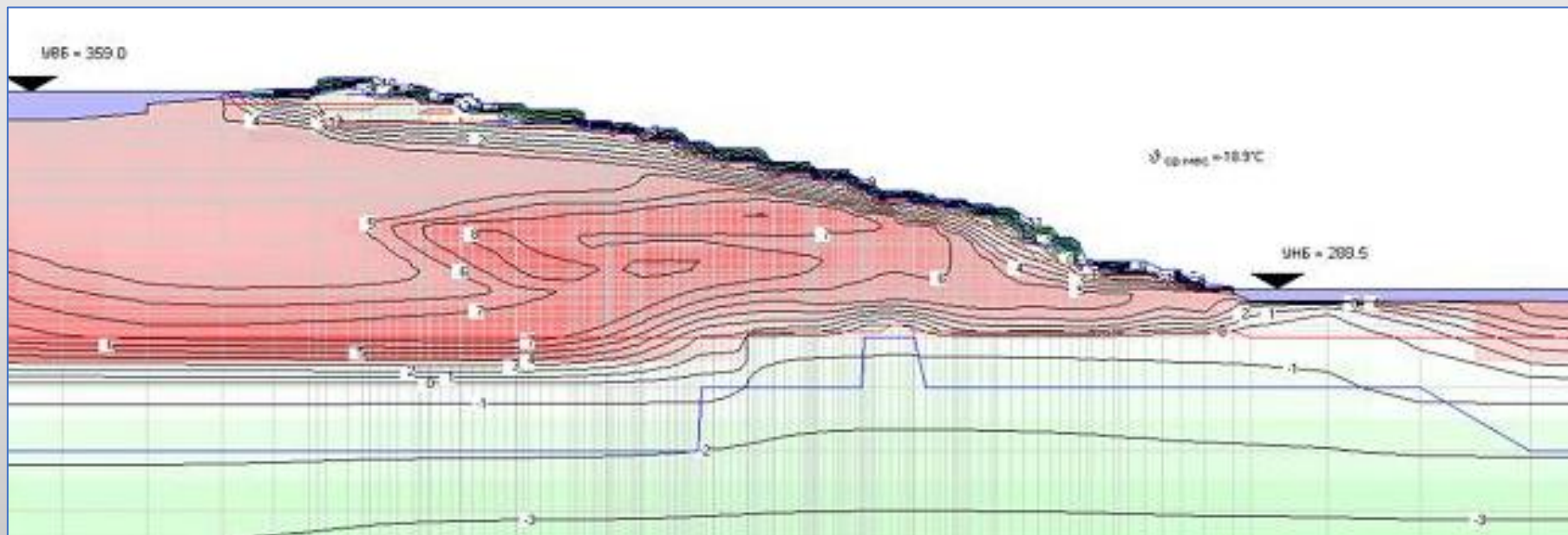
## Мирнинский ГОК: ограждающая дамба хвостохранилища фабрики №3

Грунтовая ограждающая дамба хвостохранилища обогатительной фабрики № 3 Мирнинского ГОК у г. Мирного в Якутии построена по талому типу в конце 1960-х гг.



Ограждающая дамба хвостохранилища обогатительной фабрики № 3 Мирнинского ГОК (вид с нижнего бьефа). 2005 г.

В 2005 г. выполнены расчеты фильтрационно-температурного режима ограждающей дамбы хвостохранилища обогатительной фабрики № 3 – поверочные на 2000 – 2004 гг. и прогнозные на проектный период эксплуатации 2005 – 2010 гг. и далее до 2020 г. Прогнозируется удовлетворительная работа дамбы в талом состоянии до конца эксплуатации [Долгих, 2007].



Температурное поле в поперечном сечении ограждающей дамбы обогатительной фабрики № 3 Мирнинского ГОК в марте 2010 г. по данным расчетов

## Нюрбинский ГОК: ограждающая дамба хвостохранилища фабрики №16

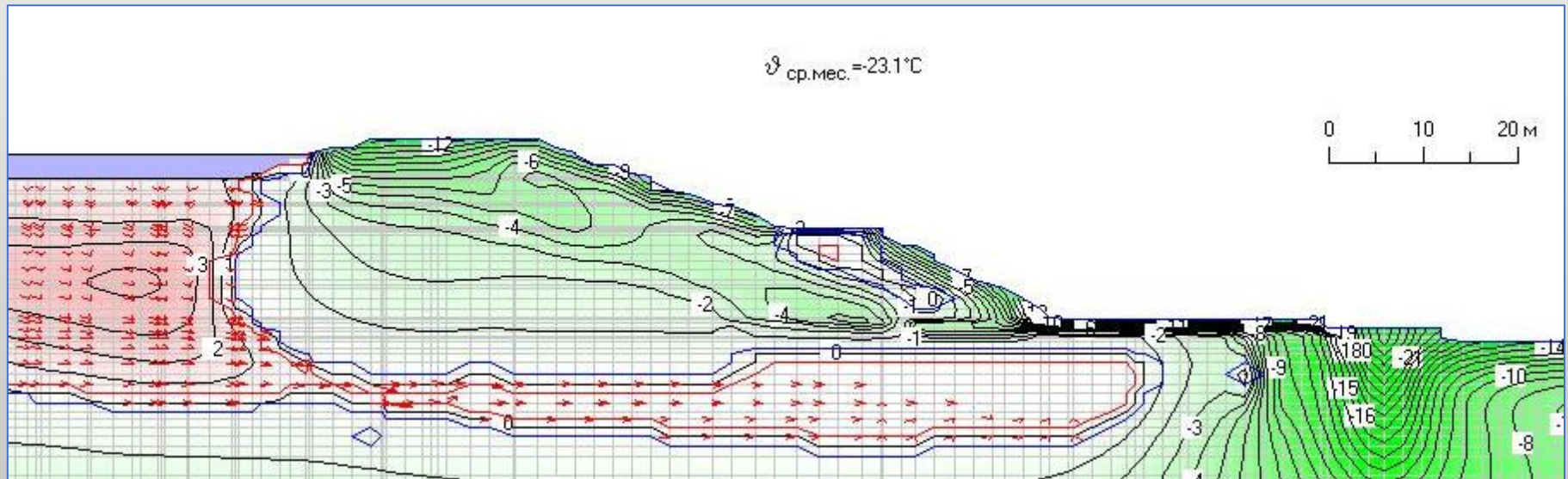
Хвостохранилище обогатительной фабрики № 16 Нюрбинского ГОК построено в 1990-х гг. с ограждающей грунтовой дамбой 1-й очереди, возведенной по талому варианту.



Ограждающая дамба 1-й очереди хвостохранилища обогатительной фабрики № 16 Нюрбинского ГОК. Общий вид со стороны нижнего бьефа. 2005 г.

В 2005 г. выполнены расчеты фильтрационно-температурного режима ограждающей дамбы хвостохранилища обогатительной фабрики № 16 на период 2004 – 2018 гг.

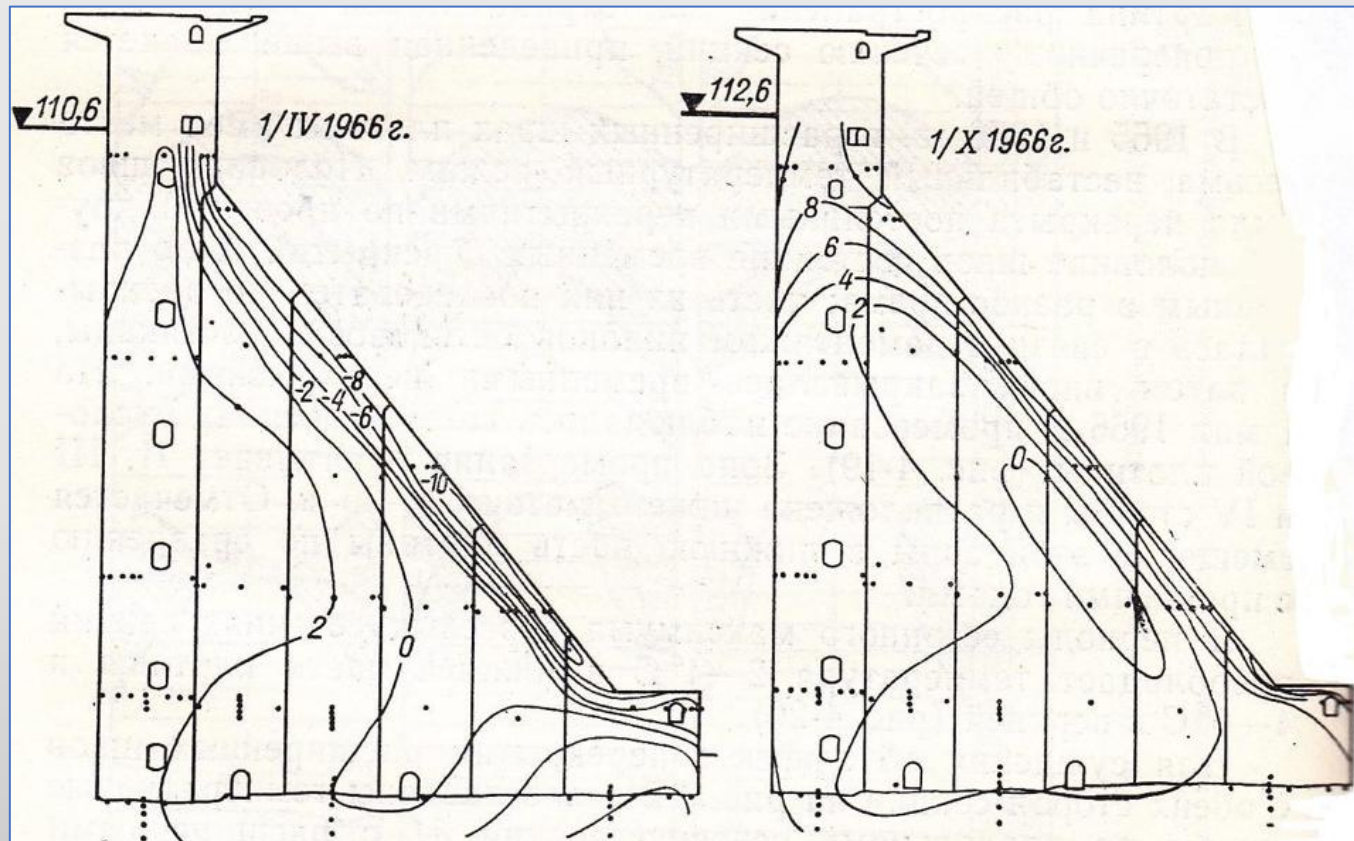
Выявлена опасность промерзания трубчатого дренажа и далее всего основного тела дамбы и ее основания. Предложен и обоснован расчетами способ регулирования температурного режима дамбы путем устройства теплоизоляции и снижения эффективности работы СОУ с целью недопущения промерзания дренажа для эксплуатации дамбы как сооружения талого типа [Долгих, 2007].



Температурное поле в поперечном сечении ограждающей дамбы 1-й очереди хвостохранилища обогатительной фабрики № 16. Нюрбинского ГОК в марте 2018 г. (по расчетному прогнозу с учетом регулирования)

# Температурный режим бетонных плотин

## Бетонная гравитационная плотина Братской ГЭС

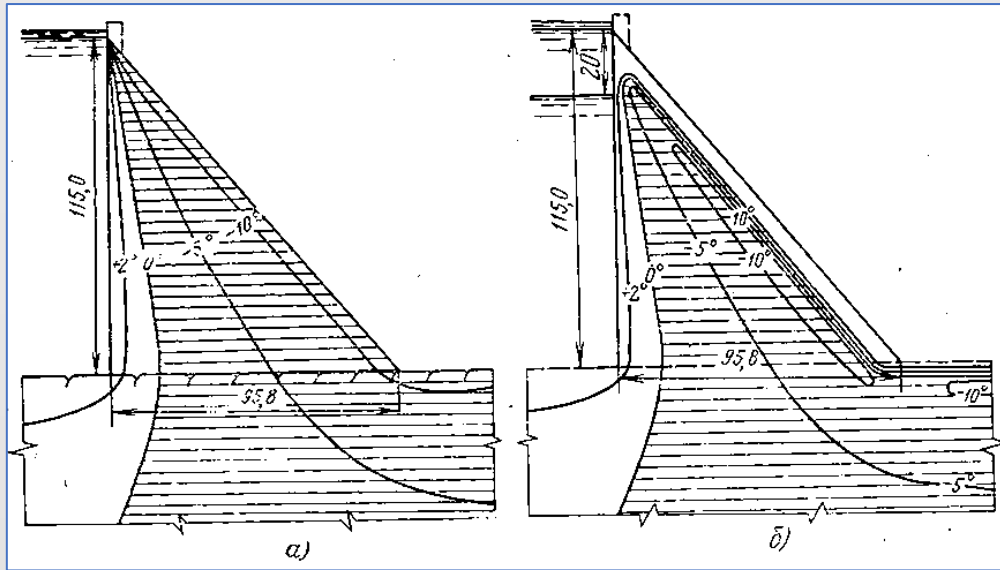


Изотермы в осевом сечении секции 65 по натурным данным

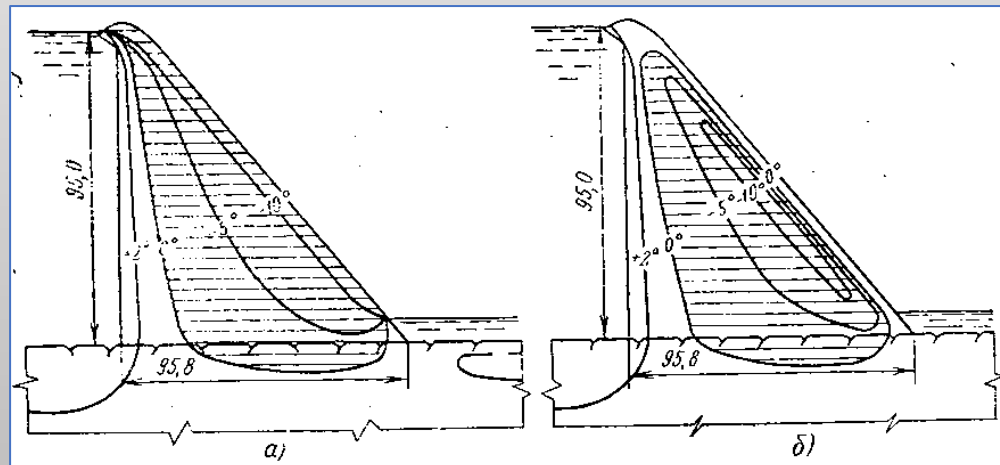
Характерной особенностью в период эксплуатации считают промерзание тела плотины, обусловленное распространением отрицательной температуры со стороны низовой грани [Плят, 1974].



# Проектный вариант бетонной гравитационной плотины Колымской ГЭС



Квазистационарное температурное поле глухой секции бетонной плотины: а – на 15/I; б – на 15/VII



Среднегодовая температура воздуха в районе плотины  $-12^{\circ}\text{C}$ .

Задача теплопроводности для бетонной плотины формировалась как краевая задача для уравнения Фурье.

В эксплуатационный период  $\frac{3}{4}$  ширины профиля плотины со стороны низовой грани было бы заморожено. В летние месяцы бетон низовой грани стал бы оттаивать на глубину 2 – 3 м [Плят, 1974].

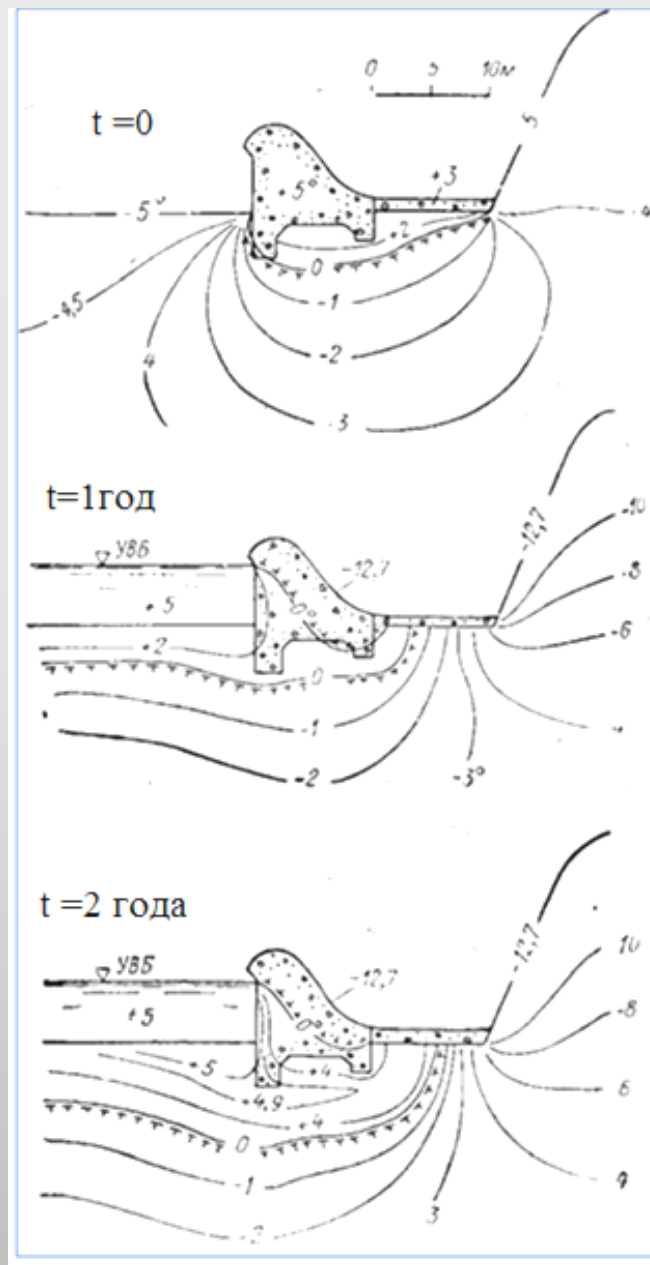
Квазистационарное температурное поле водосливной секции бетонной плотины: а – на 15/I; б – на 15/VII

# Бетонная водосливная плотина на фильтрующем основании

Плотина основана на мерзлом скальном грунте, который в оттаявшем состоянии может сильно фильтровать.

Расчет температурно-фильтрационного режима проводился для начального температурного состояния, которое образовалось к концу строительства ( $t = 0$ ) в результате прогрева скалы перед бетонированием и укладки теплого бетона.

Выяснилось, что обогрев скалы перед бетонированием привел к быстрому протаиванию основания плотины и возникновению фильтрации [Февралев, 1979].

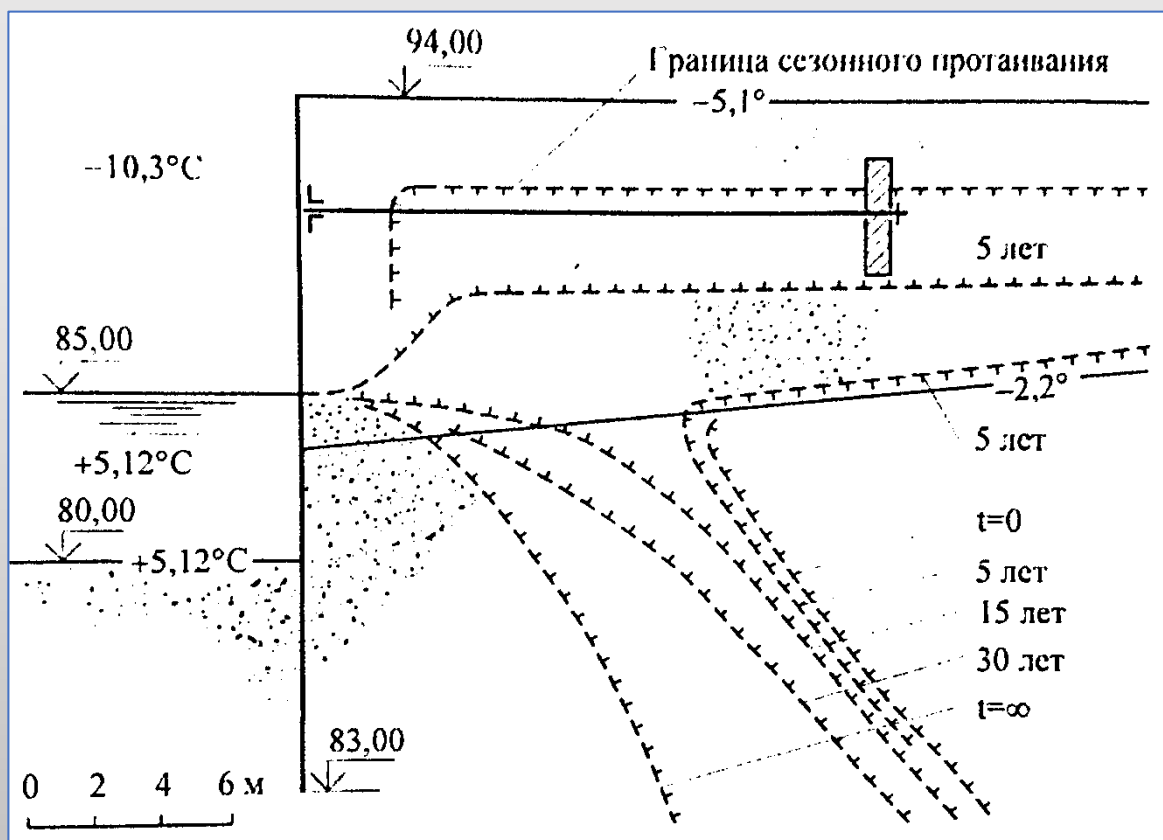


Температурные разрезы водосливной плотины и основания

# Температурный режим портовых гидротехнических сооружений

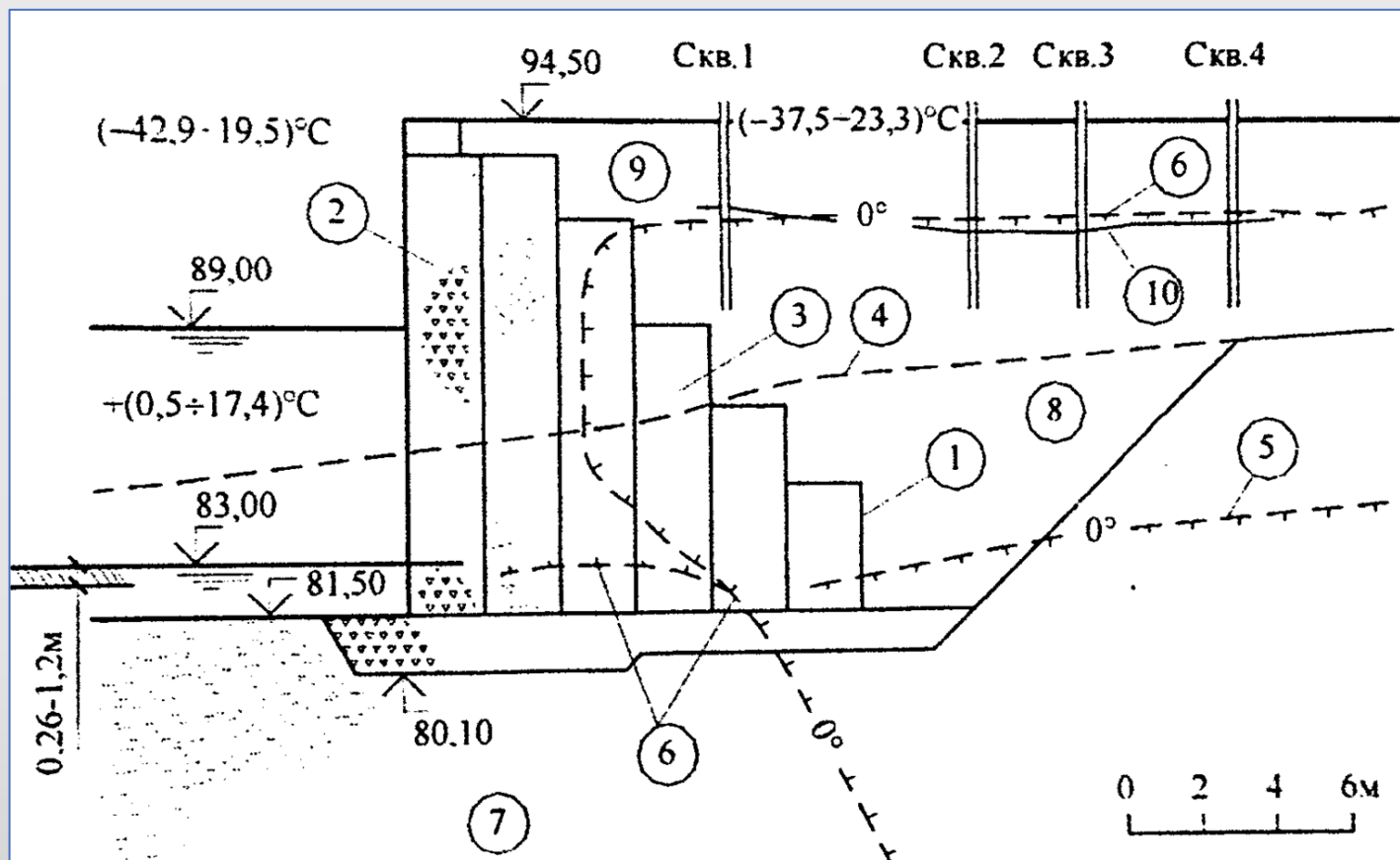
## Шпунтовый причал порта Якутск на р. Лене

В условиях отрицательной среднегодовой температуры воздуха и сплошной вечной мерзлоты грунтовая засыпка за причальными стенами со временем промерзает. Это улучшает статическую работу причальных набережных.

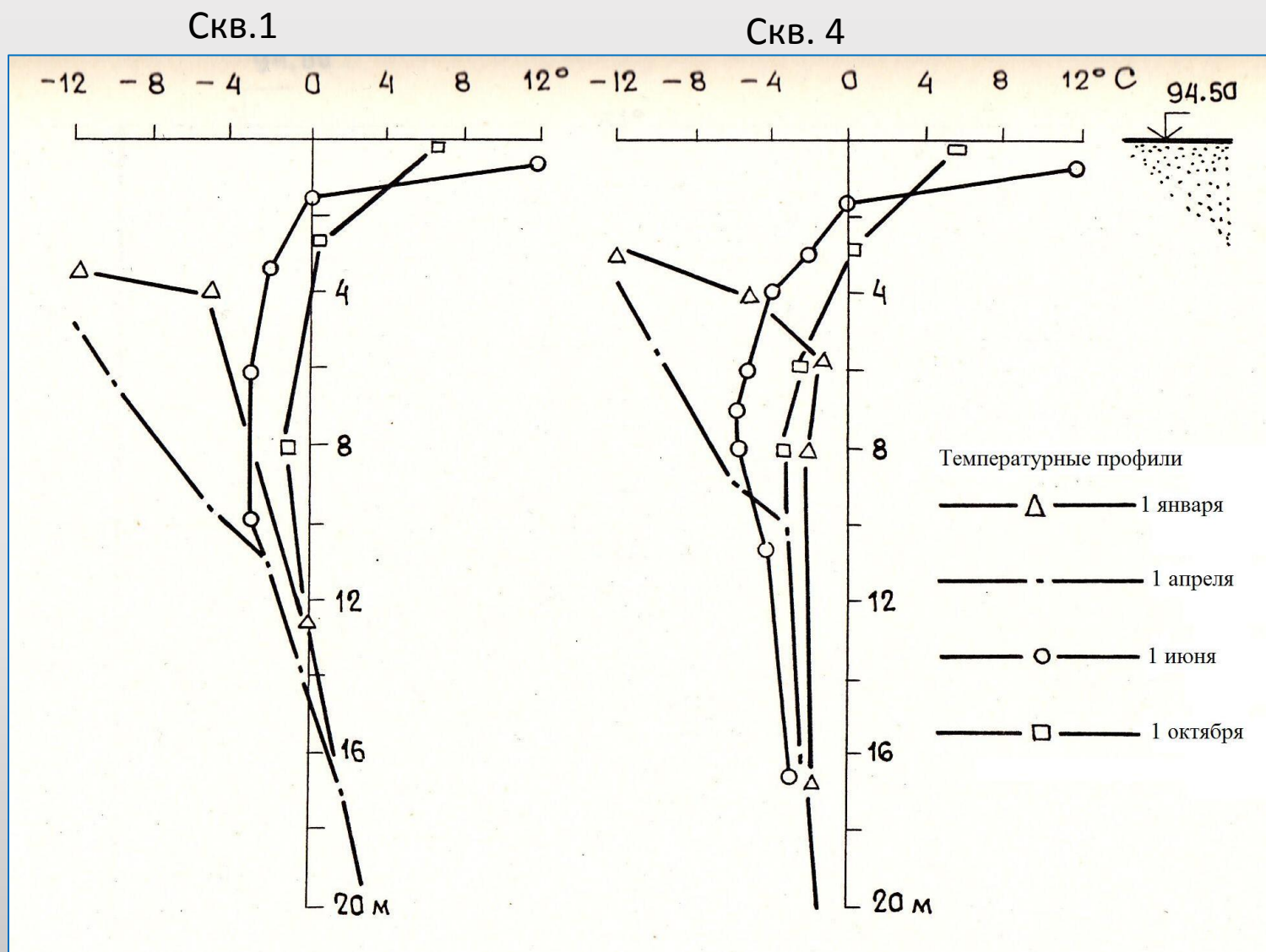


Среднегодовые температурные процессы в засыпке и основании шпунтового причала по расчету [Соболь, 1989]

## Ряжевый причал порта Якутск на р. Лене



Предельное температурное состояние ряжевого причала: 1 – контур ряжевой стенки; 2 – загрузка ряжа камнем; 3 – загрузка ряжа песком; 4 – естественная поверхность земли; 5 – верхняя граница мерзлоты по наблюдениям в 1962 г.; 6 – граница мерзлоты в предельном (квазистационарном) состоянии по расчету; 7 – постоянно талая зона; 8 – постоянно мерзлая зона; 9 – зона переменного (сезонного) замерзания-оттаивания; 10 – верхняя граница мерзлоты по наблюдениям в скважинах № 1 – 4 в 1978 г.; показаны максимальные и минимальные среднемесячные уровни воды, температуры воздуха, воды, поверхности засыпки и толщина льда [Соболь, 1989]



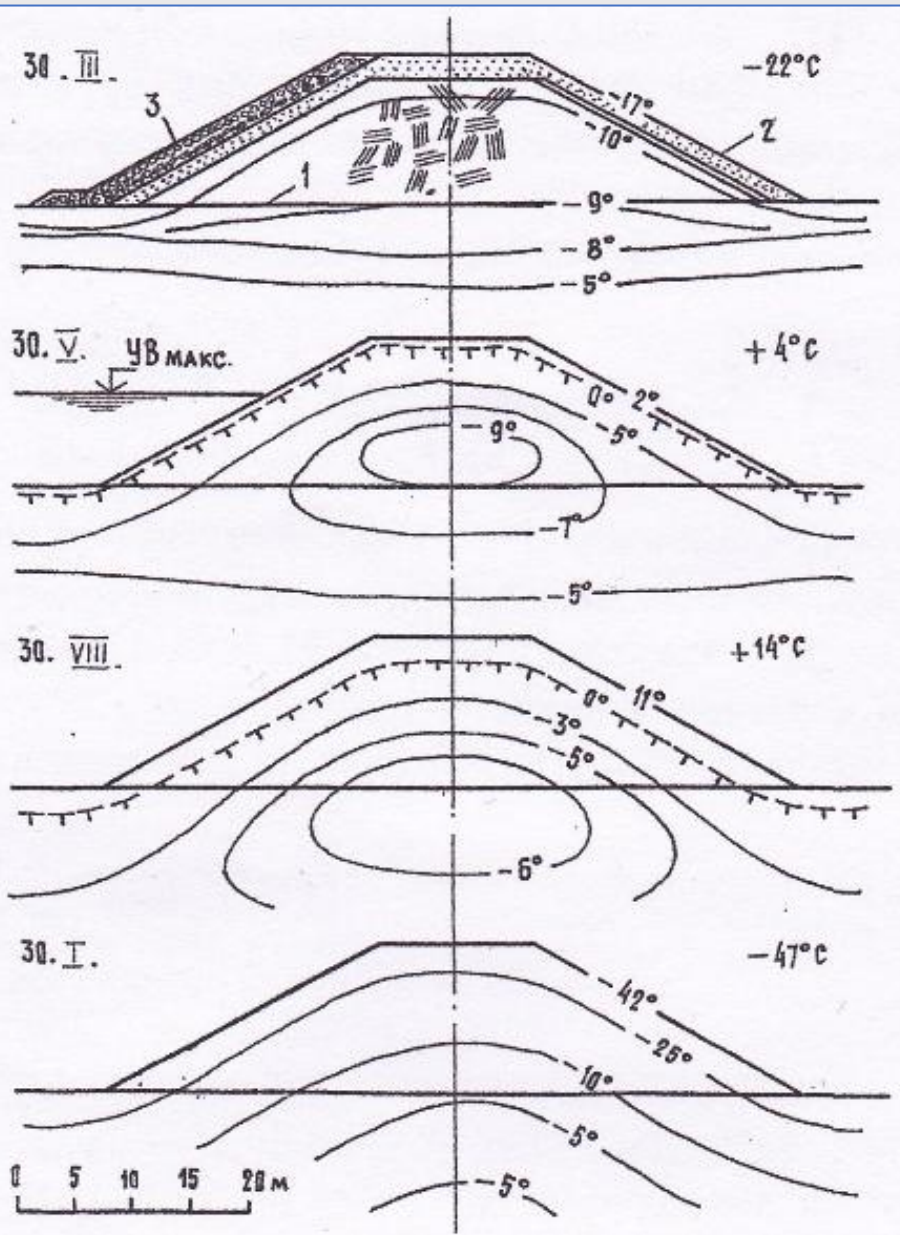
Внутригодовые температурные процессы в засыпке ряжевого причала, находящегося в предельном температурном состоянии (по расчету)

# Грунтовая защитная дамба в Городской протоке р. Лены у г. Якутска

Представлен проектный вариант дамбы мерзлого типа. В меженные периоды уровни воды ниже подошвы дамбы. Среднегодовая температура воздуха  $-11,4^{\circ}\text{C}$ . Основание дамбы сложено вечномёрзлым грунтом. Высота дамбы до 14 м. Дамба намораживается в течении 120 зимних суток при температуре воздуха  $-(15-47)^{\circ}\text{C}$ . В момент окончания возведения тело дамбы имеет температуру около  $-10^{\circ}\text{C}$ , ее температурное состояние близко к квазистационарному для климатических условий района строительства.

Профиль дамбы:

1 – подошва дамбы; 2 – теплоизолирующий слой песчано-гравийного грунта на откосах и гребне; 3 – крепление напорного откоса камнем; 30.III. – дата окончания строительства дамбы; показано расчетное температурное поле в теле и основании дамбы в момент окончания ее возведения (30.III) и далее в 1-й год эксплуатации



# **7. Наблюдения и расчеты температурного режима и переформирования ложа и берегов водохранилищ**

# Водохранилища в криолитозоне России

## Показатели водохранилищ

### Водохранилище

– это искусственный водоем, образованный водоподпорным сооружением на водотоке с целью хранения воды и регулирования стока [ГОСТ 19179 -73].

Емкость, в которой аккумулируется вода, это **чаша водохранилища**. Водохранилище имеет **ложе(дно), основание и берега**.

Для водохранилища характерны **уровни воды**: нормальный подпорный (НПУ); уровень мертвого объема (УМО), форсированный подпорный (ФПУ). В зависимости от уровня воды различают **зоны затопления**: постоянного (при УМО); долговременного (между НПУ и УМО); кратковременного (между ФПУ и НПУ).

Важными характеристиками водохранилища являются его **морфометрические параметры**, показываемые при НПУ:

длина – расстояние от плотины до места выклинивания подпора по основной реке;  
ширина максимальная и средняя;  
длина (протяженность) береговой линии по урезу воды суммарно на правом и левом берегах;  
глубина максимальная и средняя;  
площадь водного зеркала,  
а также объемы – полезный (между НПУ и УМО), мертвый (находящийся ниже УМО) и полный, который суммарно составляют полезный и мертвый объемы.

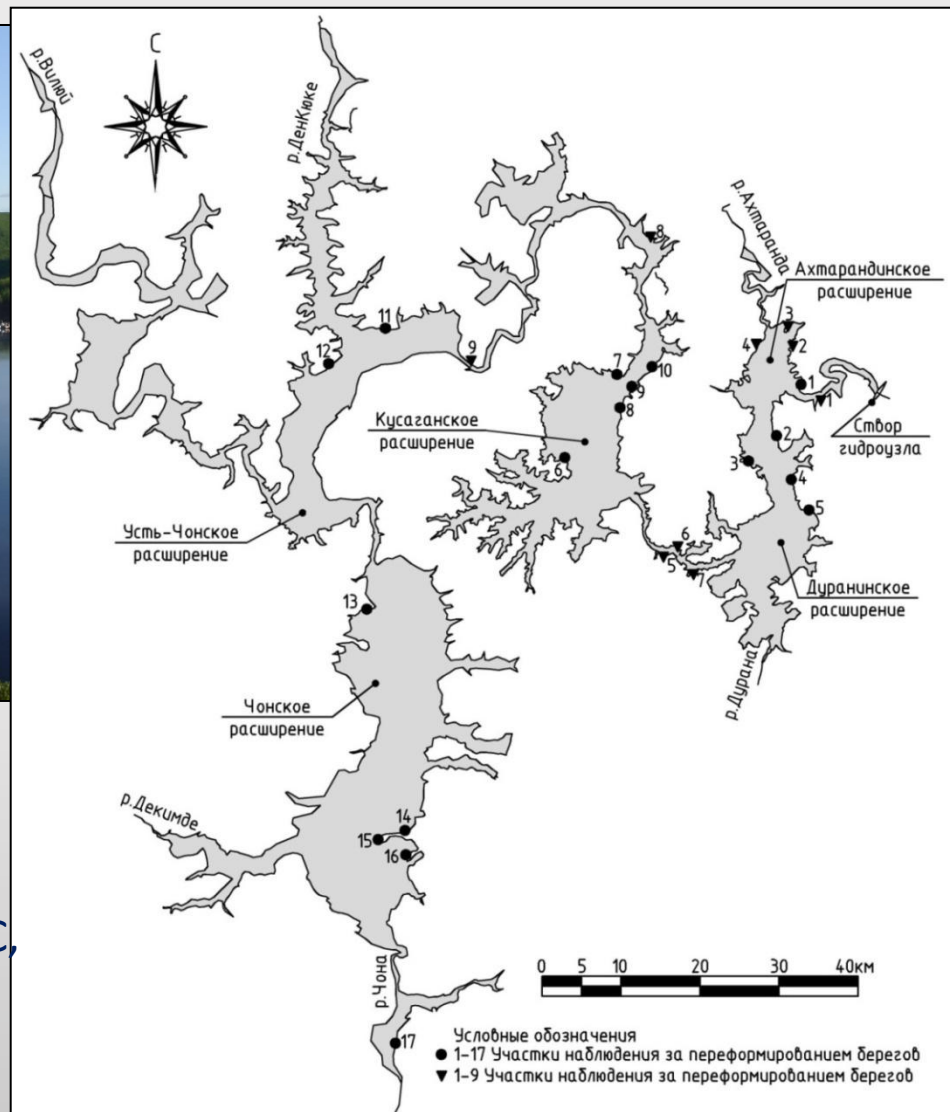


## Водохранилища ГЭС в области вечной мерзлоты

Водохранилище	Река	Среднего- довая температура воздуха, °С	Мощ- ность вечной мерзлоты, м	НПУ, мБС	Площадь зеркала, км <sup>2</sup>	Полный объем, км <sup>3</sup>	Год начала эксплуатации
Вилуйское	Вилуй	– 8,2	500	244,0	2170	35,88	1967
Усть-Хантайское	Хантайка	– 9,3	15 – 60	60,0	2120	23,520	1970
Курейское	Курейка	– 7,0	прерыви- стая	95,0	558,1	9,962	1980
Колымское	Колыма	– 12	300	450,0	440,7	14,397	1981
Усть- Среднеканское	Колыма	– 12	до 300	290,0	265,4	5,4	Строится
Эвенкийское	Нижняя Тунгуска	–	50 – 300	200,0	9400	409,4	Проект
Амгуэмское	Амгуэма	– 7,6	–	140,0	675	15,95	Проект



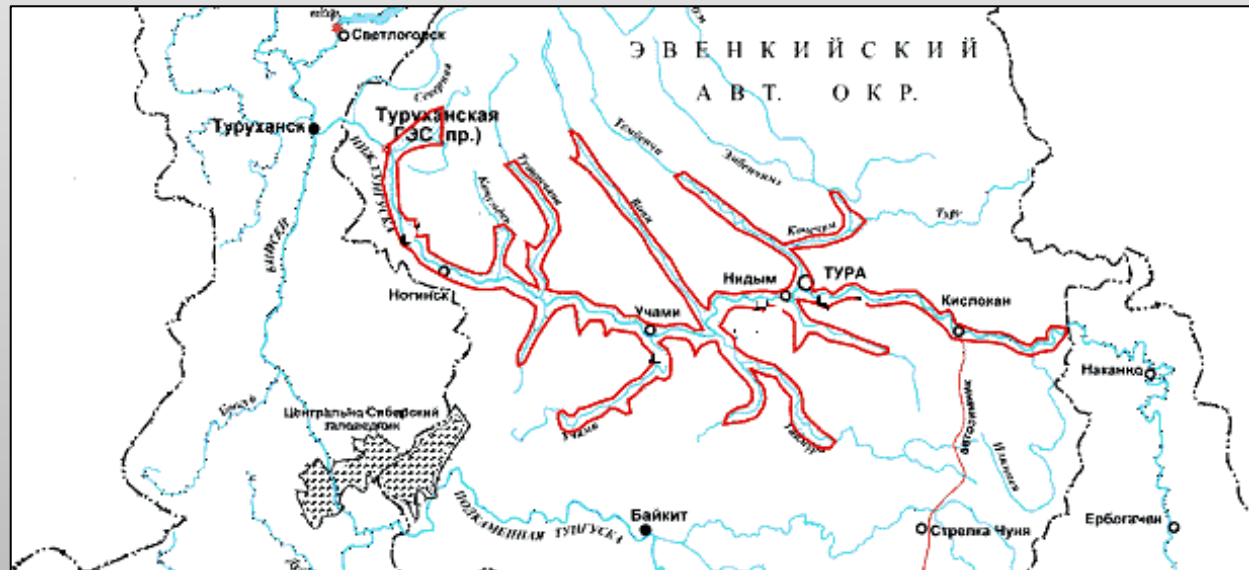
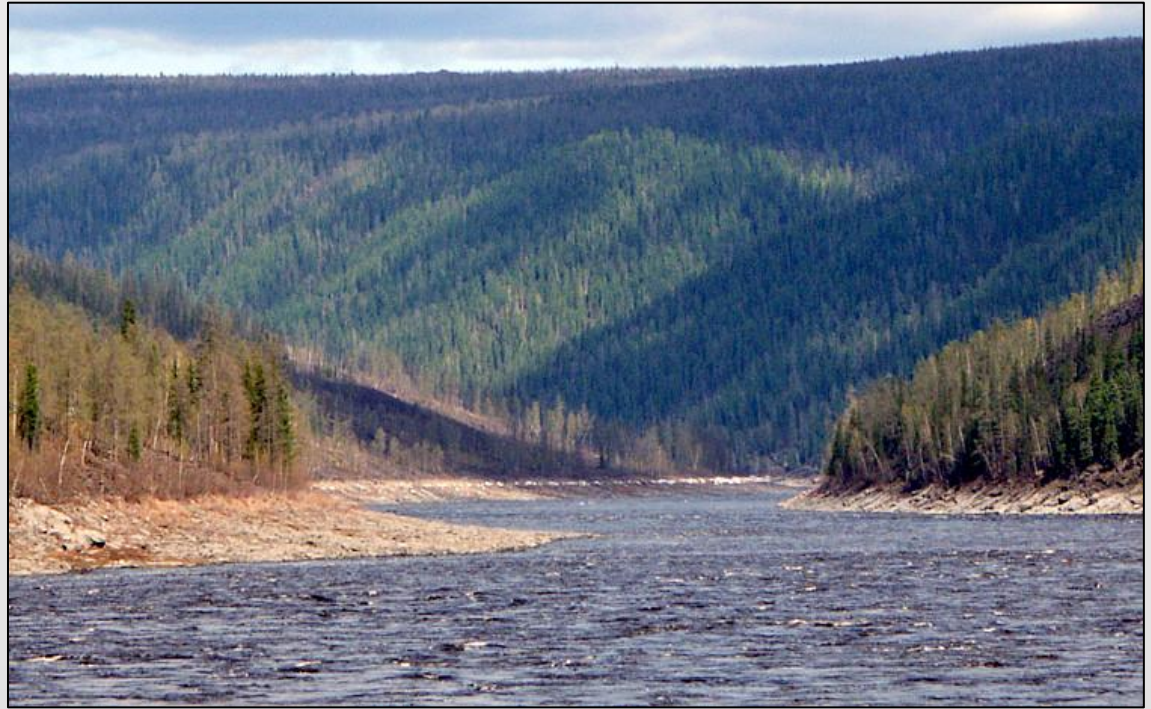
Вид с левого берега на приплотинную часть водохранилища



Мощность вечной мерзлоты в районе водохранилища 300 – 500 м; УМО=59,80 мБС, НПУ = 67,90 мБС; заполнено к 1969 г.; площадь зеркала водохранилища 2360 км<sup>2</sup>; полный объем 40,4 км<sup>3</sup>; категория водохранилища – очень большое.

Вилуйское водохранилище на р. Вилуй – первое водохранилище энергетического назначения в области сплошной вечной мерзлоты

Не исключена возможность в обозримом будущем создания Эвенкийского водохранилища на р. Нижняя Тунгуска (правом притоке р. Енисея) площадью зеркала 9400 км<sup>2</sup> и полным объемом 409,4 км<sup>3</sup> для ГЭС мощностью до 12 тыс. МВт



Створ гидроузла и план Эвенкийского (Туруханского) водохранилища на р. Нижняя Тунгуска

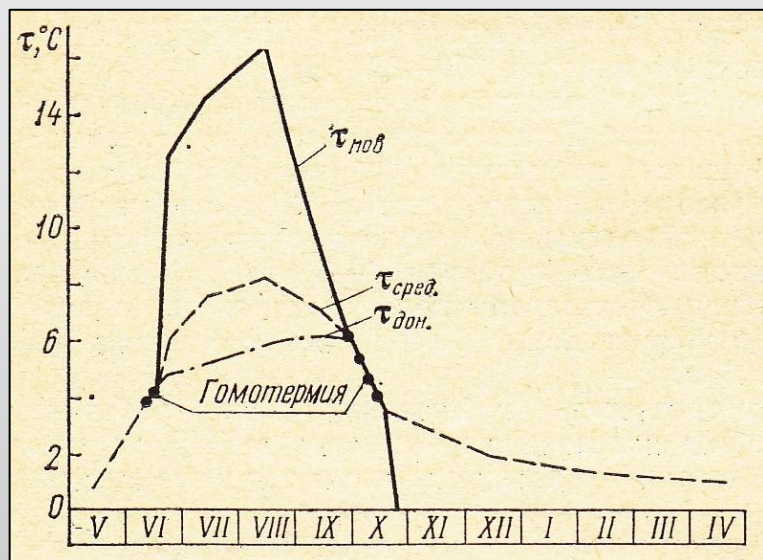
Небольшие реки криолитозоны зимой перемерзают, а летом имеют незначительный сток, поэтому на них построено много малых водохранилищ для водоснабжения населения, промышленности, сельского хозяйства.



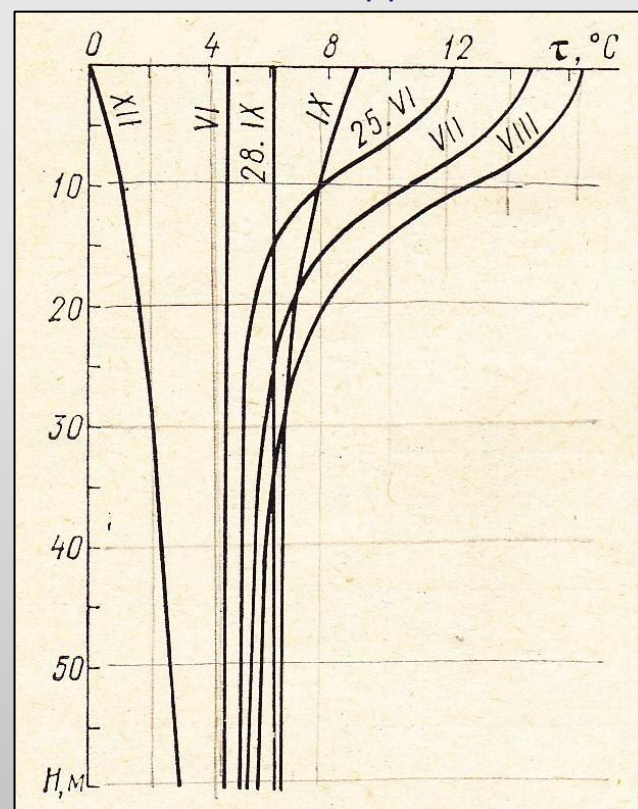
Долина р. Казачки с Анадырским водохранилищем у г. Анадыря на Чукотке: среднегодовая температура воздуха – 7,7 °С; мощность вечной мерзлоты до 90 – 150 м; водохранилище было впервые заполнено до НПУ =7,8 м БС в 1960 г., после постройки новой плотины в 1986 г. НПУ повышен до отметки 13,75 м БС; по проектному плану 1986 г. площадь зеркала водохранилища 1,49 км<sup>2</sup>, полный объем 6,19 млн м<sup>3</sup>; назначение водохранилища – водоснабжение Анадырской ТЭЦ и г. Анадыря; категория – малое

# Температура воды

Типичный термический режим водохранилищ криолитозоны можно проследить на примере Адычанского водохранилища глубиной до 60 м, проектировавшегося на правом притоке р. Яны – реке Адыче – у Полярного Круга в районе сплошной вечной мерзлоты мощностью 100 – 300 м. Температура воды в придонном слое в течение года колеблется в диапазоне 2 – 6°C, в поверхностном слое летом достигает 16°C [Балагуров, 1989].







Годовой ход температуры воды  
в Адычанском водохранилище



Расчетные эпюры распределения температур воды  
по глубине на приплотинном участке Адычанского  
водохранилища

# Тепловые и механические процессы в основании и берегах

## В период эксплуатации водохранилища в криолитозоне:

-  изменяется температурный режим грунтов долины реки, вместившей водохранилище – идет растепление грунтов, деградация мерзлоты;
-  происходит оседание ложа водохранилища вследствие оттаивания льдистых грунтов основания, сопровождающегося их тепловой осадкой;
-  переформируются оттаивающие нескальные мерзлые берега водохранилища;
-  накапливаются в чаше водохранилища наносы и продукты разрушения берегов.

Вследствие всего этого происходит изменение со временем морфометрических параметров водохранилища (объема и площади зеркала), могущие отразиться на его отдача по воде и электроэнергии.

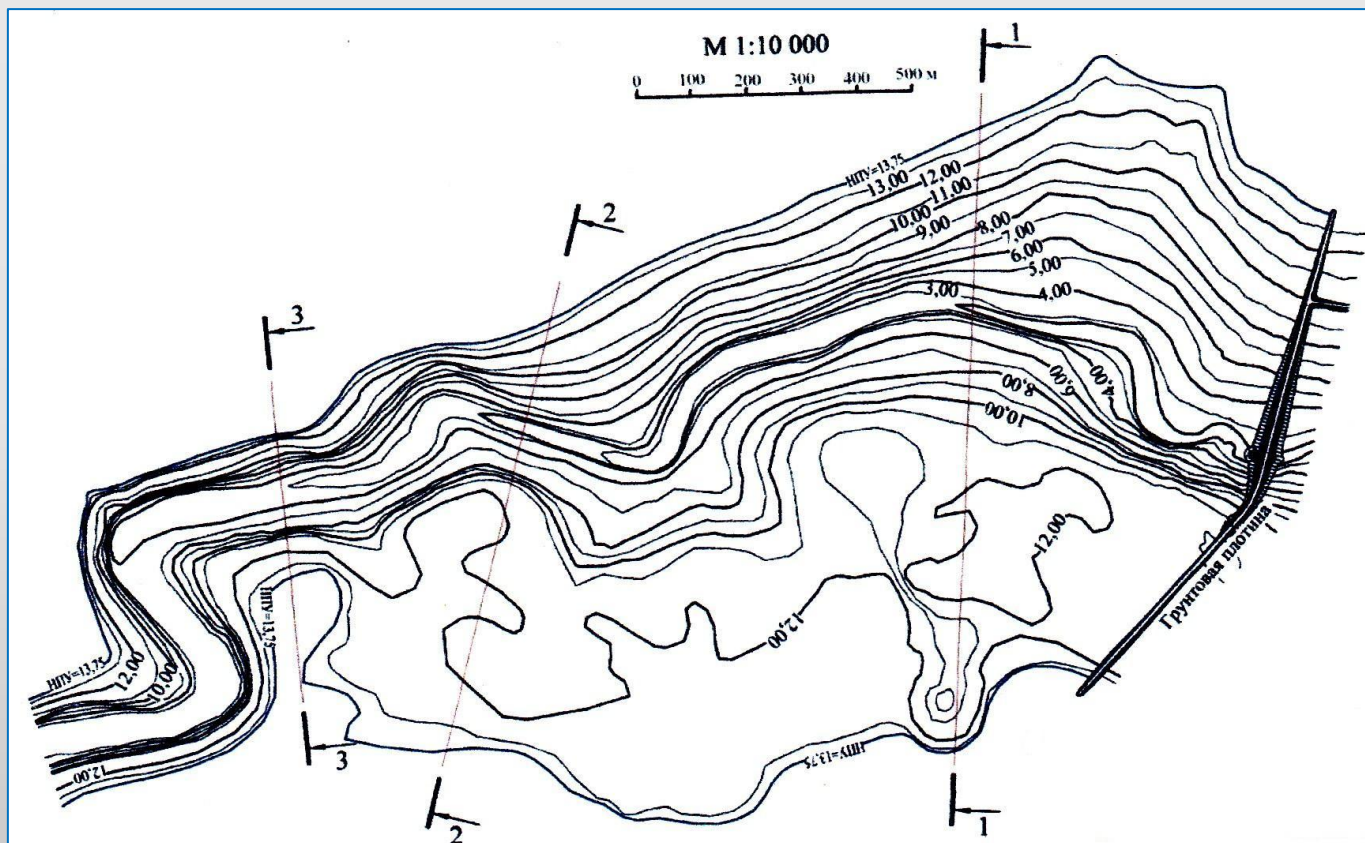
# Температурный режим основания и оседание ложа водохранилищ

## Натурные данные об оседании ложа водохранилищ

Под отепляющим воздействием воды водохранилища в дисперсных мерзлых льдистых породах его основания развивается процесс техногенного термокарста: оттаивания грунтов с оседанием ложа.

**Усть - Хантайское водохранилище.** Размещено в зоне прерывистого распространения вечномерзлых пород мощностью от 15 до 60 м. Слой покровных отложений толщиной 2,1 – 8 м имел льдистость более 0,4 и просадочность при оттаивании более 0,5. Эксплуатация водохранилища началась в 1970 г. В 1990 г. на эталонном участке площадью 350 км<sup>2</sup> выполнены эхолотные промеры глубин. Зафиксировано уменьшение отметок ложа водохранилища относительно отметок поверхности рельефа до начала его заполнения в среднем на 3 м. При этом процесс оттаивания и оседания вечномерзлых рыхлых высокольдистых грунтов четвертичного периода в основании водохранилища практически завершился к 1983 г. [Оникиенко, 1995].

**Анадырское водохранилище.** Долина р. Казачки, в которой образовано водохранилище, занята сплошной вечной мерзлотой мощностью до 90 – 150 м. Коренные породы перекрыты четвертичными отложениями слоем 8 – 10 м с льдистостью до 70 % объема.

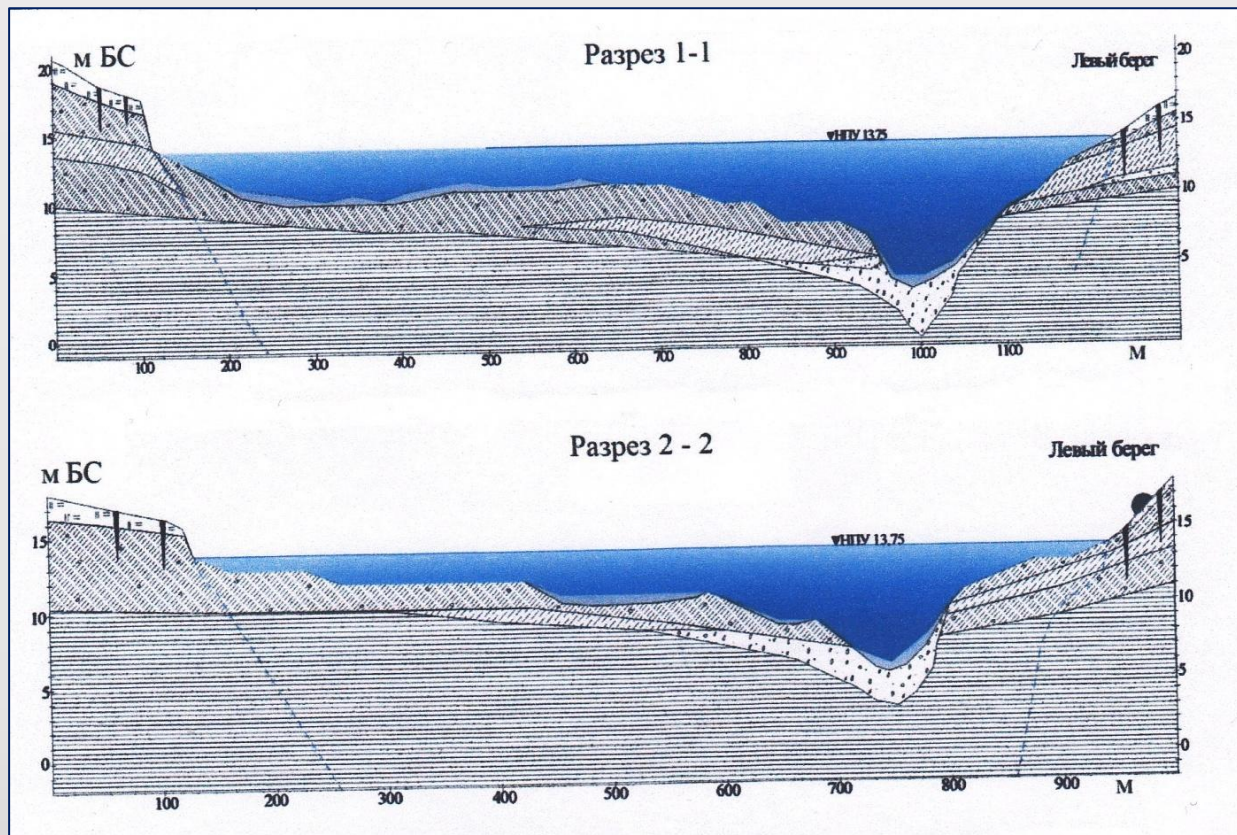


Топографический план ложа Анадырского водохранилища по проекту 1960 г., осуществленному в 1986 г.













В 2008 г. ВНИИГом им. Б. Е. Веденеева было проведено эхолотное профилирование дна водохранилища. **Тепловая осадка дна составила:**

- на этапе 1960 – 1986 гг. в пределах первоначального НПУ=7,8 м БС 0,4 – 0,75 м;
- на этапе 1986 – 2008 гг. в пределах современного НПУ=13,75 м БС 0,38 – 1,07 м.



#### Условные обозначения к разрезам

- |   |  |   |  |
|---|--|---|--|
|    | – Торф бурый, с включениями щебня, дресвы, с линзами суглинка, супеси, грунт льдистый, слоистой текстуры               |    | – Песок средний и мелкий, с включением гальки, гравия, грунт мерзлый, льдистый, в ложе водохранилища талый |
|  | – Ил, представленный торфом, суглинком, супесью, грунт талый   |   | – Полигонально жильный лед   |
|  | – Суглинок зеленоватого серый и бурый, мерзлый, льдистый, в ложе водохранилища талый                                   |  | – Суглинок и глины морские, массивной криотекстуры, грунт мелкольдистый, ложе водохранилища талый          |
|  | – Супесь зеленоватого-серая, заторфованная, с включениями гальки, мерзлая, сильно льдистая, в ложе водохранилища талая |  | – Граница ММП  |
|  | – Гравийно-галечниковый грунт с суглинистым, супесчаным и песчаным заполнителем, мерзлый, в ложе водохранилища талый   |  | – Бугры пучения  |

Геокриологические разрезы основания Анадырского водохранилища по материалам ВНИИГ 2008 г.

# Одномерная задача оттаивания грунта основания водохранилища с учетом осадки: приближенное аналитическое решение

## Математическая формулировка задачи

Полагаем, что осадка  $S$  пропорциональна глубине оттаивания  $\xi$  согласно зависимости  $\delta = S/\xi$  [Цытович, 1973]. Исследуем одномерные условия в однородном грунте.

Процесс оттаивания грунта с учетом осадки математически описывается следующим образом:

$$a_{\text{ТГ}} \cdot \frac{\partial^2 \vartheta_{\text{ТГ}}}{\partial z^2} = \frac{\partial \vartheta_{\text{ТГ}}}{\partial t}, \quad t > 0, \quad s \leq z \leq \xi; \quad (1)$$

$$a_{\text{МГ}} \cdot \frac{\partial^2 \vartheta_{\text{МГ}}}{\partial z^2} = \frac{\partial \vartheta_{\text{МГ}}}{\partial t}, \quad t > 0, \quad \xi \leq z \leq \infty; \quad (2)$$

$$s = \delta \cdot \xi, \quad \xi(0) = 0, \quad s(0) = 0; \quad (3)$$

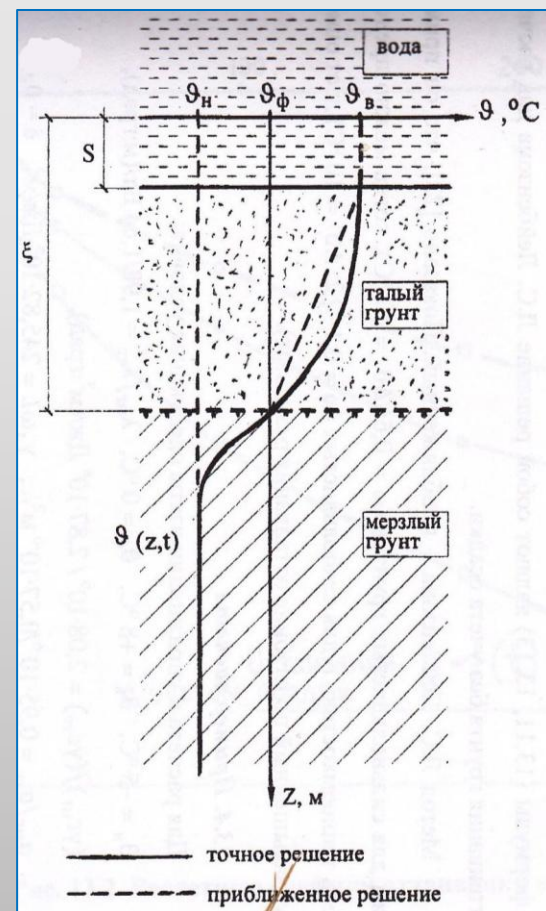
$$\vartheta_{\text{МГ}}(z, 0) = \vartheta_{\text{Н}}; \quad (4)$$

$$\vartheta_{\text{ТГ}}(s, t) = \vartheta_{\text{В}}; \quad (5)$$

$$\vartheta_{\text{ТГ}}(\xi, t) = \vartheta_{\text{МГ}}(\xi, t) = \vartheta_{\text{Ф}}; \quad (6)$$

$$\lambda_{\text{МГ}} \frac{\partial \vartheta_{\text{МГ}}(\xi, t)}{\partial z} - \lambda_{\text{ТГ}} \frac{\partial \vartheta_{\text{ТГ}}(\xi, t)}{\partial z} = \gamma_{\text{Л}} \omega L \frac{d\xi}{dt}; \quad (7)$$

$$\frac{\partial \vartheta_{\text{МГ}}(\infty, t)}{\partial z} = 0. \quad (8)$$



В системе уравнений (1 – 8) обозначено:  $\vartheta$  – температура, °C;  $z$  – координата (глубина), м;  $t$  – время, сутки, часы, с;  $a$  – коэффициент температуропроводности грунта, м<sup>2</sup>/с;  $S$  – величина тепловой осадки, м;  $\xi$  – величина оттаивания грунта, м;  $\delta = S/\xi$  – относительная осадка;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности грунта, Вт/(м·град);  $\gamma_l \omega L$  – тепло таяния льда в грунте, Дж/ м<sup>3</sup>.

### Приближенное аналитическое решение

При  $\vartheta_b = \text{const}$  методом Л.С. Лейбензона получено приближенное решение [Гоголев, 1986]. Распределение температуры в талом и мерзлом грунте принято в виде:

$$\vartheta_{\text{ТГ}}(z, t) = \vartheta_b + \frac{\vartheta_\phi - \vartheta_b}{\xi - \delta \cdot \xi} \cdot (z - \delta \cdot \xi), \quad (9)$$

$$\vartheta_{\text{МГ}}(z, t) = \vartheta_\phi + (\vartheta_n - \vartheta_\phi) \cdot \text{erf} \frac{z - \xi}{2\sqrt{a_{\text{МГ}} \cdot t}}. \quad (10)$$

Функции (9) и (10) удовлетворяют уравнениям (1), (2) и условиям (3, 4, 5, 6, 8).

Решением уравнения (7) является формула

$$\xi(t) = \beta \sqrt{t}, \quad (11)$$

в которой коэффициент  $\beta$  определяется выражением

$$\beta = \frac{\lambda_{\text{МГ}} \frac{\vartheta_n - \vartheta_\phi}{\sqrt{\pi \cdot a_{\text{МГ}}}} + \sqrt{\lambda_{\text{МГ}}^2 \frac{(\vartheta_n - \vartheta_\phi)^2}{\pi a_{\text{МГ}}} - 2\gamma_l \omega L \cdot \lambda_{\text{ТГ}} \cdot \frac{\vartheta_\phi - \vartheta_b}{1 - \delta}}}{\gamma_l \omega L}. \quad (12)$$

Метод Л.С. Лейбензона – приближенный, он применим для сильнольдистых грунтов ( $\omega=0,6$ ;  $\Delta\vartheta=10^\circ\text{C}$ ), когда можно пренебречь теплоемкостью, а для слабольдистых ( $\omega=0,1 - 0,2$ ;  $\Delta\vartheta=10^\circ\text{C}$ ) дает завышенный по глубине оттаивания результат.

## Методический пример

Для расчета взяты следующие условия:

$$\theta_{\text{н}} = -5 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad \theta_{\text{в}} = +8 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad \theta_{\text{ф}} = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad \lambda_{\text{мг}}/\lambda_{\text{тг}} = 1,98/1,64 \text{ Вт/(м}\cdot\text{град)}, \quad (\gamma c_{\text{мг}})/(\gamma c_{\text{тг}}) = 2,08 \cdot 10^6 / 2,87 \cdot 10^6 \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{град)},$$

$$a_{\text{мг}}/a_{\text{тг}} = 0,95 \cdot 10^{-6} / 0,57 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}, \quad \gamma_{\text{л}} \omega L = 245,82 \cdot 10^6 \text{ Дж/м}^3, \quad \delta = 0,48.$$

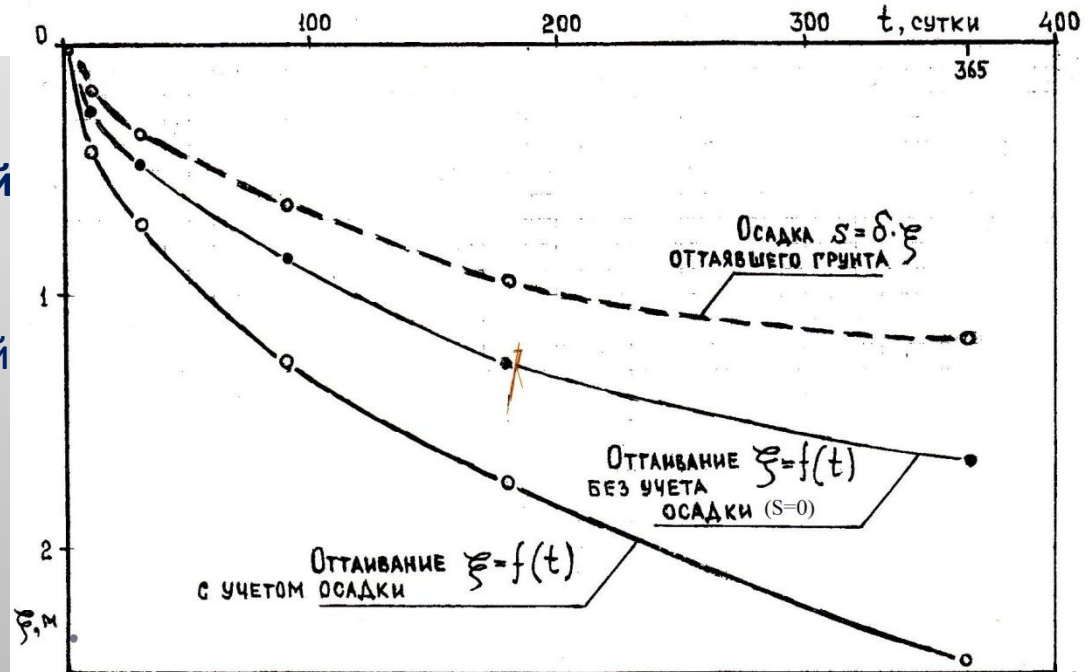
Результаты расчета  
представлены за период  
в один год

Расчетные зависимости	Оттаивание $\xi$ , м, за время $t$ , сут.				
	10	30	90	180	360
Приближенное решение (11,12) $\beta = 0,130 \text{ м} / \sqrt{\text{сут}}$	0,411 (0,197)	0,712 (0,341)	1,234 (0,592)	1,745 (0,937)	2,466 (1,183)
Приближенное решение без учета осадки, $\delta = 0$ , $\beta = 0,089 \text{ м} / \sqrt{\text{сут}}$	0,281	0,487	0,844	1,194	1,688

Примечание: в скобках – осадка  $s = \delta \cdot \xi$ , м

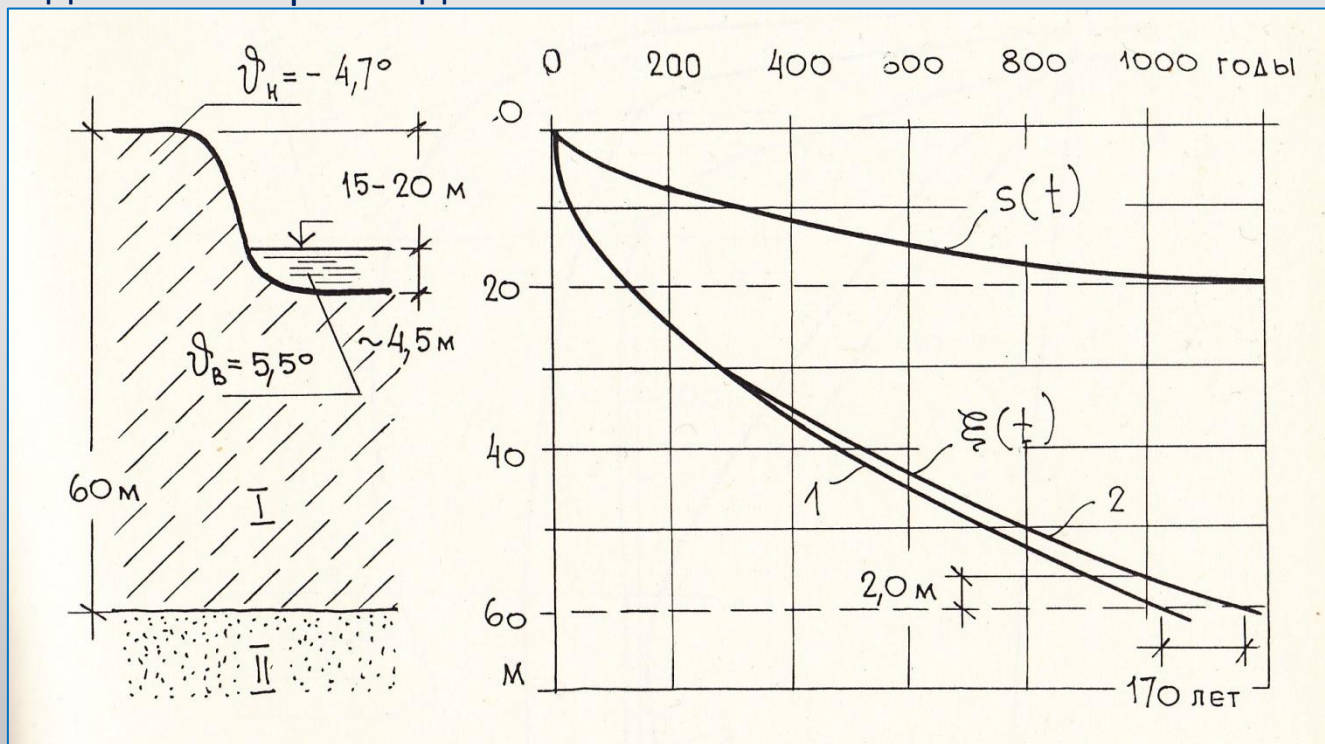
## Применение одномерных решений

Оправдано к начальному периоду эксплуатации, при этом общая оценка термокарстовых проявлений в основании водохранилища может выполняться интегрированием осадок по площадям залегания грунтов с различными свойствами.



# Оттаивание основания и оседание дна термокарстового озера Сырдах в центральной Якутии

Размеры озера в плане 1500x800 м. Температурный расчет проведен по схеме одномерной задачи. 60 – метровый слой супеси I с включениями повторно-жильных льдов ( $\omega = 0,65$ ;  $\delta = 0,32$ ) по расчету протаял за 1000 лет. При этом осадка составила 17,5 м, что соответствует глубине озерной котловины. Оттаивание нижележащих грунтов II осадкой не сопровождалось.



Оттаивание основания и оседание дна озера Сырдах: 1 – по приближенному аналитическому решению [Гоголев, 1986] ; 2 – по численному расчету [Битюрин, 1991]

# Трехмерная модель температурного режима основания водохранилища с учетом оседания ложа

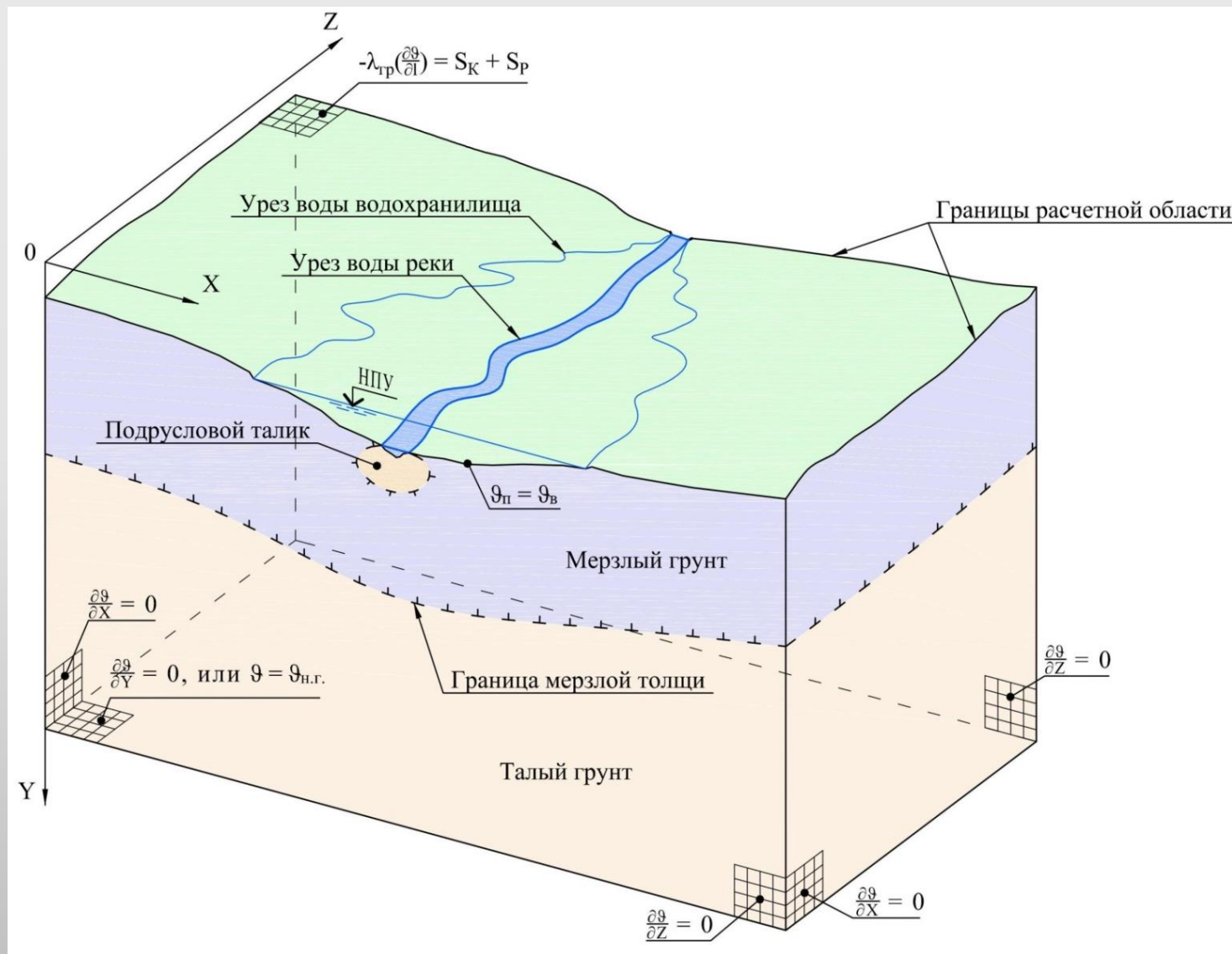


Схема расчетной области с краевыми условиями

## Система уравнений нестационарной теплопроводности

Основными факторами формирования температурного режима грунтов основания водохранилища являются **кондуктивный перенос тепла** частицами скелета грунта и фазовые **превращения поровой влаги**.

Процесс кондуктивной теплопередачи без учета фазовых превращений описывается уравнением теплопроводности Фурье:

$$C\rho_{\text{гр}} \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial X} \left( \lambda_{\text{гр}} \frac{\partial \vartheta}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left( \lambda_{\text{гр}} \frac{\partial \vartheta}{\partial Y} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left( \lambda_{\text{гр}} \frac{\partial \vartheta}{\partial Z} \right), \quad (*)$$

где  $(C\rho)_{\text{гр}}$  – объёмная теплоёмкость грунта;  $\vartheta$  – температура грунта, °С;  
 $t$  – время;  $X, Y, Z$  – декартовы координаты;  
 $\lambda_{\text{гр}}$  – коэффициент теплопроводности грунта:  $\lambda_{\text{гр}} = \lambda_{\text{т}} + R(\rho_{\text{л}} - \lambda_{\text{т}})$

Для грунтов, находящихся при температуре ниже температуры замерзания свободной воды, уравнение теплопроводности записывается в виде:

$$C\rho_{\text{гр}} \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial X} \left( \lambda_{\text{гр}} \frac{\partial \vartheta}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left( \lambda_{\text{гр}} \frac{\partial \vartheta}{\partial Y} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left( \lambda_{\text{гр}} \frac{\partial \vartheta}{\partial Z} \right) + \rho_{\text{л}} n L \frac{\partial R}{\partial t} b, \quad (**)$$

где  $\rho_{\text{л}}$  – плотность льда, кг/м<sup>3</sup>;  $n$  – пористость грунта;  
 $L$  – удельная скрытая теплота при замерзании воды или плавлении льда;  $L = 336$  кДж/кг;  
 $b$  – степень влажности (льдиности) грунта;  
 $R$  – относительная льдистость грунта как отношение массы порового льда к массе поровой воды в некотором объёме грунта.

Последний член в уравнении (\*\*) описывает выделение или поглощение тепла при фазовых превращениях поровой влаги в грунте, а входящая в него относительная льдистость  $R$  является функцией температуры: при  $\vartheta > \vartheta_{\text{ф}}$   $R = 0$ ; при  $\vartheta = \vartheta_{\text{ф}}$   $0 \leq R \leq 1$ ; при  $\vartheta < \vartheta_{\text{ф}}$   $R = 1$ ;  $R = 1$  – если вся вода замерзла и  $R = 0$  – если весь лед растаял.

## Краевые условия задачи теплопроводности

- ☀ На дневной поверхности назначается граничное условие III рода:

$$-\lambda_{\text{гр}} \left( \frac{\partial \vartheta_{\text{п}}}{\partial l} \right) = S_{\text{к}} + S_{\text{р}},$$

где  $\lambda_{\text{гр}}$  – коэффициент теплопроводности грунта, Мкал/(м·сут·°С);  
 $\vartheta_{\text{п}}$  – температура грунта на дневной поверхности, °С (среднемесячная)  
 $l$  – нормаль к поверхности;  
 $S_{\text{к}}$  – конвективный теплоприток, Дж/(м<sup>2</sup>·с);  
 $S_{\text{р}}$  – радиационный теплоприток, Дж/(м<sup>2</sup>·с).

- ☀ На подводной поверхности (дне водохранилища) задается граничное условие I рода:

$$\vartheta_{\text{н}} = f(x, y, z, t) = \vartheta_{\text{в}}(t),$$

где  $\vartheta_{\text{в}}$  – среднемесячная температура придонного слоя воды водохранилища, С.

- ☀ На боковых границах расчетной области задается условие одномерности теплового потока:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial X} = 0; \quad \frac{\partial \vartheta}{\partial Z} = 0.$$

- ☀ На нижней границе задается условие одномерности теплового потока:  $\frac{\partial \vartheta}{\partial Y} = 0$ ,

либо граничное условие I рода:  $\vartheta = \vartheta_{\text{н.г.}}$ ,

где  $\vartheta_{\text{н.г.}}$  – температура грунтового массива на нижней границе расчетной области, °С.



## Описание численного расчета температурного режима

Для решения задачи прогноза температурного режима применен метод конечных разностей (метод сеток).

Для аппроксимации производных в уравнениях (\*), (\*\*) использована неявная разностная схема, которая является абсолютно устойчивой, что позволяет вести расчет при произвольных интервалах времени  $\Delta t$  и размерах сетки  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ .

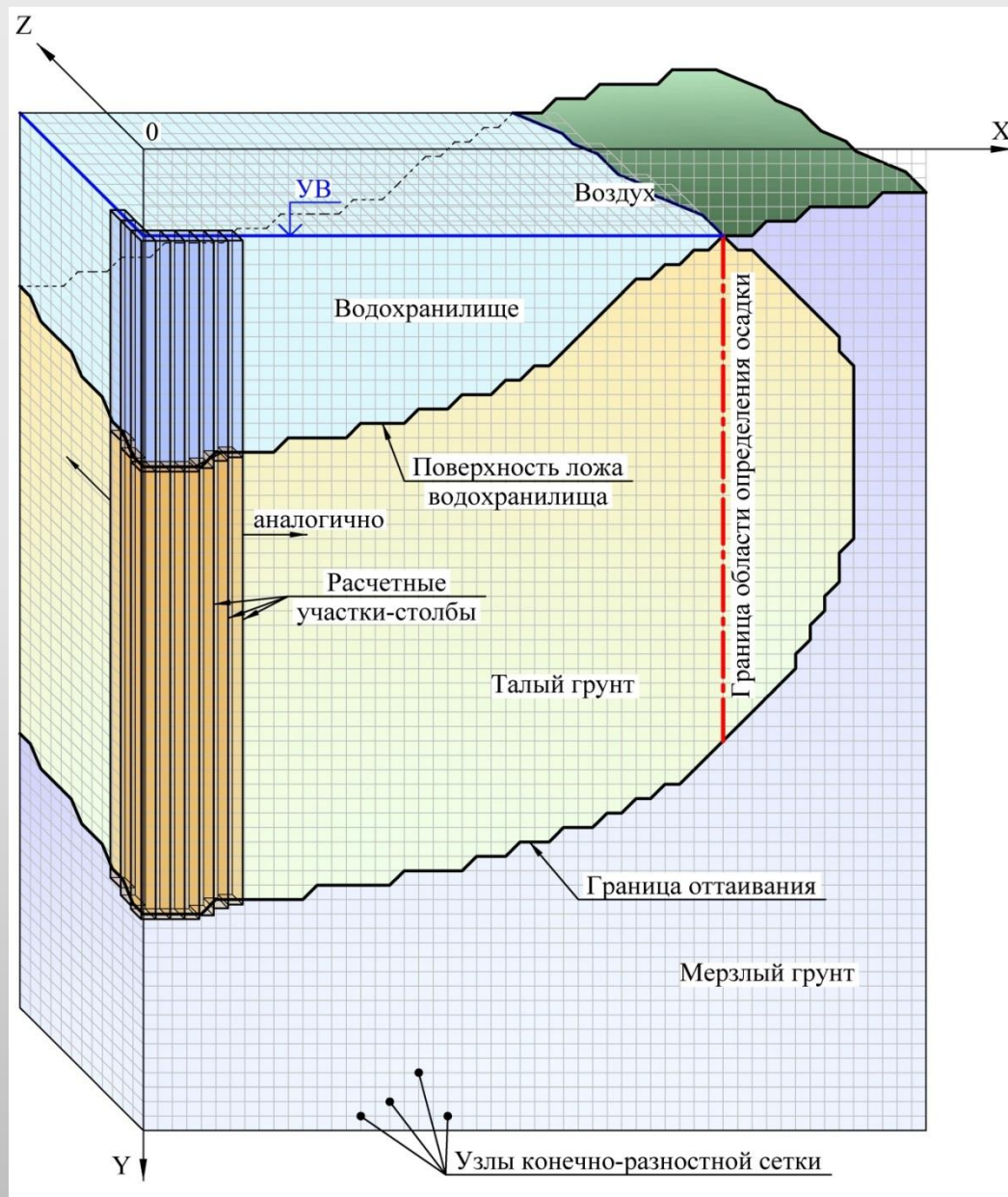
Принято, что льдистость грунта  $R$  в узлах сетки изменяется при постоянной температуре  $\vartheta_{\phi}$ . Она выражается из уравнения (\*\*), представленного в конечноразностном виде. Температура грунта в узле принимается равной  $\vartheta_{\phi}$  до тех пор, пока не завершится процесс таяния порового льда ( $R=0$ ) или замерзания поровой воды ( $R = 1$ ). Как только это произойдет, температура в узле сетки определяется из конечноразностного аналога уравнения (\*\*) при постоянном значении льдистости. Таким образом, льдистости  $R$  придана роль величины, контролирующей процесс таяния –замерзания поровой влаги в грунте.

## Инженерный метод определения оседания ложа

Использовано решение одномерной задачи осадки грунтов при оттаивании с учетом нагрузки от вышерасположенного столба воды.

Пространственная область расчета, представляющая совокупность слоя талого грунта с вышележащей толщей воды, разбивается на вертикальные участки-столбы. Размеры сечения столбов соответствуют расстоянием между соседними узлами конечно-разностной сетки в плане. Для каждого столба определяется осадка при оттаивании.

Схема разбиения области расчета на вертикальные столбы



Определение стабилизированной осадки оттаявшего грунта ведется согласно [СП 25.13330.2012 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах] по зависимости:

$$s = s_{th} + s_p, \text{ м},$$

где  $s_{th}$  – составляющая осадки ложа водохранилища, обусловленная действием собственного веса оттаивающего грунта;

$s_p$  – составляющая осадки ложа водохранилища, обусловленная дополнительным давлением на грунт от действия веса воды.

$$s_{th} = \sum_{i=1}^n \left( A_{th,i} + m_{th,i} \cdot \sigma_{zg,i} \right) h_i$$

$i$  – номер слоя оттаявшего грунта;

$n$  – число слоев оттаявшего грунта;

$A_{th,i}$  – коэффициент оттаивания для слоя оттаявшего грунта;

$m_{th,i}$  – коэффициент сжимаемости  $i$ -го слоя оттаявшего грунта,  $\text{кПа}^{-1}$ ;

$\sigma_{zg,i}$  – вертикальное напряжение от собственного веса оттаявшего грунта в середине  $i$ -го слоя, определяемое расчетом для глубины  $z_i$  от отметки дна водохранилища с учетом взвешивающего действия воды,  $\text{кПа}$  ;

$h_i$  – толщина  $i$ -го слоя оттаивающего грунта, м .

$$s_p = p_b b k_h \sum_{i=1}^{n^*} m_{th,i} k_{\mu,i} (k_i - k_{i-1})$$

$p_b$  – дополнительное вертикальное давление от столба воды водохранилища высотой  $h_b$  на кровле водонепроницаемого грунта,  $\text{кПа}$ ;

$n^*$  – число слоев оттаявшего грунта, расположенных ниже плоскости приложения дополнительного вертикального давления  $p_b$  ;

$b$  – наименьший размер сечения (ширина) столба, м;

$k_h$  – безразмерный коэффициент (определяется по СП 25.13330.2012, таблица 7.6).

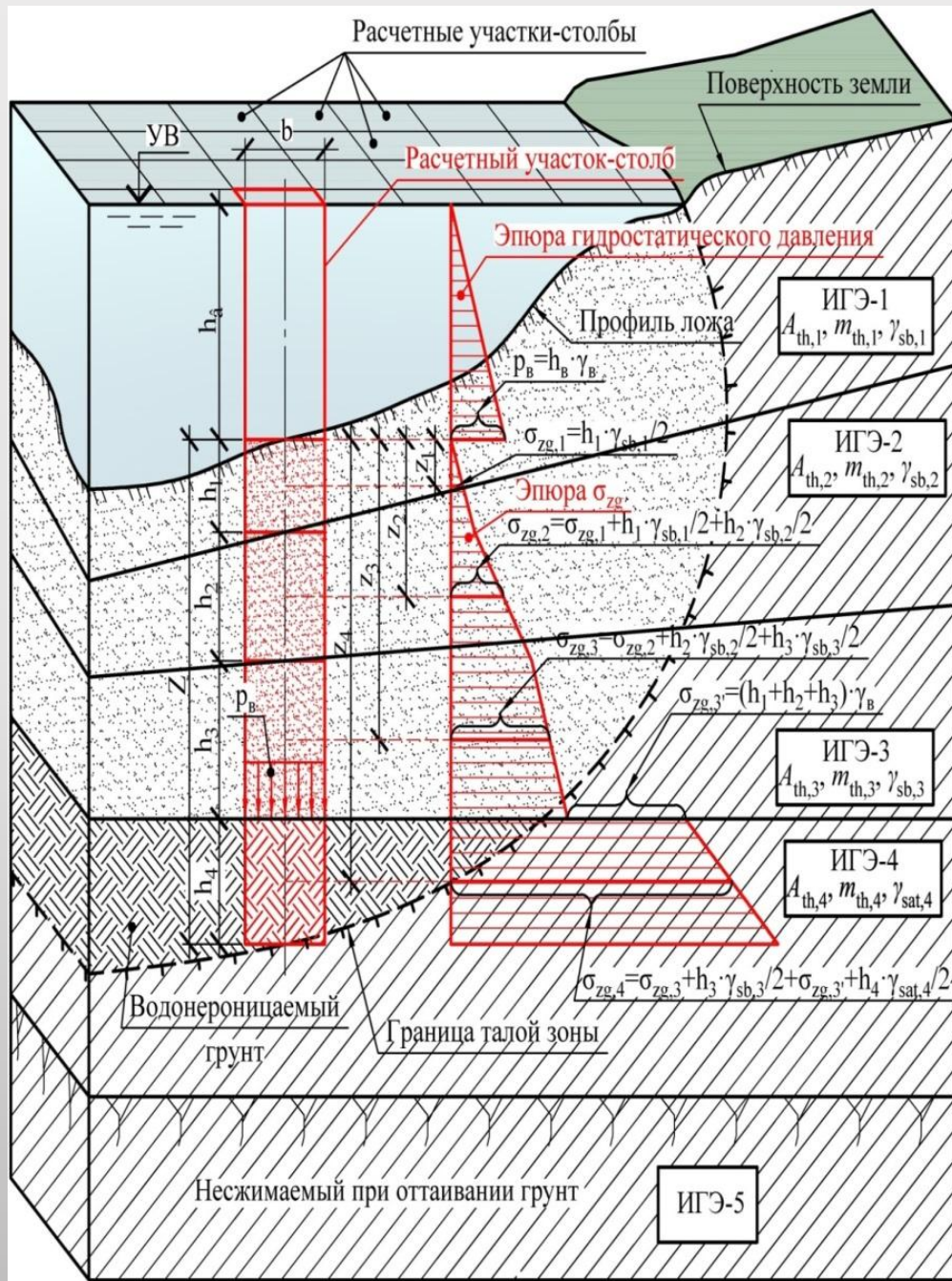


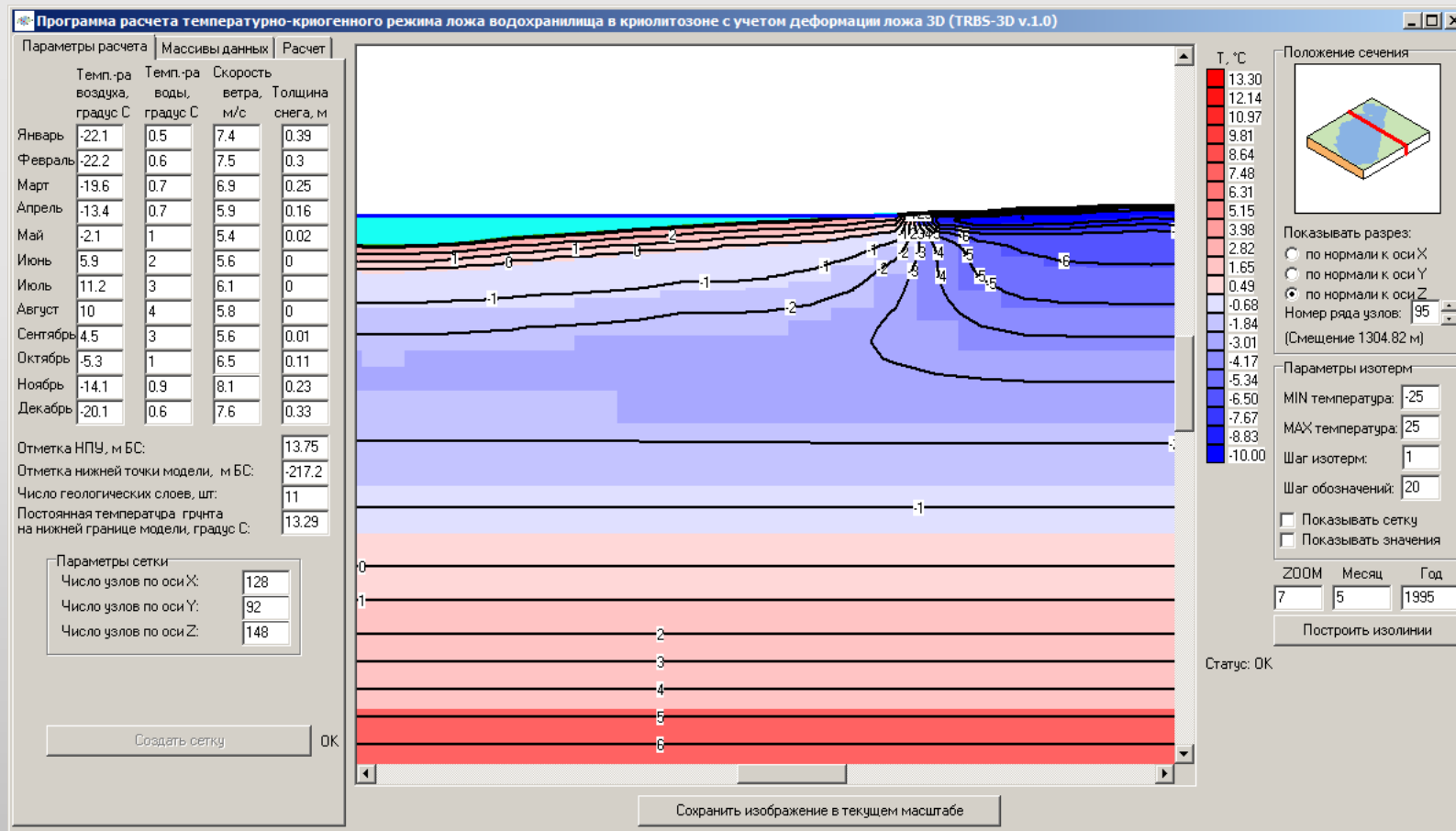
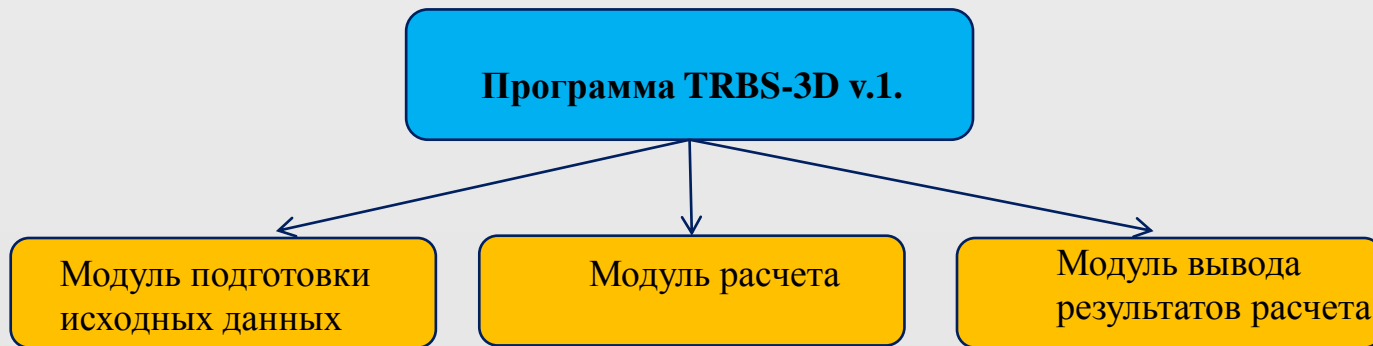
Схема к определению стабилизированной осадки оттаявшего грунта в основании водохранилища

## Программы моделирования температурного режима основания водохранилища с учетом оседания ложа и их практическое применение

Описанный метод использован в программе «Bottom Settlement v.2.0», реализующей методику определения температурного режима основания водохранилища с учетом осадки дна в двухмерной постановке задачи [Горохов, 2013; Свидетельство о гос. рег. № 2014611920, 2014], также в программе «Temperature Regime with Bottom Settlement 3D v.1.0» (TRBS-3D v.1.0), реализующий методику определения температурного режима основания водохранилища с учетом осадки дна в трехмерной постановке задачи [Гнетов, 2016; Свидетельство о гос. рег. № 2016619309, 2016].

Выбор двух – или трехмерной постановки задачи диктуется натурной ситуацией:

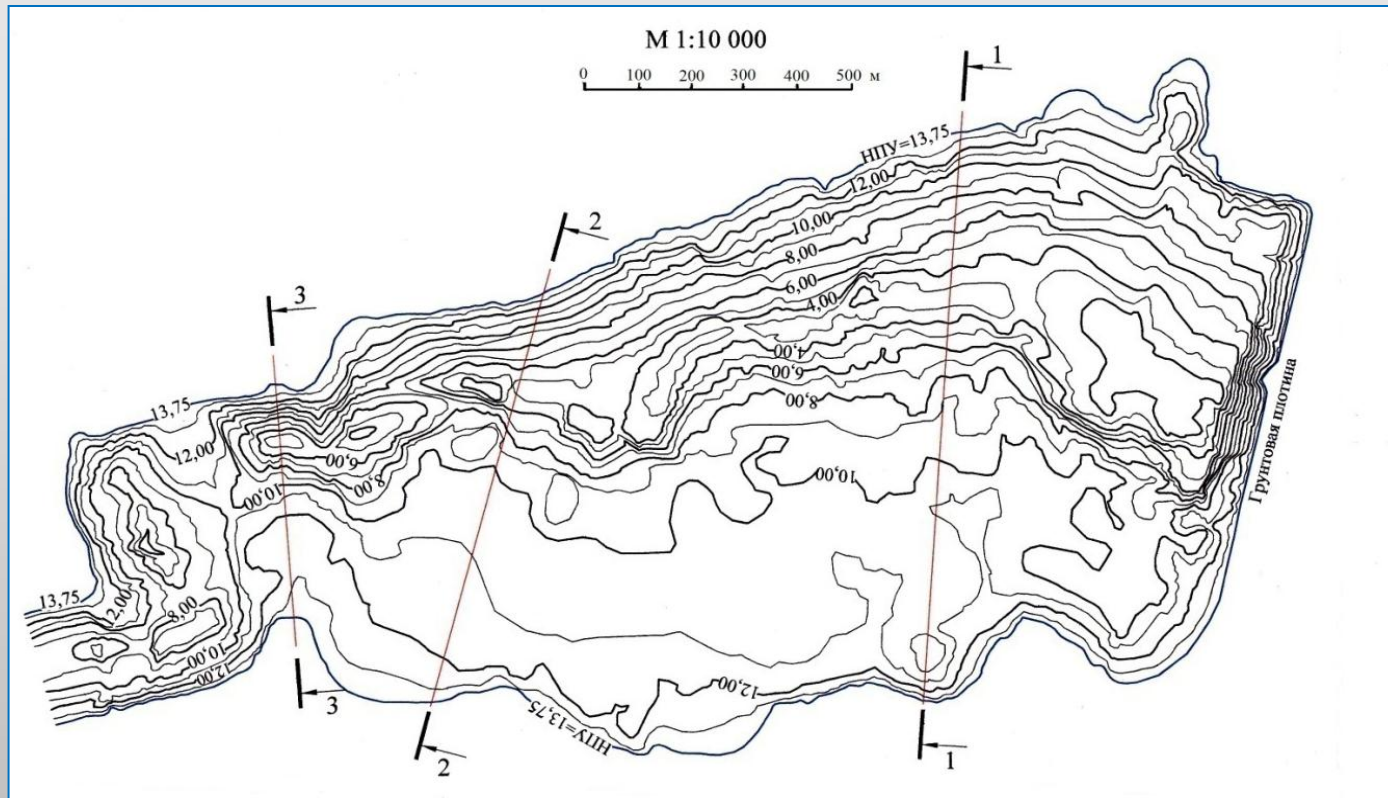
- двумерные модели подразумевают учет рельефа дна по вертикальным разрезам водохранилища;
- трехмерные условия рассматриваются для водохранилищ небольших плановых размеров при выполнении долгосрочных прогнозов, если ожидается существенное влияние пространственности на температурное поле.



Структура и рабочее окно программы TRBS – 3D v.1.0 расчета температурного режима основания водохранилища с учетом оседания ложа в трехмерных условиях

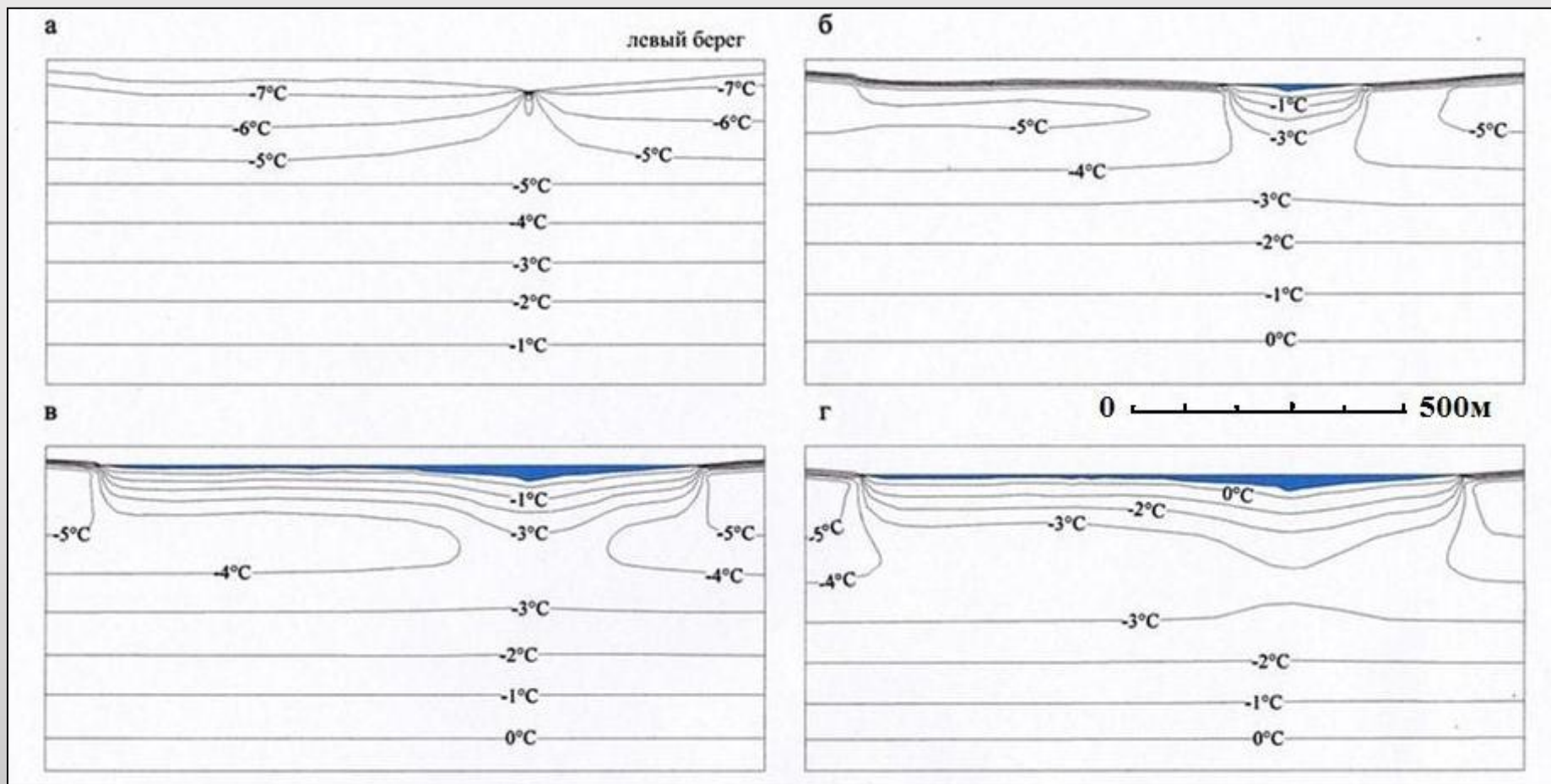
# Температурный режим основания и оседание ложа Анадырского водохранилища

Фото, план 1986 г., сведения о водохранилище, натурные данные о тепловой осадке его ложа на 2008 г. были представлены на слайдах №№316, 320,321. Ниже сообщаются натурно - теоретические данные о температурном режиме основания водохранилища, тепловой осадке его ложа и изменении морфометрических характеристик за многолетний (1960 – 1986 – 2008 – 2030 гг.) период эксплуатации. Моделирование велось с использованием программы Bottom Settlement в двумерных условиях по вертикальным разрезам [Гнетов, 2013].



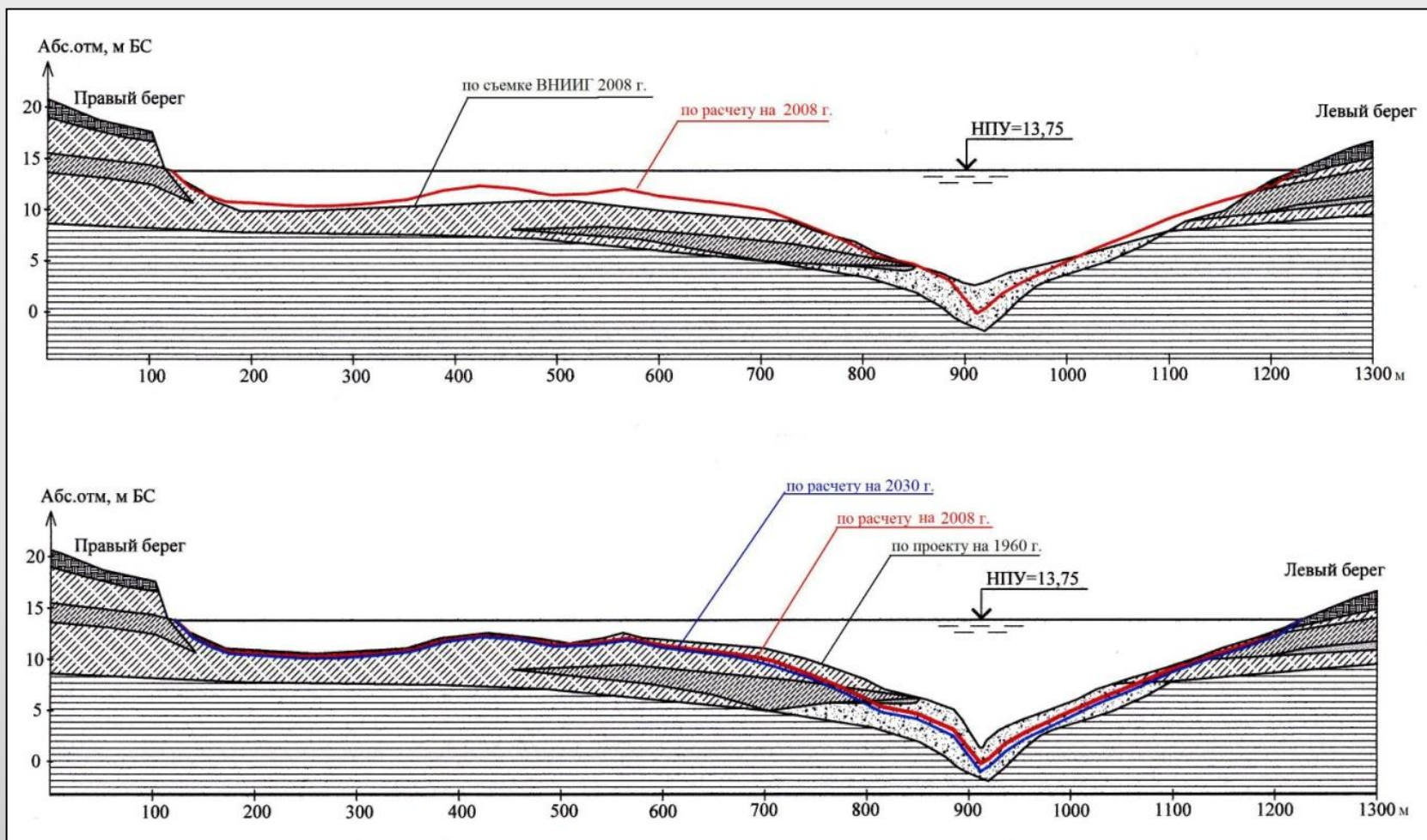
Топографический  
план  
Анадырского  
водохранилища  
по результатам  
натурной  
подводной съемки  
ВНИИГ 2008 г.

К 2008 г. (после 48 лет эксплуатации) под водохранилищем образовался несвязной талик глубиной 11,5 м. При этом к 2000 г. завершилось протаивание льдистых (просадочных) четвертичных отложений.



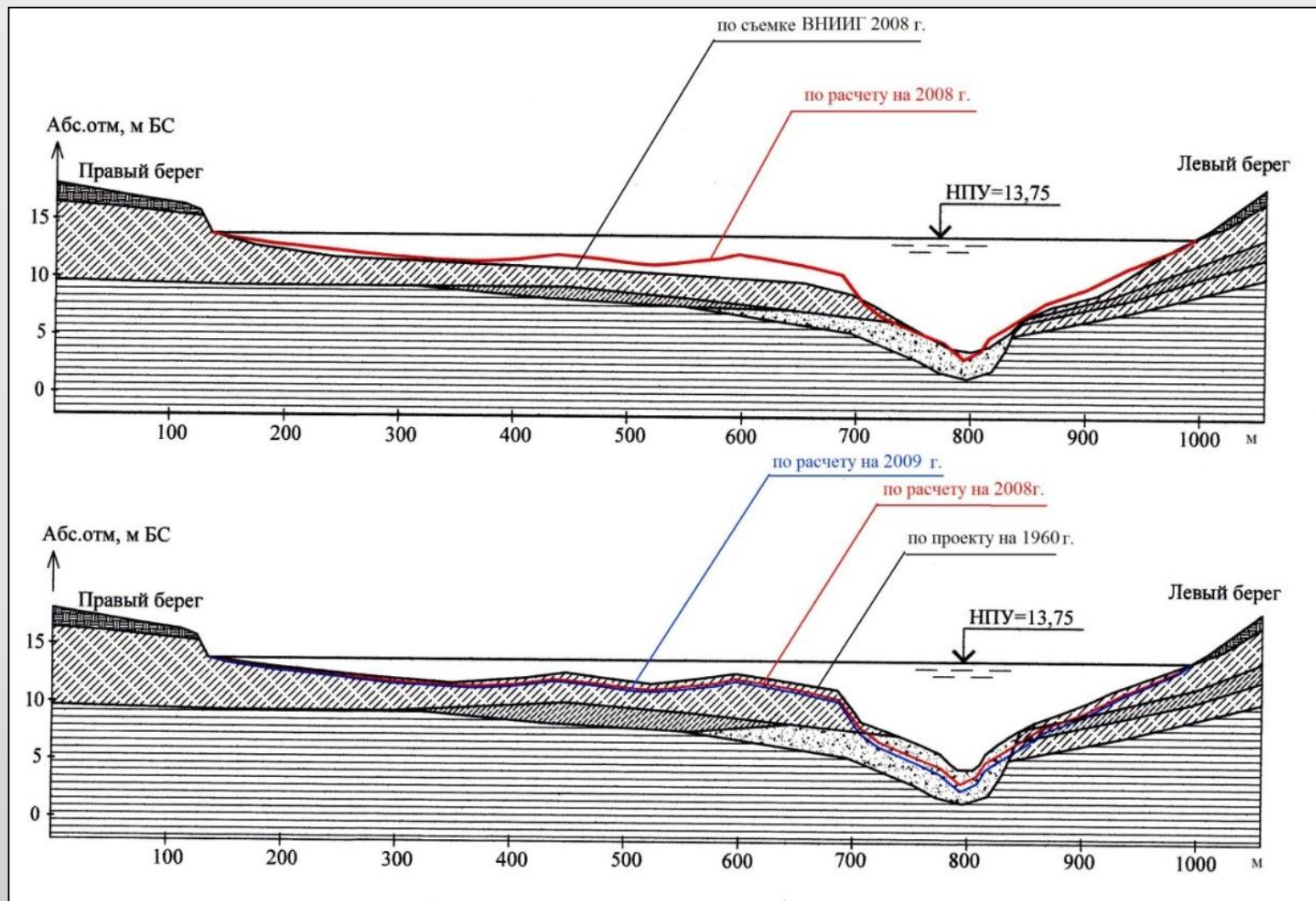
Температурные поля в основании Анадырского водохранилища по расчету в двумерных условиях. Разрез 1 – 1: а – на 1960 г. до заполнения чаши водохранилища; б – на 1986 г. после эксплуатации водохранилища с 1960 г. при первоначальном НПУ 7,8 м БС; в – на 2008 г. после эксплуатации водохранилища с 1986 г. при проектном НПУ 13,75 м БС; г – то же, 2030 г.





Проектный на 1960 г., натурный на 2008 г., расчетный на 2008 г. и прогнозный на 2030 г. профили дна Анадырского водохранилища в двумерных условиях.

Разрез 1 – 1



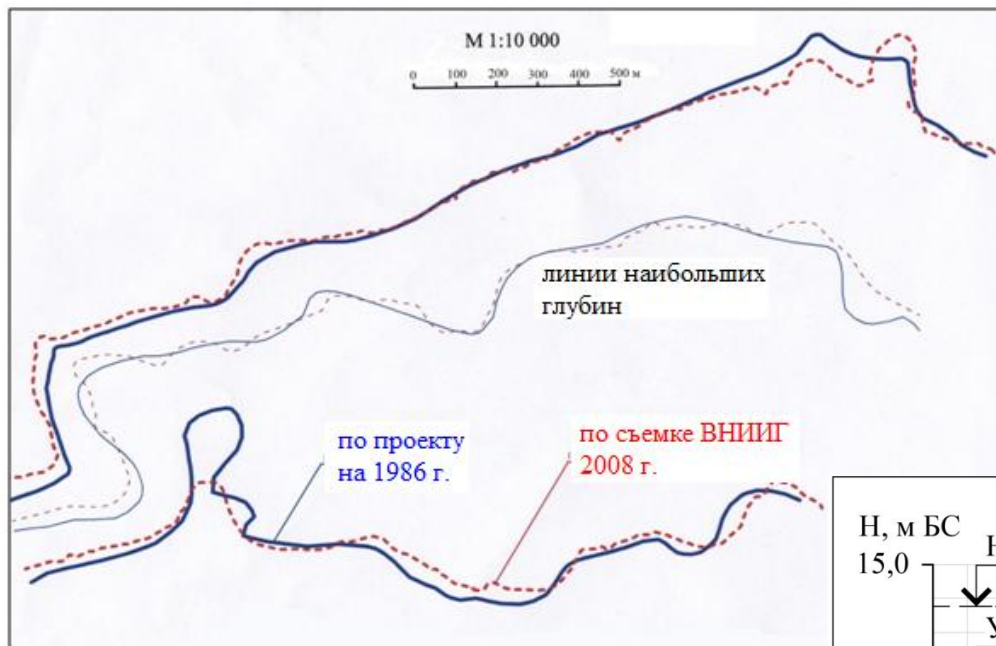
Проектный на 1960 г., натурный на 2008 г., расчетный на 2008 г. и прогнозный на 2030г. профили дна Анадырского водохранилища. Разрез 2 – 2

При глазомерном сопоставлении профилей видно, что расчетное положение дна водохранилища на 2008 г. ниже проектного, а по съемке ВНИИГ 2008 г. ниже расчетного. При этом расхождения расчетных и натуральных профилей 2008 г. незначительны, что указывает на достоверность моделирования.

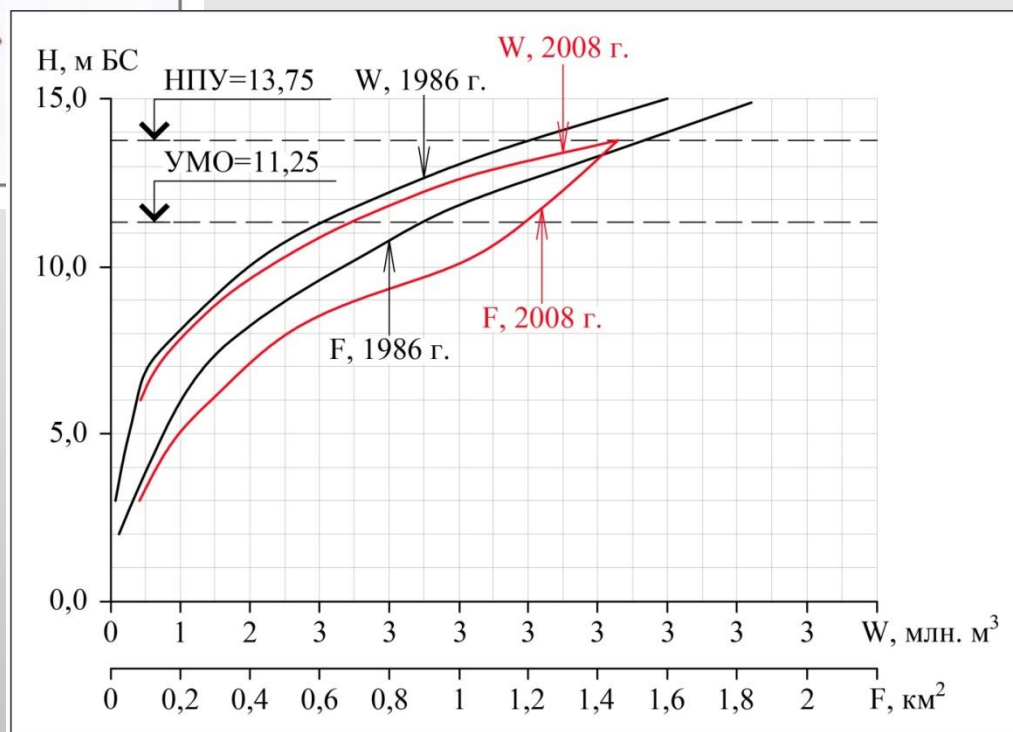
Фактические и прогнозные морфометрические характеристики Анадырского водохранилища, определенные с использованием результатов двумерного моделирования по вертикальным разрезам

Характеристики		При первоначальном НПУ=7,8 м, 1960 г.	После повышения НПУ до 13,75 м			
			по проектному топографическому плану, 1986 г.	по натурным изысканиям ВНИИГ 2008 г.	по расчету ННГАСУ на 2008 г.	по расчету ННГАСУ на 2030 г.
Отметки, м БС	НПУ	7,8	13,75	13,75	13,75	13,75
	УМО	6,5	11,25	11,25	11,25	11,25
Максимальная глубина, м		6,55	12,5	13,0	14,0	14,1
Площади зеркала, км <sup>2</sup>	при НПУ	0,38	1,49	1,47	–	–
	при УМО	0,29	0,84	1,20	–	–
Объемы млн.м <sup>3</sup>	полный	1,0	6,19	7,23	7,36	7,55
	полезный	0,3	3,1	3,87	3,69	3,78
	мертвый	0,7	3,09	3,36	3,67	3,77
Длина береговой линии, км			3,07	3,59	–	–

В период 1986 – 2008 гг. за счет тепловой осадки ложа полный объем водохранилища увеличился с 6,19 млн м<sup>3</sup> до 7,23 – 7,36 млн м<sup>3</sup>, т.е. на 16,8 – 18,9 %, а к 2030 г. возрастет до 7,55 млн м<sup>3</sup>, т. е. на 21,9 % против проектного. Площадь зеркала при НПУ уменьшилась на 1,3 %[ Гнетов, 2013].

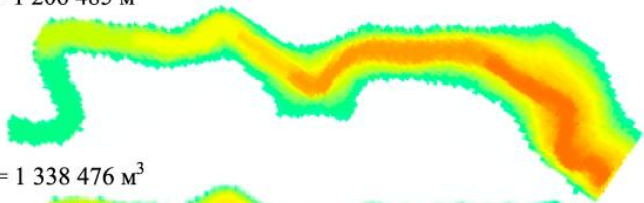


Совмещенные проектный на 1986 г. и натурный на 2008 г. планы урезов воды Анадырского водохранилища при НПУ = 13.75 м БС

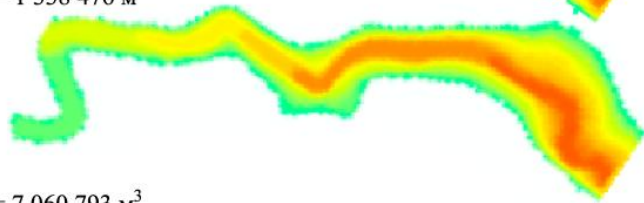


Кривые объемов и площадей зеркала Анадырского водохранилища

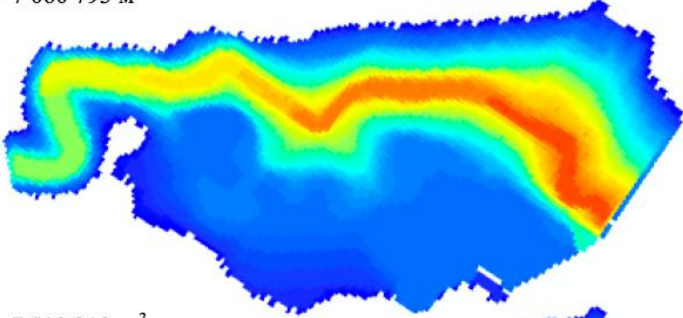
а)  $V = 1\,206\,485\text{ м}^3$



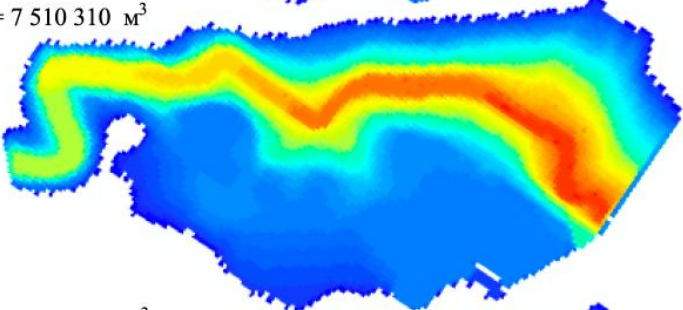
б)  $V = 1\,338\,476\text{ м}^3$



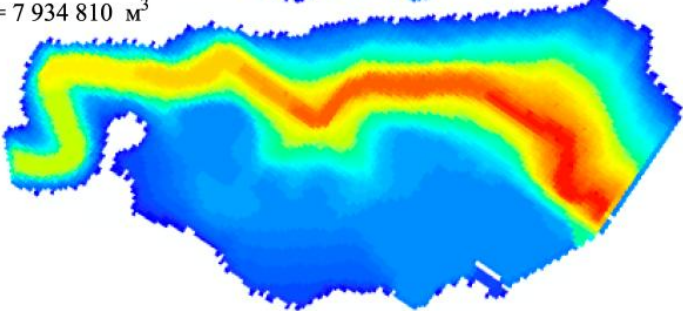
в)  $V = 7\,060\,793\text{ м}^3$



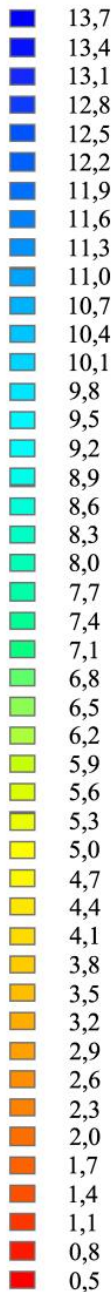
г)  $V = 7\,510\,310\text{ м}^3$



д)  $V = 7\,934\,810\text{ м}^3$



Абс. отм., м



Моделирование температурного режима основания Анадырского водохранилища с учетом оседания ложа было проведено, также в трехмерной постановке задачи по программе TRBS – 3D v.1.0 [Гнетов, 2016].

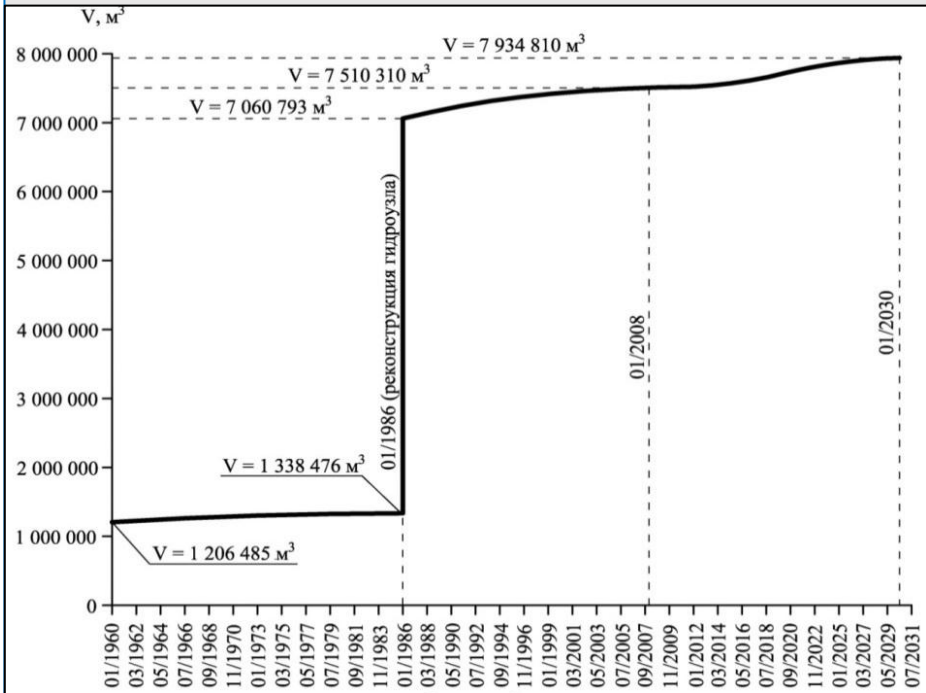


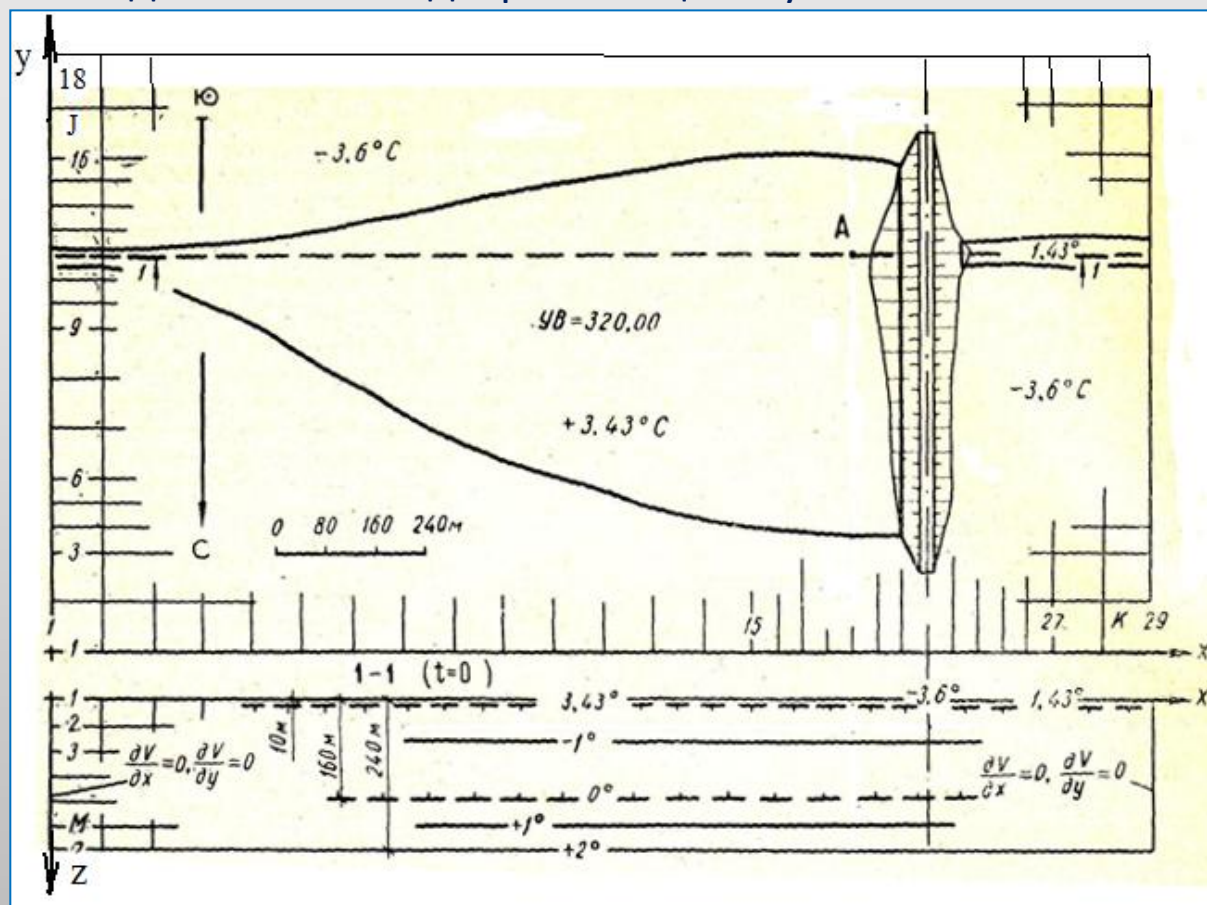
График изменения объема чаши водохранилища. Полный объем водохранилища на 2030 г. определен в 7,93 млн  $\text{м}^3$  против 7,55 млн  $\text{м}^3$  при двумерной постановке задачи, расхождение составило 5,0 %.

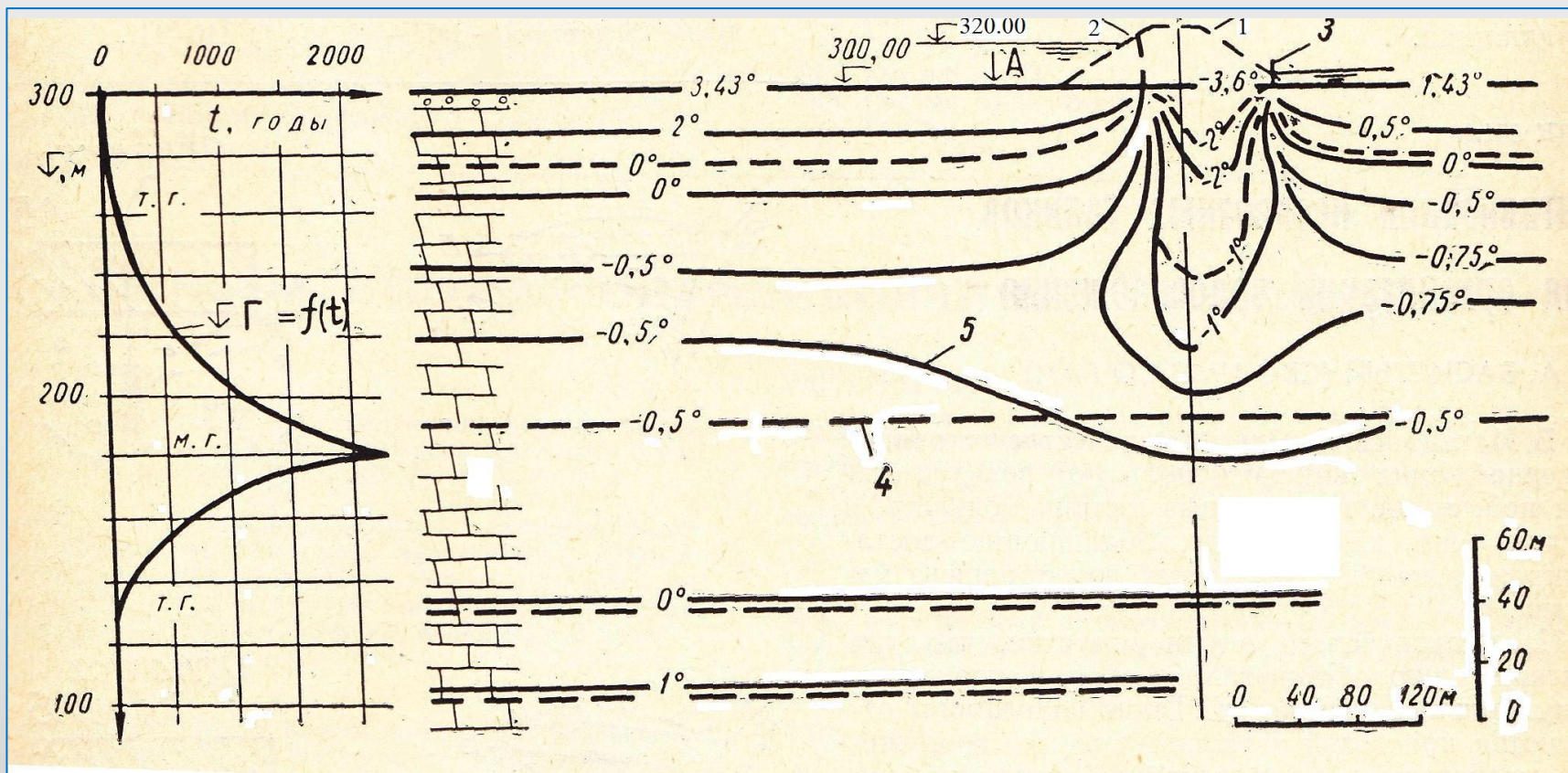
Растры высот расчетного рельефа дна водохранилища

# Температурный режим основания водохранилища на руч. Поннеурген, проектировавшегося для Билибинской АЭС

Среднегодовые температуры: воздуха ( $-12^{\circ}\text{C}$ ), поверхности земли вне водохранилища ( $-3,6^{\circ}\text{C}$ ), воды водохранилища ( $+3,43^{\circ}\text{C}$ ), воды ручья ( $+1,43^{\circ}\text{C}$ ). Мощность мерзлоты 160 м. Расчет температурного режима выполнен для пространственных условий на 50 лет от года начала эксплуатации гидроузла. Пологий рельеф долины аппроксимирован горизонтальной плоскостью. Оседание ложа водохранилища не учитывалось [Битюрин,1993].

Схема к расчету с конечноразностной сеткой, начальными и граничными условиями





Температурный режим долины после создания водохранилища.

Разрез 1 – 1 по тальвегу:

1 – контур плотины; 2,3 – урезы водохранилища и нижнего бьефа на плотине;  
 4,5 – изотермы на моменты времени 10 и 50 лет. Слева – график оттаивания мерзлоты на вертикали А; на нем  $\Gamma = f(t)$  – границы раздела талых и мерзлых пород; **видно, что талик под водохранилищем станет сквозным не ранее, чем через 2000 лет**

# Температурный режим и переформирование мерзлых берегов водохранилищ

## Типы берегов и данные натурных наблюдений за их переформированием

У водохранилищ криолитозоны имеются устойчивые к разрушению скальные, нейтральные, аккумулятивные берега. Нейтральными являются обычно пологие берега из малольдистых пород у малых водохранилищ и мелководий больших водохранилищ при отсутствии волнения [Соболь И.С., 2013].



Устойчивые к размыву берега Иреляхского водохранилища без видимых признаков переформирования. 2011 г.



Вид мелководья Усть-Хантайского водохранилища с устойчивыми берегами. 2005 г.



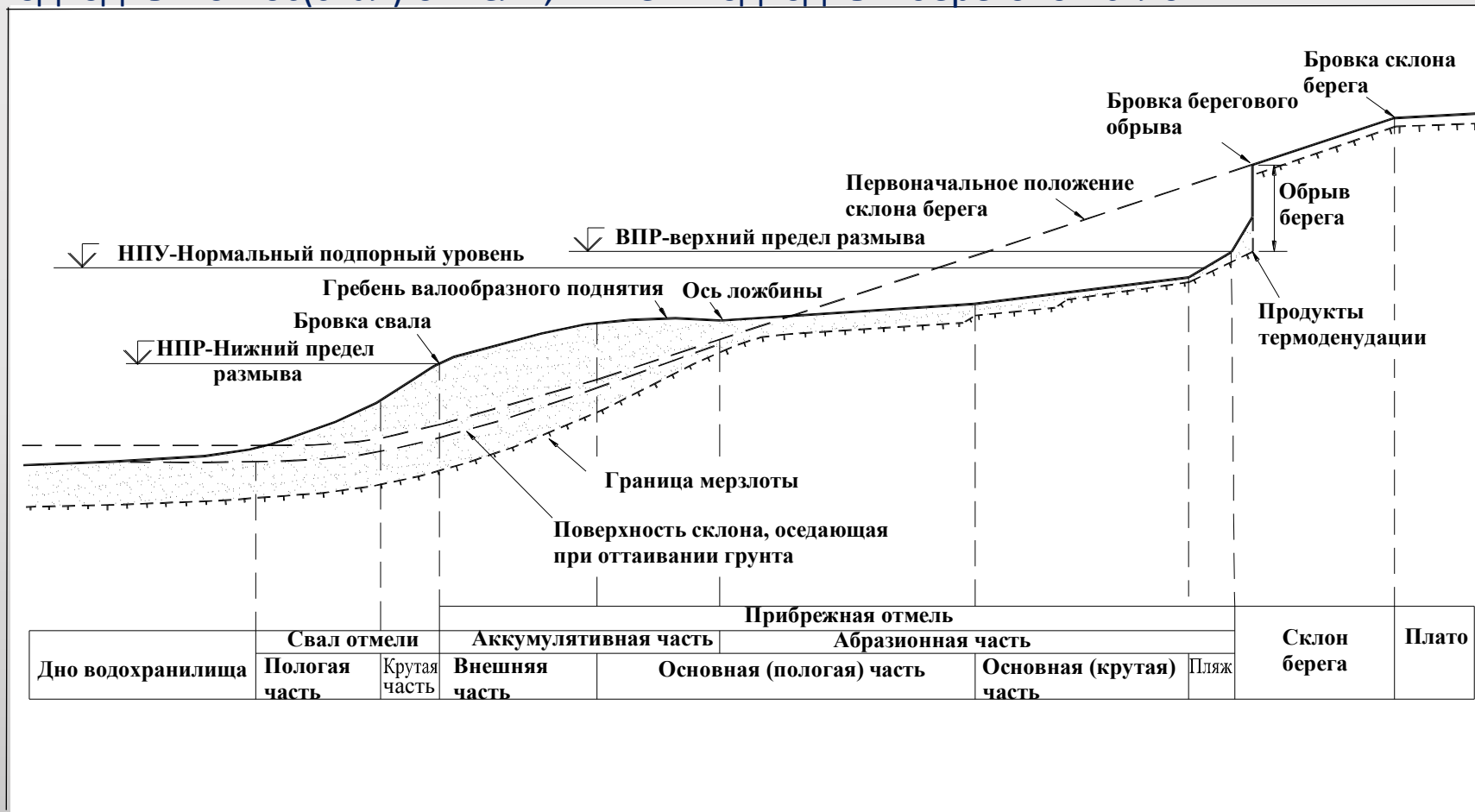
Наиболее характерна генетическая группа термоабразионных берегов, объединяющая типы мерзлых берегов, обособленные согласно ведущего берегового процесса.

**1** **Термоабразионные берега**, переформировывающиеся под совместным воздействием тепловой и механической (волновой) энергии воды. Термоабразии подвержены берега больших водохранилищ, сложенные нескальными мерзлыми породами.

### Протяженность термоабразионных берегов водохранилищ энергетических гидроузлов криолитозоны

Водохранилище	Источник информации, год	Длина береговой линии, км	Протяженность берегов, подверженных термоабразии	
			км	%
Вилюйское	проект, 1977 г.	2750	2100	76
	фактические данные, 1985г. [Бурлаков, 1987]	2755	320	12
Усть-Хантайское	проект, 1971 г.	970	600	62
	фактические данные, 1978 г. [Кроник, 1980]	999,4	221	22,1
Курейское	Сибгидропроект, 1990 г.	731	50	6,8
Усть-Среднеканское	Ленгидропроект, 1991 г.	250	93	37,2
Эвенкийское	проект [Куницкий, 2011]	5630	281	5

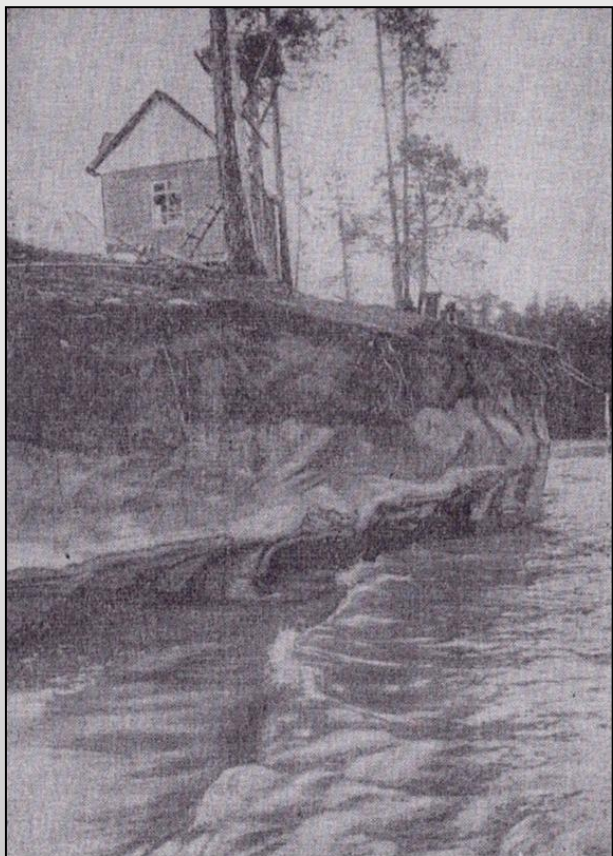
У термоабразионного берега выделяются: надводный береговой уступ, вертикальный в период интенсивной термоабразии; береговая отмель, имеющая абразионную и аккумулятивную части и располагающаяся в пределах размывающего действия волн; подводный откос(свал) отмели; ниже – подводный береговой склон.



Схематичное изображение типичного профиля термоабразионного берега водохранилища [Соболь С.В., 2007]

Термоабразионный процесс в общем случае является циклическим.

- ❖ Наиболее интенсивный теплообмен происходит в период высокого уровня водохранилища при волнении у подножия берегового уступа на контакте воды с обнаженными мерзлыми породами. Здесь вырабатывается термоабразионная ниша.



Термоабразионная ниша в подножии термоабразионного берега из слабощементированных песчаников в Дуранинском расширении Вилюйского водохранилища, 1972 г. [Константинов, 1977]



Термоабразионный участок сильнольдистого правого берега Билибинского водохранилища с термоабразионной нишей [Кривоногова, 2009]

- ❖ Берег над нишей нависает в виде консоли. Углубление ниши приводит к его обрушению под действием собственной тяжести.
- ❖ Обрушившиеся массивы мерзлого грунта оттаивают и размываются волнами за период от 1 – 2 летних месяцев до 1 – 2 летних сезонов.
- ❖ Из оттаявшего и размывтого грунта формируется береговая отмель в условиях тепловой осадки ее основания.



Картина разрушения термоабразионного берега Восточно-Сибирского моря близ устья р. Кондратьевой, сложенного ископаемым льдом (вертикальный уступ, термоабразионная ниша, обрушившийся массив берега, абразионная отмель). 1909 г. [Якутия, 1927]

Процесс термоабразии затухает, когда отмель становится волноустойчивой при полностью протаявшей просадочной толще пород основания, после чего продукты разрушения начнут скапливаться у подножия берегового уступа, открывая начало термоденудационному выполаживанию последнего.

а



б



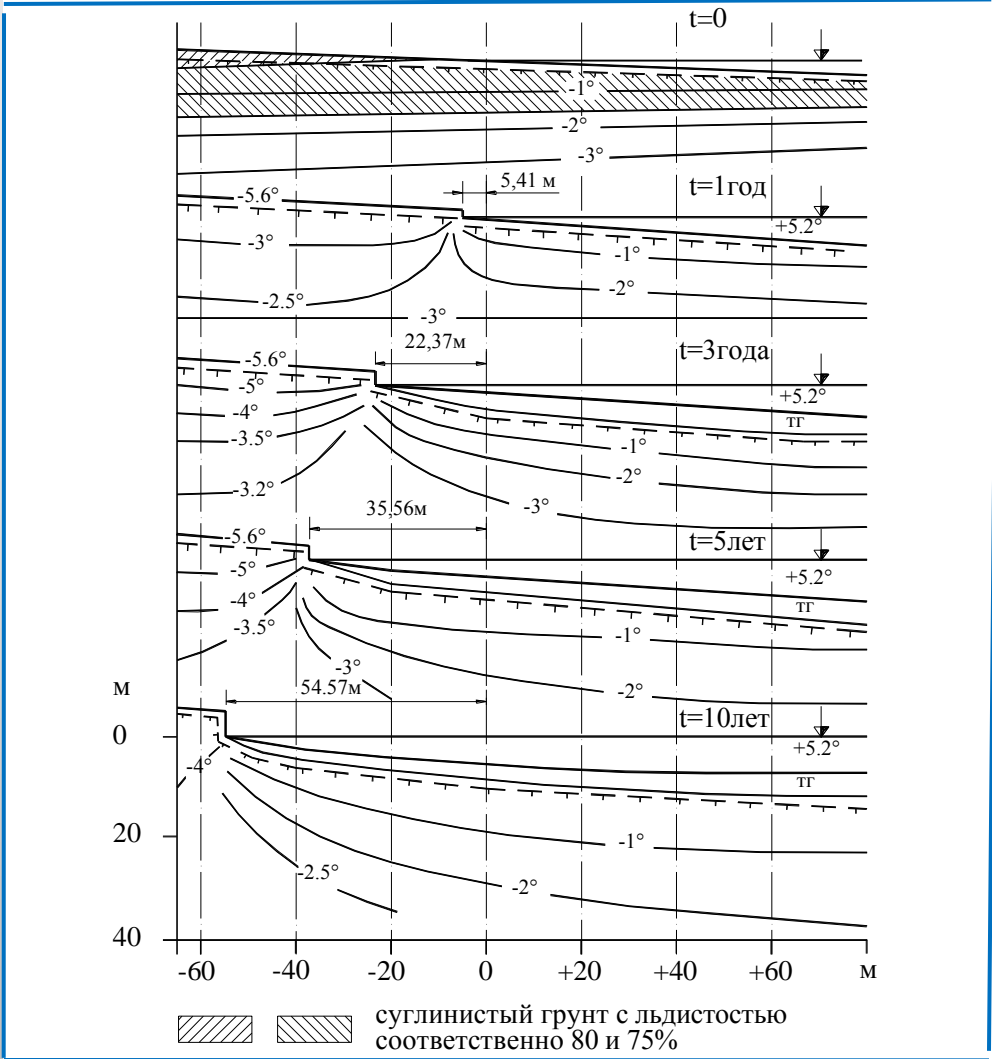
Участки термоабразионных берегов Вилюйского водохранилища в Дуранинском расширении (а) и вблизи Усть-Чонской трубы (б) соответственно при высоком и низком уровнях воды на стадии, когда термоабразия начинает затухать. 2011 г.

**2** **Термокарстовые берега**, переформировывающиеся при отсутствии волнения преимущественно вследствие оттаивания и тепловой осадки мерзлых льдистых пород. Такие берега характерны для малых водохранилищ и мелководий больших водохранилищ.



Обнажившийся при пониженном уровне воды мелководный берег Усть-Хантайского водохранилища с оттаявшим льдом в грунте. 2005 г.

Хронологическое изменение профиля и температурного состояния пологого термокарстового берега в условиях Усть-Хантайского водохранилища [Гоголев, 1984]



3

**Термоденудационные берега**, переформировывающиеся вследствие оттаивания надводного уступа и оплывания грязевой массы к его подножию. В период интенсивной термоабразии роль термоденудации незначительна. После затухания термоабразии термоденудация будет продолжаться, приводя к уплощению уступа.



Термоденудационное  
выполживание берегового уступа  
на одном из Новосибирских  
островов [Алексеев, 2011]

Развитие группы термоабразионных берегов водохранилищ происходит в самых разнообразных условиях. Однако, механизм разрушения, отражающий ведущий береговой процесс является интегральным. Поэтому, формализация берегопереформирований для их прогнозного моделирования выполняется по ведущему береговому процессу.

# Температурный режим пологого нейтрального берега Вилюйского водохранилища

На ЭВМ по программе Bottom Settlement решена двумерная задача о температурном режиме берега при среднемесячных условиях на верхней границе расчетной области. Исходная информация принималась по материалам ВНИМС. Мощность вечномерзлых пород 590 м. Их температура в верхней части разреза – 2,7°С.

Температура надводной поверхности земли и дна под водой (осевшим льдом)  
в прибрежной части Вилюйского водохранилища (°С)

Месяцы	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Температура воздуха по данным м/с г. Мирный	-28,6	-24,8	-17,7	-8,3	3,5	13,7	17,9	14,0	4,2	-7,6	-20,8	-27,0
Температура поверхности земли	-25,8	-22,2	-15,7	-7,0	4,2	17,6	22,1	16,5	5,0	-7,0	-18,0	-24,5
Температура дна в глубоководной и мелкоководной зонах	4,1	4,0	4,0	4,0	4,0	4,1	4,5	5,0	6,0	5,8	5,0	4,1
	-1,0	-4,0	-4,5	-3,8	0	5,0	11,5	12,2	9,9	5,9	4,1	2,0

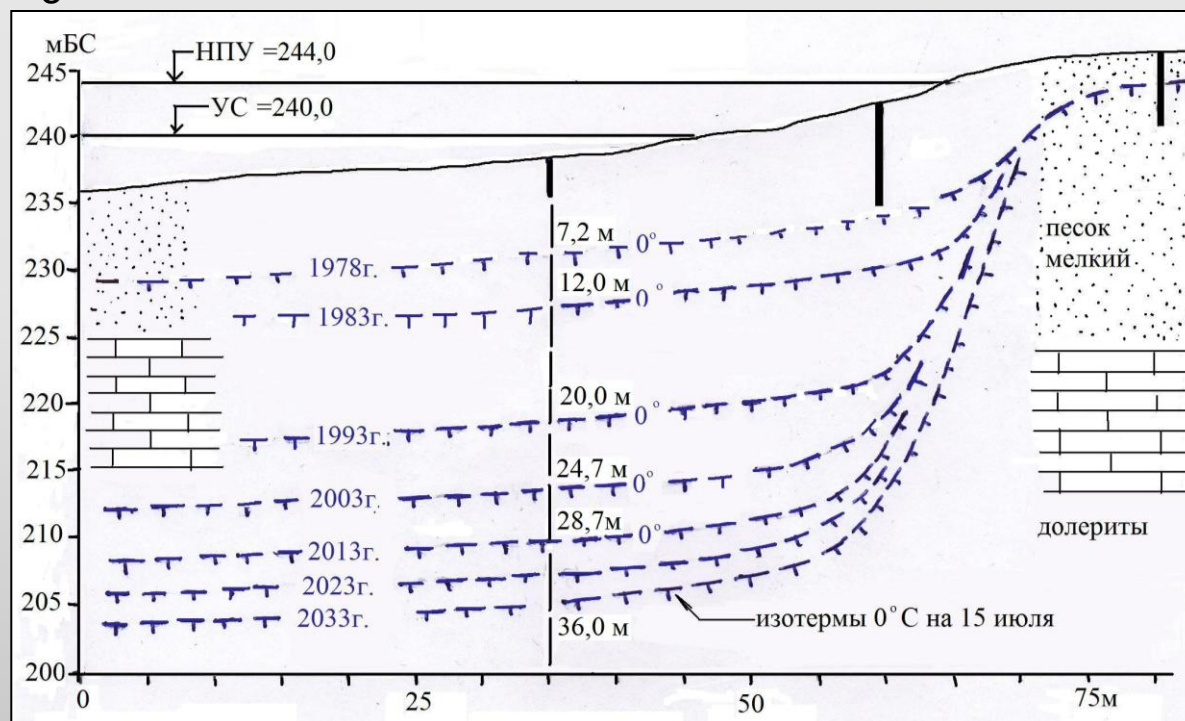


Расчет был начат с июля месяца 1973 г. ( $t=0$ ), верифицирован по натурной изотерме  $\vartheta = 0^{\circ}\text{C}$  на апрель 1978 г. и продолжен до 2033 г. ( $t = 60$  лет). Результаты показали, что с 1973 г. по 2033 г. береговой массив оттает на глубину 36 м и, при мощности вечной мерзлоты 590 м, ее оттаивание до полной деградации будет продолжаться столетия.

а

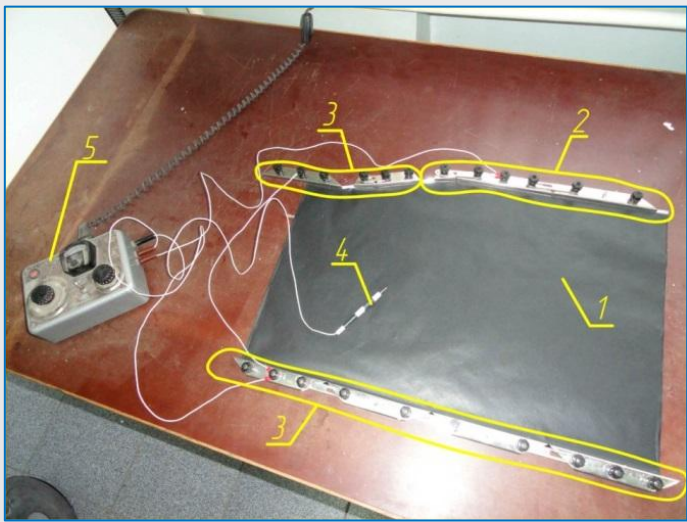


б



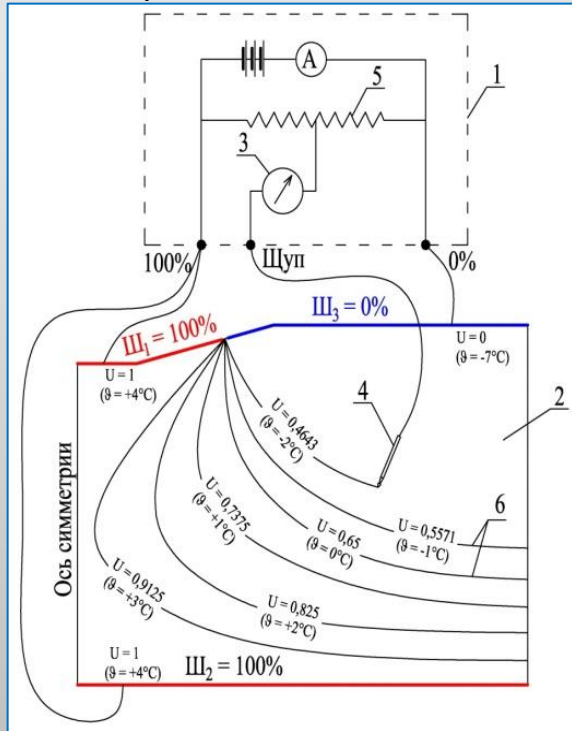
Криолитологический разрез пологого песчаного берега в Дуранинском расширении Вилюйского водохранилища на июль 1978 г. по данным ВНИМС (а) и расчетная картина его оттаивания за 1973 – 2033 гг. при отсутствии переработки (б)



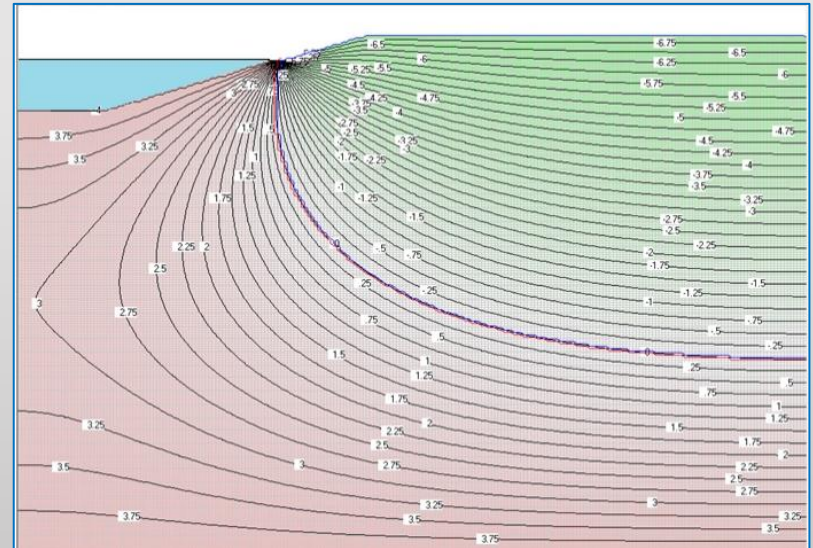


- 1 – электропроводящая бумага;
- 2 – шины 0% разности потенциалов;
- 3 – шины 100% разности потенциалов;
- 4 – игла-щуп;
- 5 – электроинтегратор с потенциометром.

### Модель расчетной области из электропроводной бумаги



- 1 – электроинтегратор;
- 2 – модель расчетной области из электропроводной бумаги;
- 3 – гальванометр;
- 4 – игла-щуп;
- 5 – потенциометр;
- 6 – искомые изотермы.



Изотермы стационарного температурного поля в шкале  $\vartheta$ , °C

Схема электроинтегратора с моделью расчетной области

# Прогнозная энергетическая модель переформирования термоабразионного берега водохранилища

## Блок исходной информации

- Геометрические характеристики створа: координаты первоначальной поверхности берега  $x_6$ ,  $z_6$  и аппликата кровли непросадочного (скального) грунта  $z_{ск}$ .
- Продолжительность безледоставного сезона  $T$ , сутки.
- Температурные условия: начальная температура берега в зоне выработки волноприбойной ниши  $\vartheta_n = \vartheta_2$  °С и дна водохранилища  $\vartheta_n = \vartheta_1$  °С; температура воды, средняя за летний и зимний сезоны  $\vartheta_v = \vartheta_{вл}$  °С и  $\vartheta_v = \vartheta_{вз}$  °С.
- Волноэнергетические характеристики: продолжительность периода волнения за безледоставный сезон  $t_{волн}$ ; средняя высота волны  $h_v$  за этот период; аппликаты нижней  $z_n$  и верхней  $z_v$  границ размывающего действия волн; механическая энергия волнения  $E$ , средняя за единицу времени (сутки) в течение безледоставного сезона, отнесенная к 1 пог. м волнового фронта в расчетном створе, кДж/ м пог. в сутки.
- Свойства мерзлого (мг) и оттаявшего (тг) грунта берега в зоне оттаивания и размыва для температурных расчетов. Кроме этих свойств: относительная осадка грунта при оттаивании  $\delta$ ; сопротивление мерзлого грунта разрыву  $\delta_p$ , Па; коэффициент размываемости оттаявшего грунта  $K_p$ , м<sup>3</sup>/Дж, как физическая характеристика оттаявшего грунта; коэффициент аккумуляции  $K_a$  как отношение объема грунта, отложившегося в аккумулятивной части отмели, к объему размывотого талого грунта берега.
- Свойства воды: коэффициенты теплопроводности  $\lambda_v$ , Вт/ (мград), кинематической вязкости  $\nu_v$ , м<sup>2</sup>/с, температуропроводности  $\alpha_v$ , м<sup>2</sup>/с.
- Временные условия: шаг по времени  $\Delta t$  (обычно  $\Delta t = 2$  суток); срок прогноза  $T_{пр.}$ , годы.



**В модели переформирования термоабразионного берега на заданный срок реализован алгоритм построения береговых профилей при прохождении циклов термоабразии, которые включают (в сокращенном изложении):**

⊕ выработку термоабразионной ниши в подножии мерзлого берегового уступа

$$\frac{\partial \xi_{\text{ни}}(t_{\text{ни}})}{\partial t_{\text{ни}}} = \frac{1}{\gamma_{\text{л}} \omega L} \left[ \lambda_{\text{мг}} \cdot \frac{\vartheta_{\text{н}} - \vartheta_{\text{ф}}}{\sqrt{\pi \cdot a_{\text{мг}} \cdot t_{\text{ни}}}} - \lambda_{\text{тг}} \frac{\alpha(t) \cdot (\vartheta_{\text{ф}} - \vartheta_{\text{в}}(t))}{\alpha(t) \cdot b + \lambda_{\text{тг}}} \right],$$

где  $\xi_{\text{ни}}(t_{\text{ни}})$  – глубина ниши,  $\xi_{\text{ни}}(0) = b$ ;  $t_{\text{ни}}$  – время выработки ниши,  $t_{\text{ни}} \geq 0$ ;  $t$  – время от момента начала переформирования берега;  $\vartheta_{\text{н}}$ ,  $\vartheta_{\text{ф}}$ ,  $\vartheta_{\text{в}}(t)$  – начальная температура мерзлого берега, фазовых превращений льда в грунте, воды;  $\gamma_{\text{л}} \omega L$ ,  $\lambda_{\text{мг}}$ ,  $\lambda_{\text{тг}}$ ,  $a_{\text{мг}}$  – удельное тепло таяния, коэффициенты теплопроводности и температуропроводности мерзлого (мг) и талого (тг) грунта;  $b$  – толщина слоя оттаявшего грунта, удерживающегося на поверхности уступа;  $\alpha(t)$  – коэффициент теплообмена, осредненный на период цикла термоабразии, являющийся регулятором передачи тепловой энергии от воды к берегу

$$\alpha(t) = \frac{\alpha_{\text{волн}}(t) \cdot t_{\text{волн}}}{T} \cdot \frac{\lambda}{\ell(t)} \cdot 0,48 \left(\frac{v}{a}\right)^{0,4} \cdot \frac{V \cdot l(t)}{v},$$

здесь  $\alpha_{\text{волн}}(t)$  – коэффициент теплообмена при волнении;  $t_{\text{волн}}$  и  $T$  – продолжительность периода волнения и безледоставного сезона;  $\lambda$ ,  $v$ ,  $a$  – коэффициенты теплопроводности, кинематической вязкости, температуропроводности воды в зависимости от температуры;  $l(t)$  – длина омываемой волнами части отмели;  $V$  – скорость омывания берега волнами;

⊕ обрушение массива берега, нависшего над нишей в виде карниза объемом  $W_k(\xi_{ни})$ , по условию  $\sigma_{max}(\xi_{ни}) \geq \sigma_p$ , где  $\sigma_{макс}$  и  $\sigma_p$  – растягивающее напряжение в заделке карниза и сопротивление мерзлого грунта берега разрыву;

⊕ оттаивание обрушившегося массива грунта  $W_k(\xi_{ни})$  водой за время  $t_{отт}$  и размыв оттаявшего грунта  $W_{рк}(t_{рк})$  за время  $t_{рк}$  по уравнению, определяющему роль механической энергии волнения в процессе термоабразии

$$\frac{\partial W_{рк}(t_{рк})}{\partial t_{рк}} = K_p \cdot E(t)$$

где  $K_p$  – коэффициент размываемости как физическая характеристика оттаявшего грунта берега;  $E(t)$  – механическая энергия волнения.

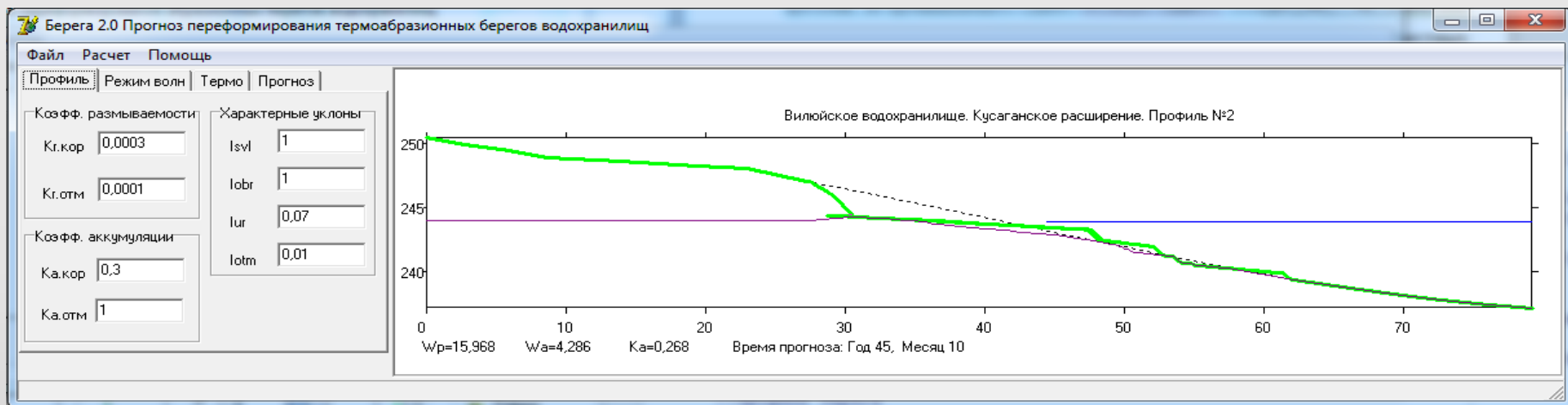
Оттаиванием и размывом обрушившегося массива грунта, являвшегося препятствием для доступа волн к подножию берегового уступа, заканчивается цикл термоабразии, продолжительностью  $t_i - t_{i-1} = t_{ни} + t_{отт}$  в наиболее общем случае при  $t_{отт} \approx t_{рк}$ .

Без перерыва на зимы происходит оттаивание основания на глубину  $\xi_d(t)$  с осадкой дна водохранилища  $s(\xi_d)$ :  $\frac{\partial \xi_d(t)}{\partial t} = \frac{1}{\gamma_d \omega L} \left[ \lambda_{мг} \cdot \frac{\vartheta_n - \vartheta_\phi}{\sqrt{\pi \cdot a_{мг} \cdot t}} - \lambda_{тг} \frac{\vartheta_\phi - \vartheta_b(t)}{\xi_d(t) \cdot (1 - \delta)} \right] \frac{ds(\xi_d)}{d\xi_d} = \delta$

где  $t \geq 0$ ;  $\xi_d(0) = 0$ ;  $s(0) = 0$ ;  $\delta$  – относительная осадка оттаявшего слоя грунта.

С учетом оседания дна согласно балансу объемов размывтого  $W_{pi}$  и аккумулярованного  $W_{ai}$  грунта  $W_{ai} = [1 - (\omega - n)] \cdot K_a \cdot W_{pi}$  при его льдистости  $\omega$ , пористости  $n$  и коэффициенте аккумуляции  $K_a$ , строится профиль берега в рассматриваемом створе с отмелью, поверхность которой аппроксимируется прямой линией в пределах размывающего действия волн.

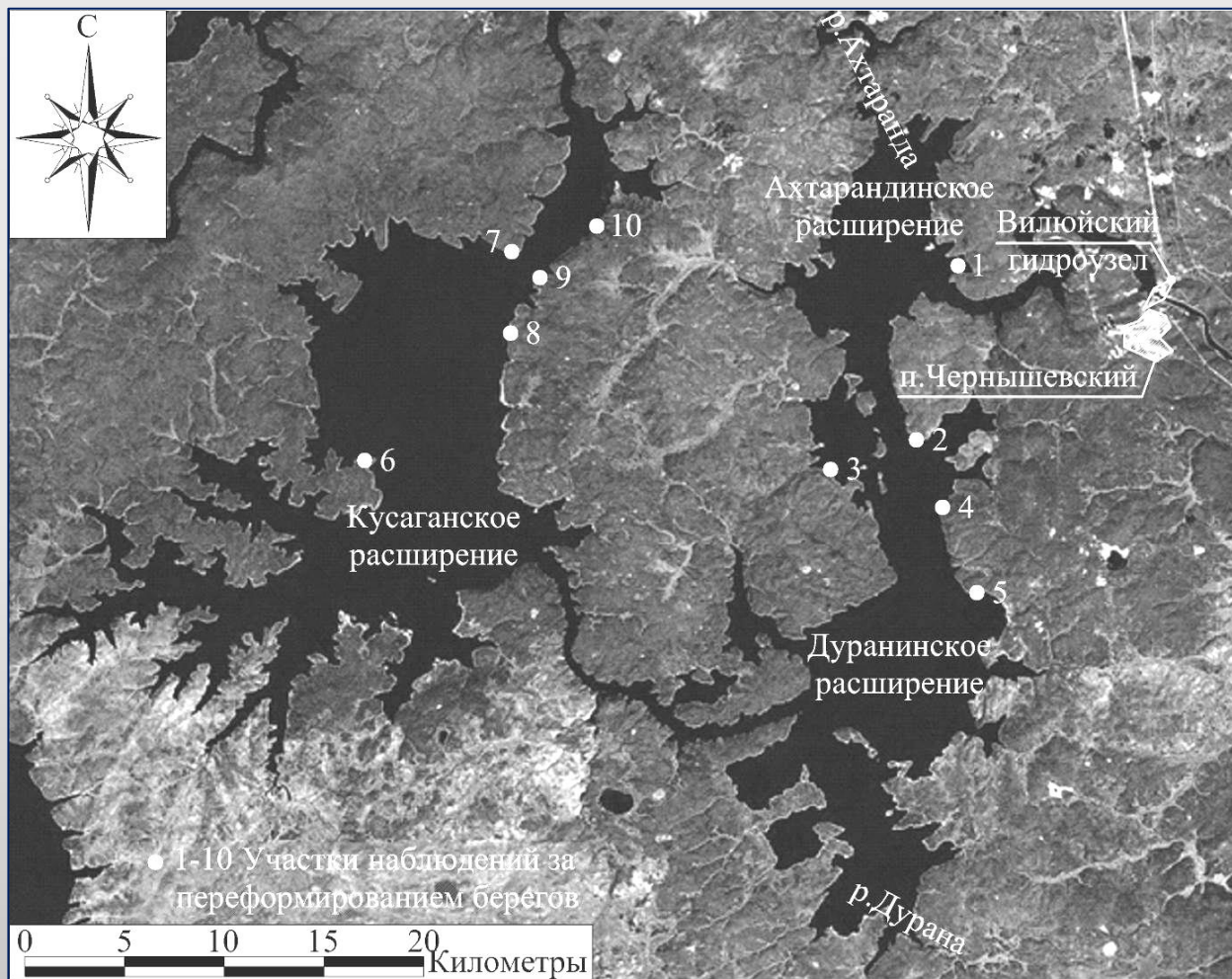
**Программное обеспечение.** Приведенная последовательность расчета переформирования термоабразионного берега водохранилища реализована на ЭВМ посредством программы «Берега», позволяющей получать прогнозные профили берега на заданные моменты времени. [Соболь И.С., 2011; Свидетельство о гос. рег. №2013612345, 2013].



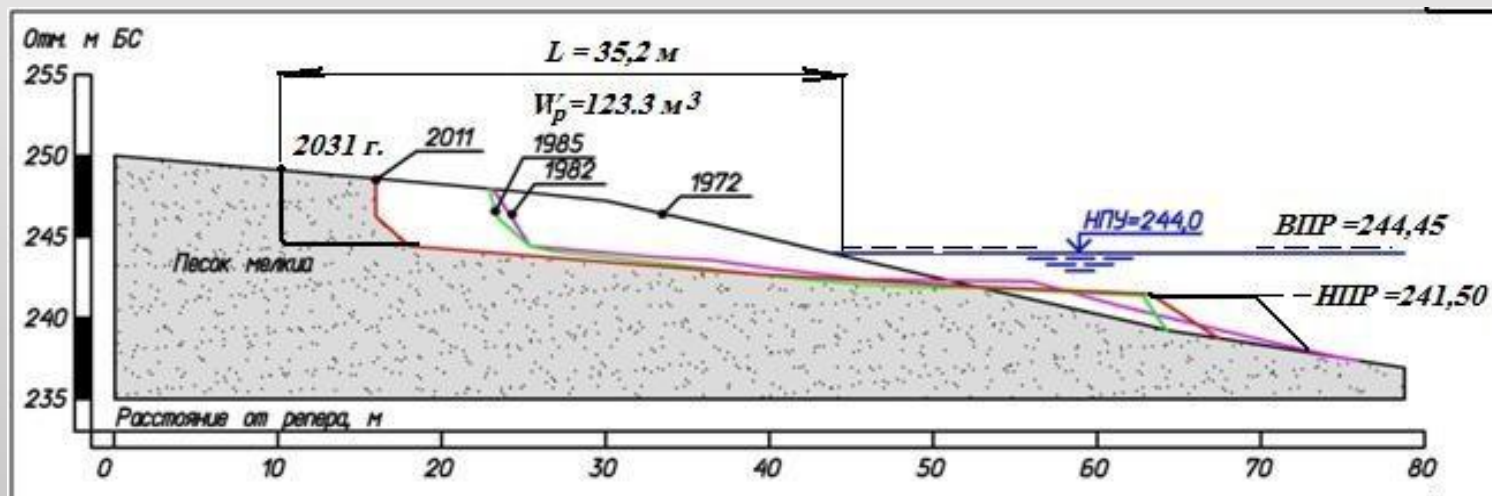
Программа «Берега». Окно модуля расчета переформирования термоабразионного берега на заданный срок



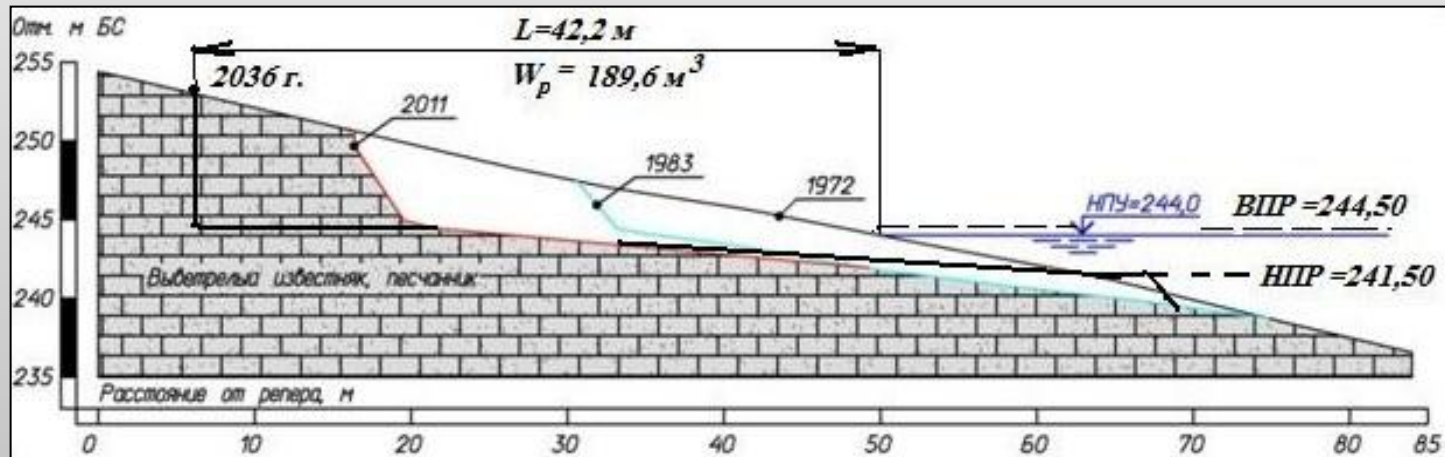
# Переформирование термоабразионных берегов Вилюйского водохранилища



Карта-схема расположения участков наблюдений и расчетов переформирования термоабразионных берегов Вилюйского водохранилища



Общий вид (2011 г.), наблюдаемые и прогнозные профили термоабразионного берега Вилюйского водохранилища на участке № 6 в створе № 2 в Кусаганском расширении



Общий вид (2011 г.), наблюдаемые и прогнозные профили термоабразионного берега Вилюйского водохранилища участке №7 в створе №1 вблизи устья Усть-Чонской трубы

Участок	№6	№7
Створ	№2	№1
<b>Исходные данные</b>		
Температура грунта берега, °С	– 4,6	– 4,6
Температура воды летом / зимой, °С	9,8 / 0,9	9,8 / 0,9
Продолжительность волнения, сутки	97	97
Энергия волнения, тыс. кДж/год на 1 м пог.	203860	412133
Высота рабочей волны, м	0,29	0,34
Верхний / нижний пределы размыва, м БС	244,45 / 241,50	244,50 / 241,50
Коэффициент размываемости оттаявшего грунта, м <sup>3</sup> /кДж	0,000009	0,0000065
Коэффициент аккумуляции продуктов размыва	0,15	0
Соппротивление мерзлого грунта разрыву $\delta_p$ , Па	117680	117680
<b>Результаты прогнозных расчетов</b>		
Отступление бровки берегового обрыва от начального положения уреза НПУ в 1972 г. (при t = 0), м	28,0 (t = 40,8 лет, 2012 г.)	33,4 (t = 39,5 лет, 2011г.)
	35,2 (t = 59,6 лет, 2031 г.)	42,2 (t = 64,6 лет, 2036 г.)
Период прогноза, лет	19 (2012 – 2031 гг.)	25 (2011 – 2036 гг.)
Средняя скорость отступления бровки берегового обрыва, м/год	0,37 (2012 – 2031 гг.)	0,35 (2011 – 2036 гг.)
Объем разрушенной породы от начала эксплуатации, м <sup>3</sup>	123,3 (2031 г.)	189,6 (2036г.)
Ширина прибрежной отмели, м	45,9 (2031 г.)	54,36 (2036 г.)
Средний уклон отмели	0,0218 (2031 г.)	0,0184 (2036 г.)
Глубина оттаивания основания, м	14,70 (2031 г.)	15,3 (2036 г.)
Осадка основания, м	1,18 (2031 г.)	1,22 (2036 г.)

На всем Вилюйском водохранилище наблюдаемые средние за 1972 – 2011 гг. скорости разрушения термоабразионных берегов в исследованных створах составили 0,35 – 1,41 м/год, а в 2010 – 2030 гг. по прогнозным оценкам уменьшатся до 0,35 – 0,50 м/год. Причем, наименьшим разрушениям в прошлом и будущем подвержены участки берегов, сложенных мелкими песками, а наибольшим – сильноветрелыми известняками и песчаниками.

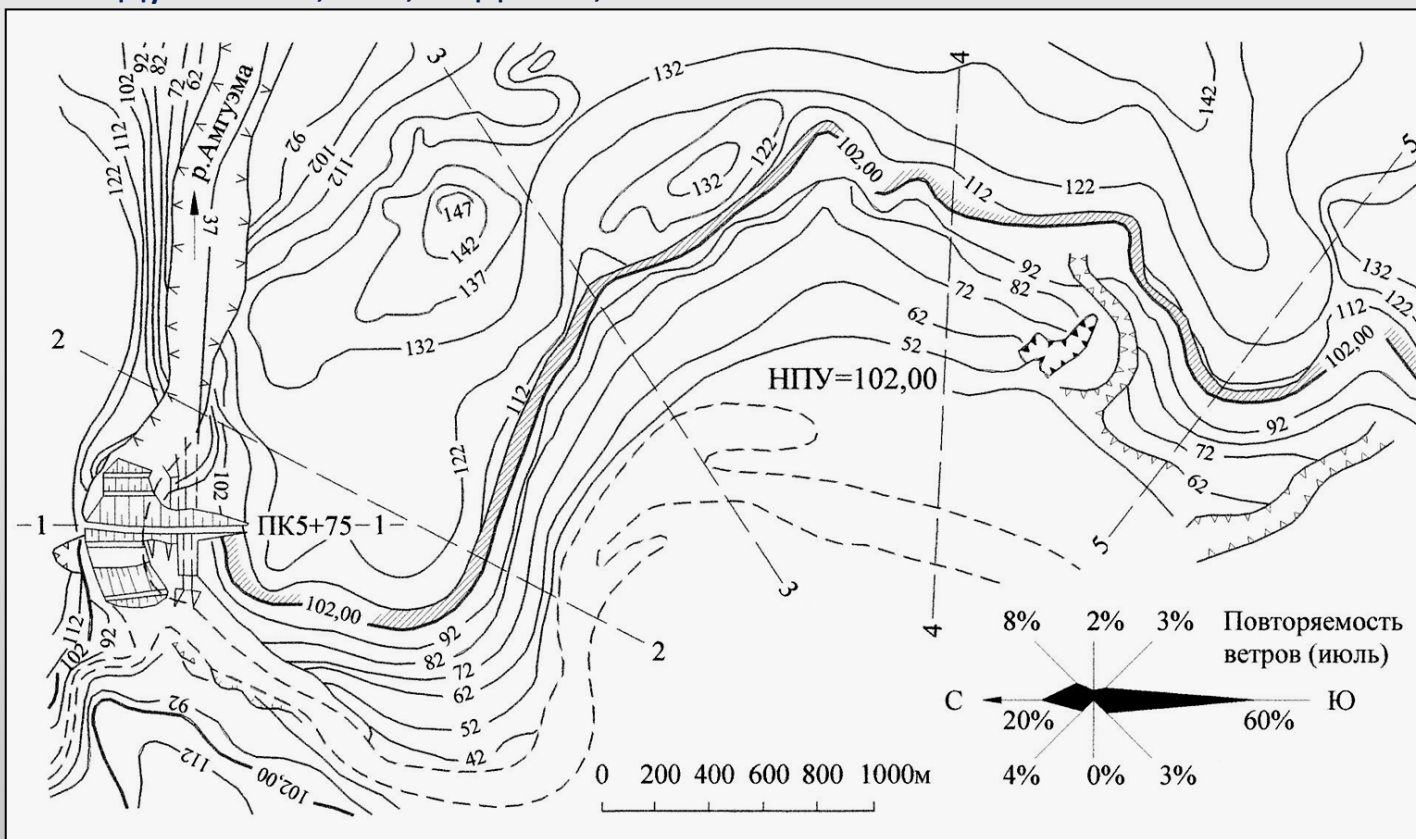
При незначительной протяженности размываемых берегов в 320 км (13% длины береговой линии) берегопереформирование не приведет к ощутимой потере земель в береговой зоне [Великин, 2013].

Посредством количественного анализа роли основных факторов в процессе береговой термоабразии выявлено, что скорость отступления надводного обрыва диктуется интенсивностью теплового взаимодействия воды водохранилища с мерзлым берегом, на регулирование которой начальная температура берега влияния почти не оказывает, тогда как существенно влияние температуры воды и продолжительности волнения.

# Переформирование термоабразионного берега проектировавшегося Амгуэмского водохранилища на р. Амгуэме

Водохранилище расположено на Чукотке в зоне сплошной вечной мерзлоты.

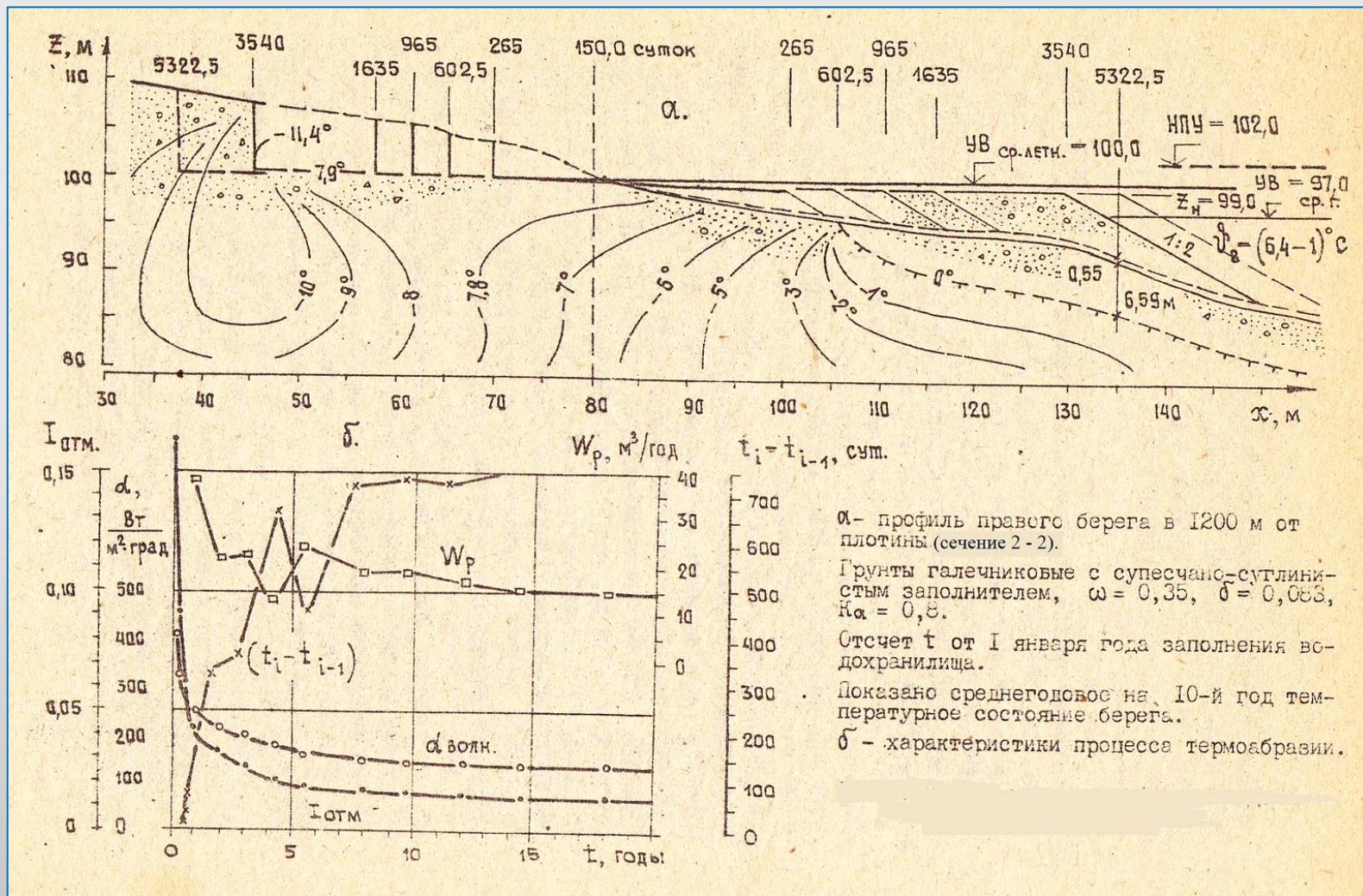
НПУ = 137,0 м БС (102,0 м усл.). Высота берега на 20 – 40 м выше НПУ. Площадь водохранилища 675 км<sup>3</sup>, средняя глубина 23,6 м, полный объем 15,95 км<sup>3</sup>. Среднегодовая температура воздуха – 11,8 °С, воды +2,8 °С.



План правого термоабразионного берега Амгуэмского водохранилища.

Отметки в условной шкале высот. Заштрихована зона разрушения берега за 20 лет эксплуатации водохранилища

За первые 5 лет берег отступит на 20 – 25 м, разрушаясь со средней скоростью 4,5 м/год, за 20 лет он отступит на 35 – 50 м.



Переформирование берега Амгуэмского водохранилища за 20 – летний период эксплуатации [Соболь С.В., 1992]

# Берегозащита на водохранилищах криолитозоны

- Принятие решений по осуществлению берегозащиты на водохранилищах криолитозоны возможно лишь для ограниченных по протяжению участков побережий с наиболее высокой степенью угрозы населению, социально-экономической структуре поселений и природной среде.
- Выполнение берегозащитных мероприятий в криолитозоне всегда будет требовать учета температурного режима.
- Эффективной может быть защита термоабразионных берегов искусственными волноустойчивыми пляжами.

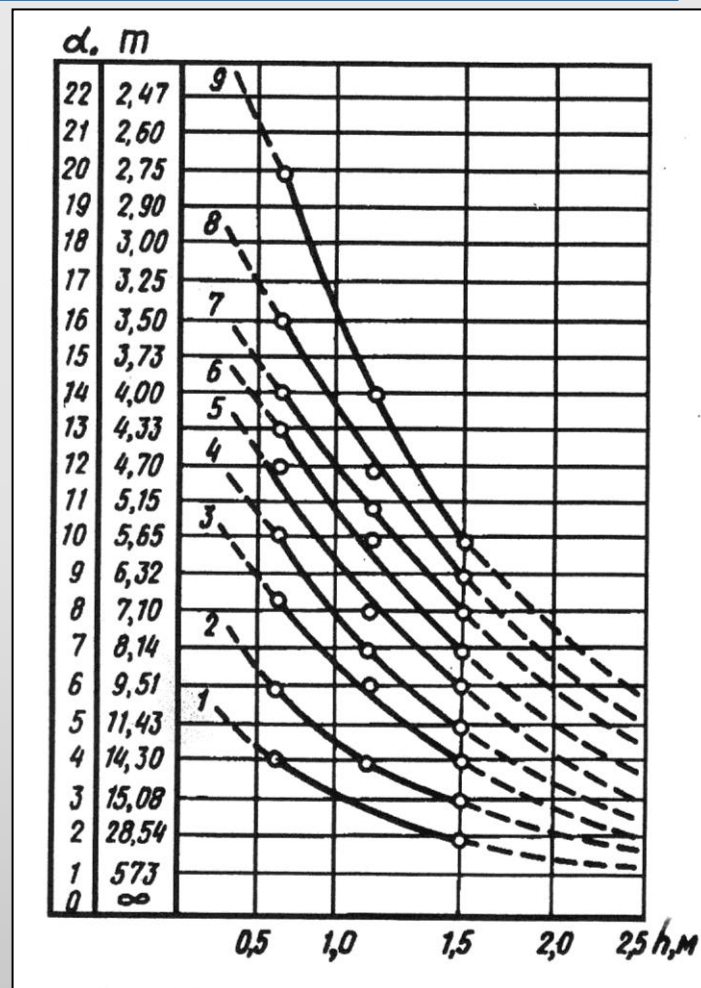


График для определения заложения  $m$  волноустойчивого откоса из различных грунтов:  
1 – глина; 2 – лесс; 3 – суглинок; 4 – мелкий песок;  
5 – средний песок; 6 – суглинок со щебнем и валуном;  
7 – крупный песок; 8 – гравий; 9 – галька

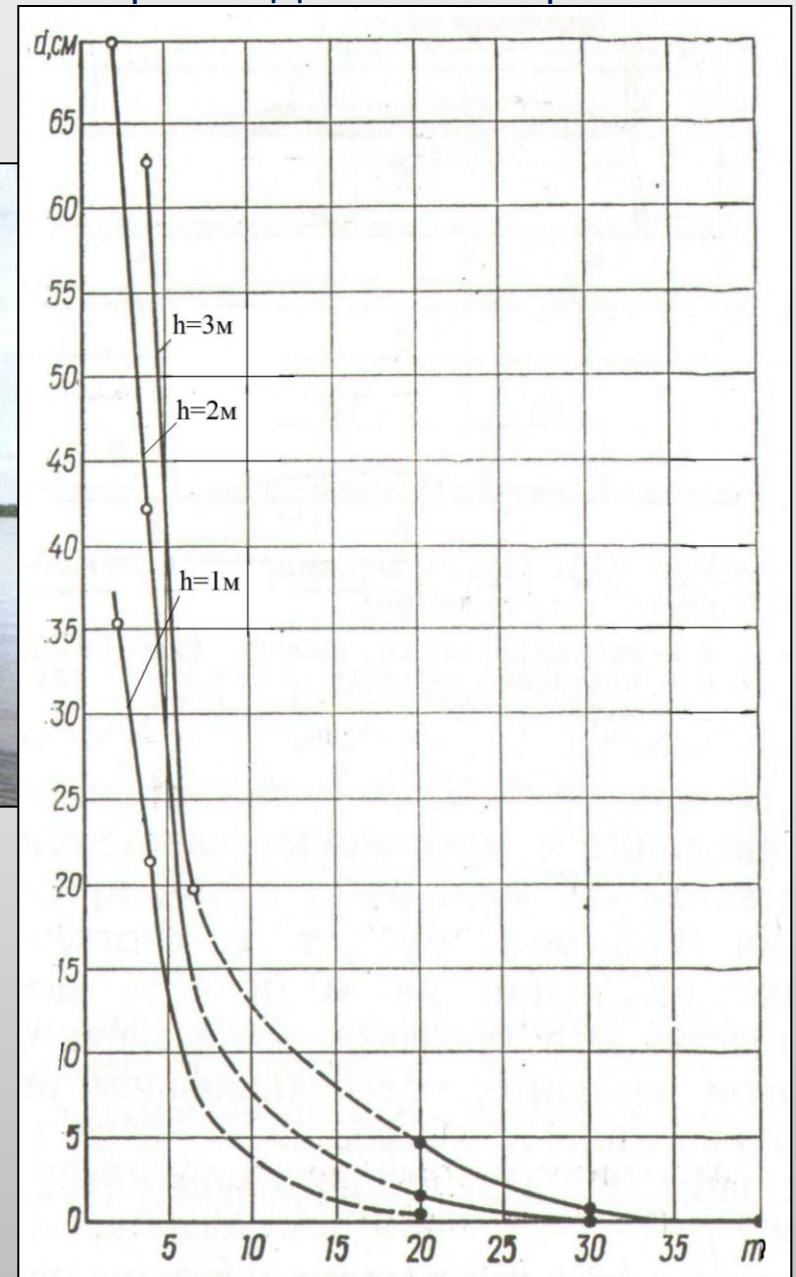


➤ Эффективна на берегах защитная роль каменной наброски. Для нее не страшны деформации, легко устраняемые добавлением камня.

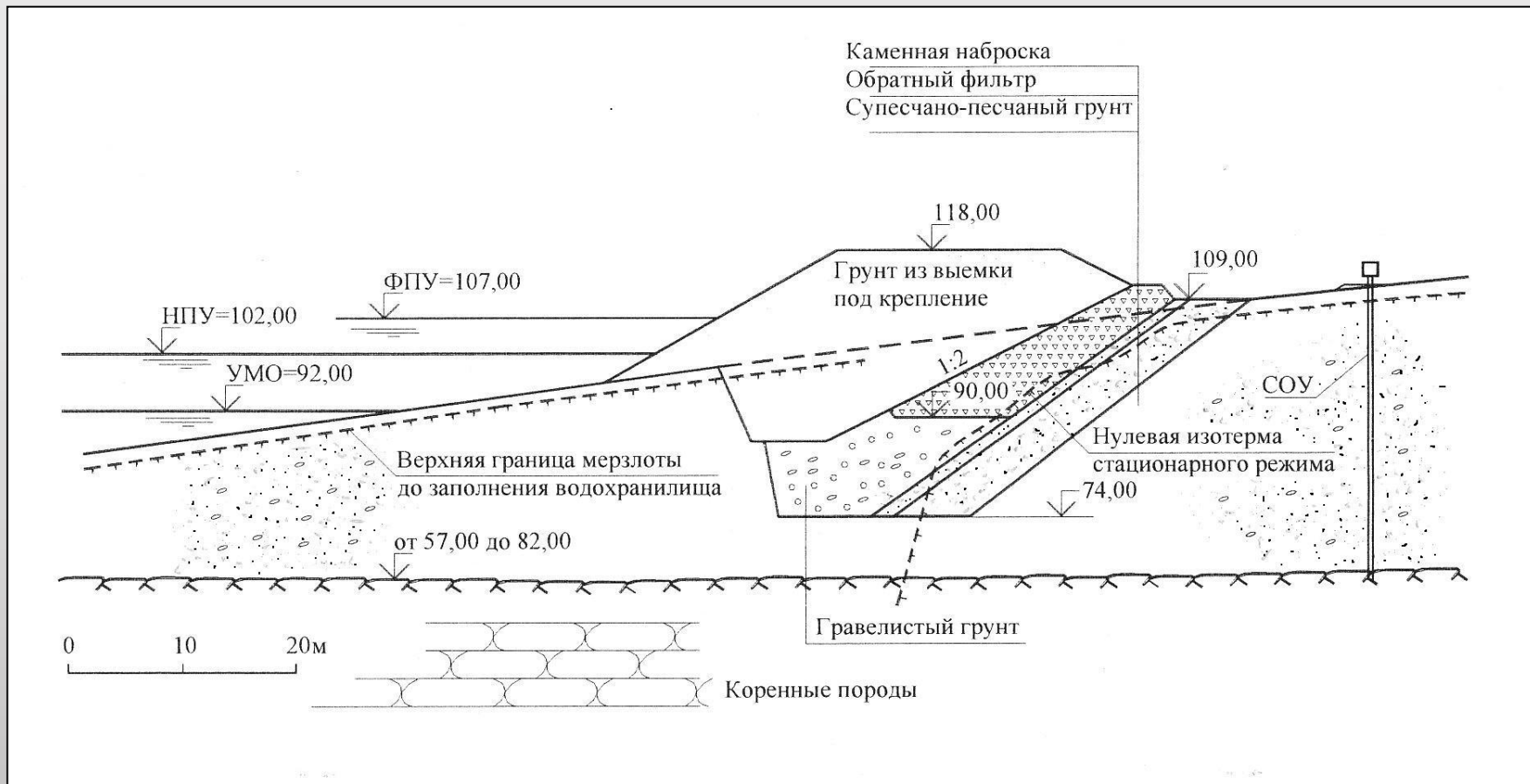


Вид берегоукрепления из каменной наброски

Зависимость крупности материала каменного крепления  $d$  от коэффициента откоса  $m$  и высоты волны  $h$



В проекте Амгуэмской ГЭС рассматривалось укрепление берега водохранилище на протяжении 6,5 км талой призмой из песчано-гравелистого грунта и камня. Позади призмы на участках длиной 3,5 км предусматривалось мерзлотная завеса, создаваемая СОУ. Стоимость берегозащиты оценивалась в 196 % от стоимости основных сооружений гидроузла [Соболь СВ, 2007].



Крепление берега Амгуэмского водохранилища

# Изменение морфометрических параметров водохранилищ криолитозоны в период эксплуатации

Изменение со временем морфометрических параметров водохранилищ области вечной мерзлоты определяют процессы переформирования термоэрозионных берегов и трансформации ложа вследствие тепловой осадки:

$$F(Z_B, t) = F_0(Z_B) \pm \Delta F_B(Z_B, t);$$

$$L(Z_B, t) = L_0(Z_B) \pm \Delta L_B(Z_B, t);$$

$$W(Z_B, t) = W_0(Z_B) - W_a(Z_B, t) + W_{oc}(Z_B, t),$$

где  $F, L, W$  – площадь зеркала, длина береговой линии и объем чаши, зависящие от уровня водохранилища  $Z_B$  и времени его эксплуатации  $t$ ;

$F_0, L_0, W_0$  – то же в момент начала нормальной эксплуатации (проектные);

$\Delta F_B, \Delta L_B$  – площадь зеркала и длина береговой линии, зависящие от переформирования берегов;

$W_a$  – объем аккумуляции наносов и продуктов разрушения берегов в водохранилище (величина незначительная из-за малой мутности северных рек);

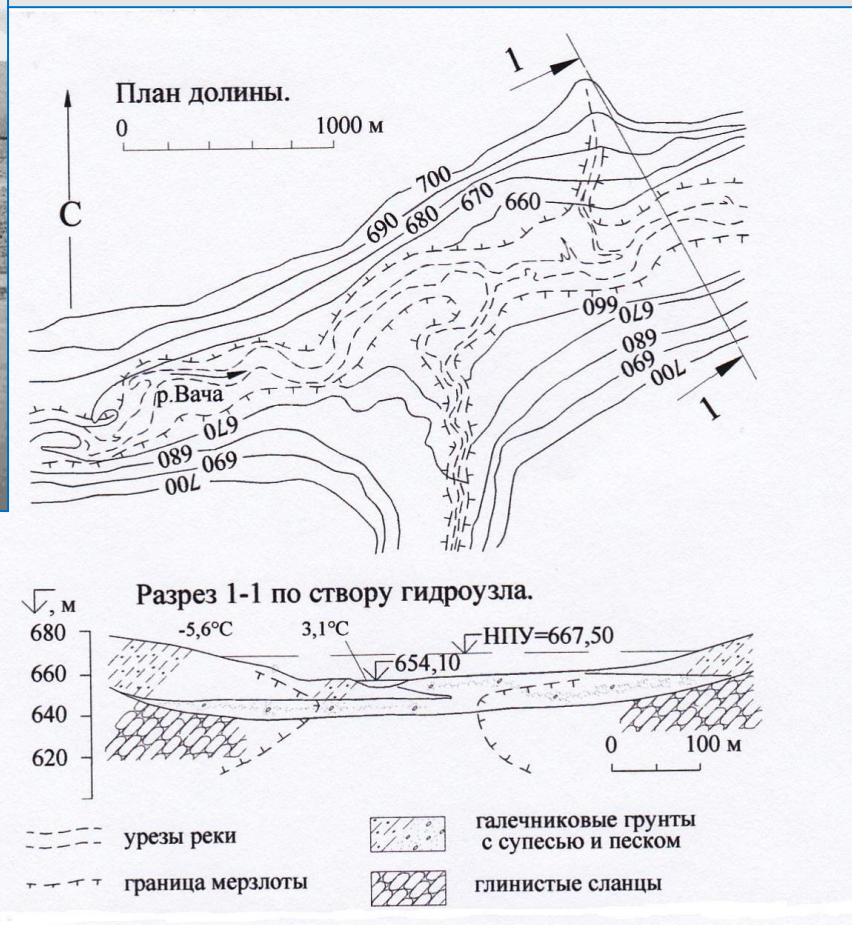
$W_{oc}$  – объем тепловой осадки ложа водохранилища.

Значения  $\Delta F_B(Z_B, t), \Delta L_B(Z_B, t), W_a(Z_B, t), W_{oc}(Z_B, t)$  определяются в результате натурных наблюдений и прогнозных расчетов.

**Проделанная работа** [Румянцев, 2014]

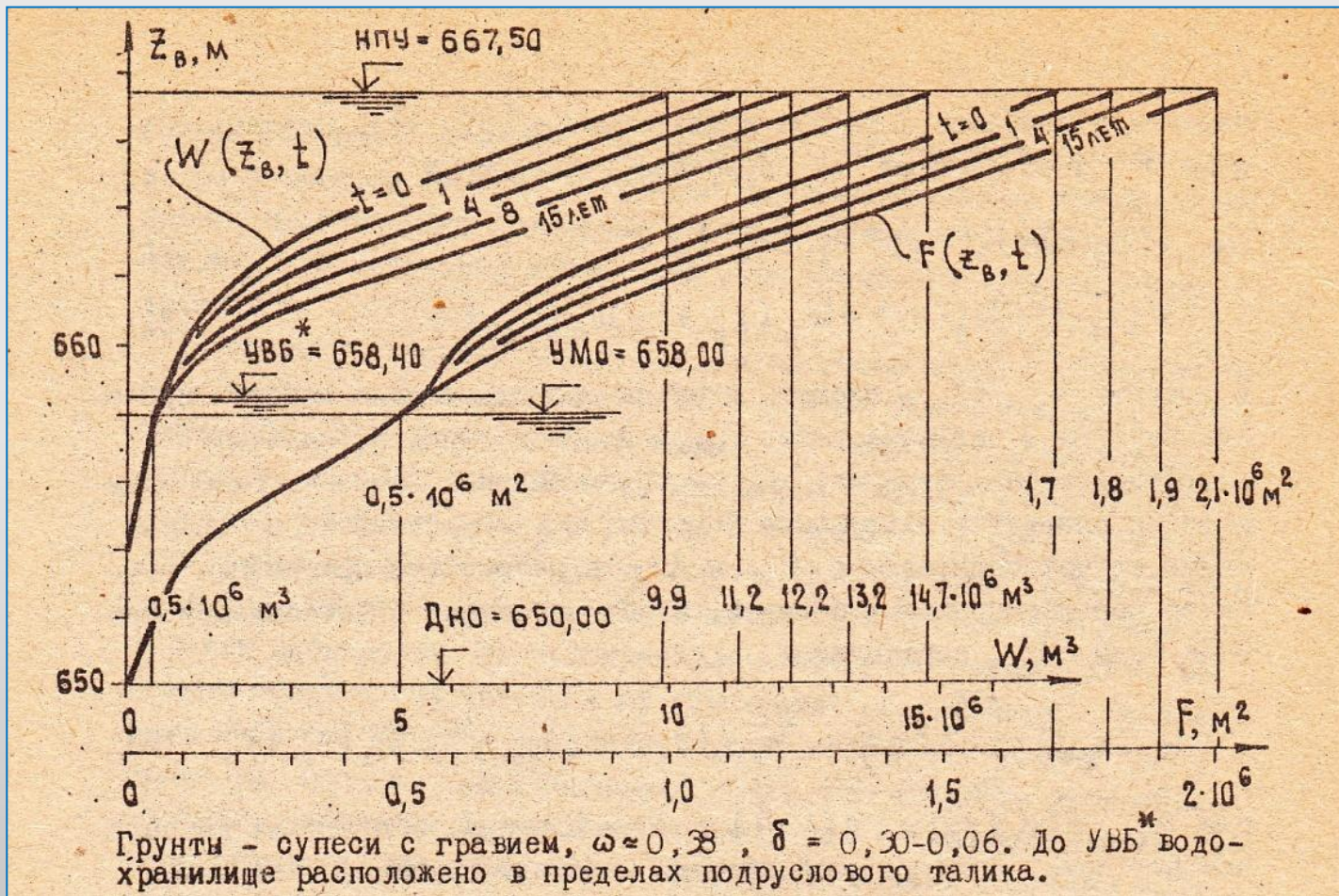
- Выполнены расчетные оценки деградации мерзлоты и оседания ложа 6 больших и 15 малых водохранилищ криолитозоны.
- Синтезированы общие закономерности приращения объема в зависимости от возраста.

**Пример расчетной оценки** изменения морфометрических параметров водохранилища, проектировавшегося в долине р. Вача на севере Иркутской области: проектные площадь зеркала водохранилища  $1,7 \text{ км}^2$ , полный объем  $9,9 \text{ млн м}^3$ .



Общий вид и мерзлотные условия долины р. Вачи.

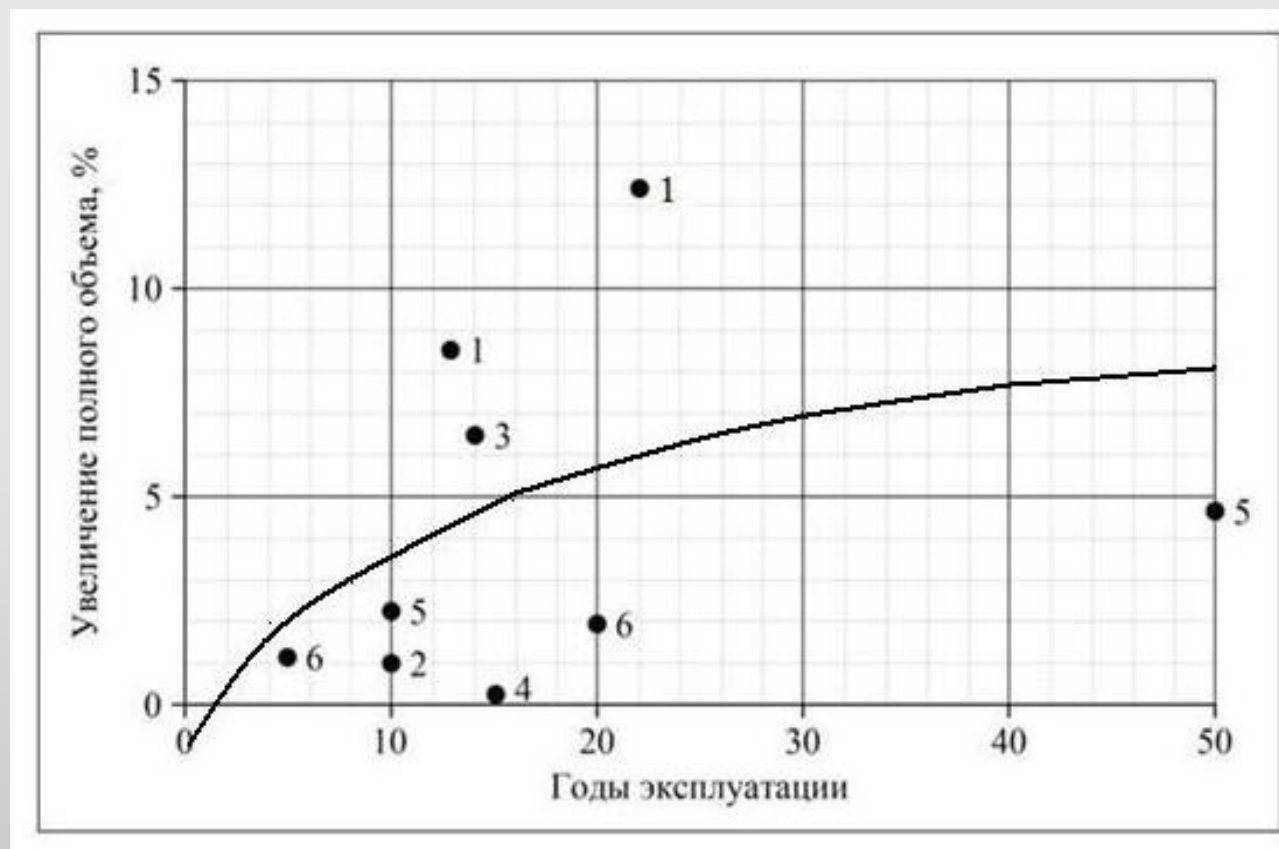
За 15 лет эксплуатации вследствие оседания ложа и переформирования берегов полный объем водохранилища на р. Ваца может увеличиться с 9,9 до 14,7 млн м<sup>3</sup> (на 48 %), а площадь зеркала с 1,7 до 2,0 км<sup>2</sup> (на 17,6 %).



Изменение со временем морфометрических параметров водохранилища на р. Ваца

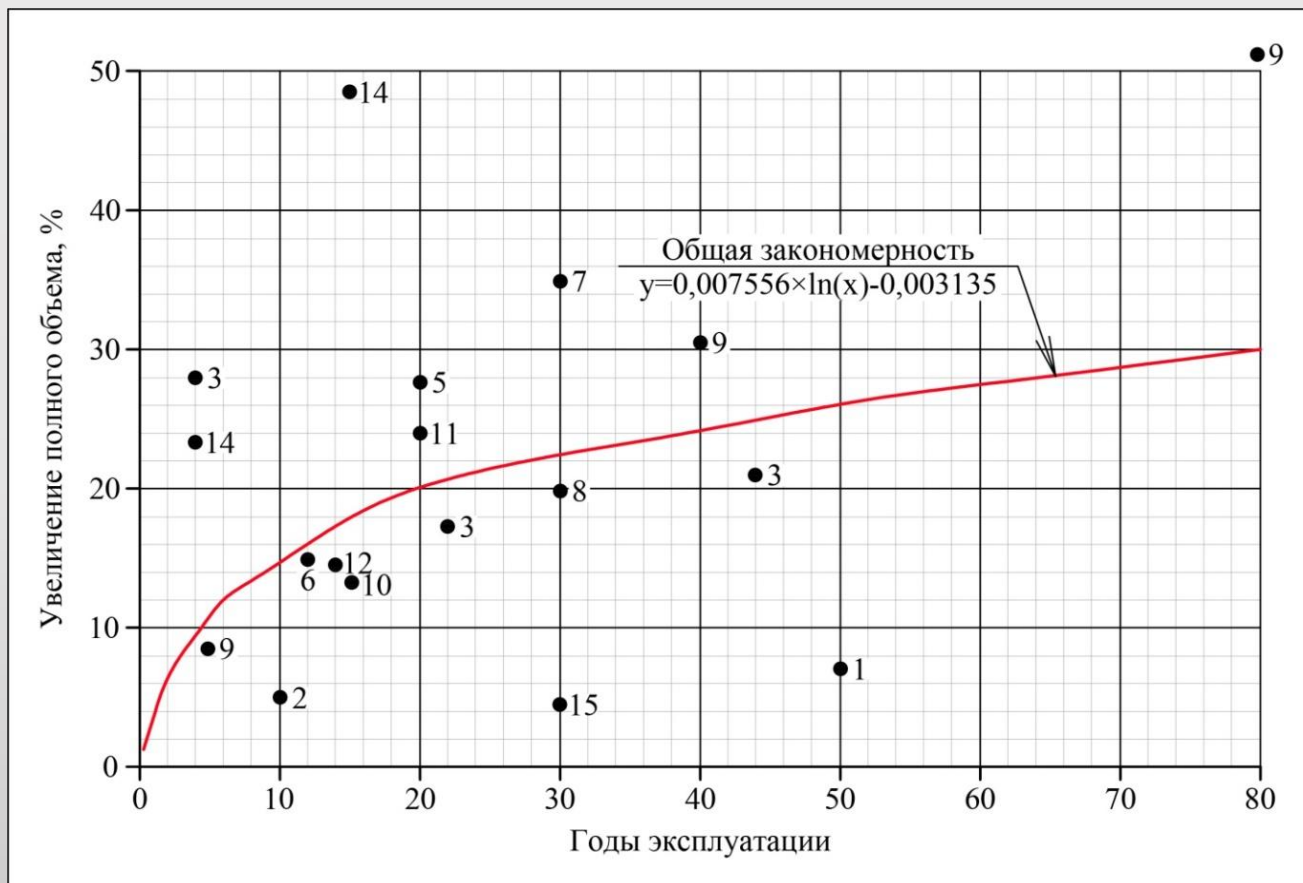
## Общая закономерность изменения объема больших водохранилищ:

водохранилища ГЭС криолитозоны за 20 – 40 лет эксплуатации могут естественным образом увеличить свой полный объем в среднем на 6 – 8 % с последующей стабилизацией ситуации.



Возможное увеличение со временем полного объема водохранилищ ГЭС в области вечной мерзлоты по оценочным данным : 1 – Усть –Хантайское; 2 – Курейское; 3 – Колымское; 4 – Вилюйское; 5 – Эвенкийское; 6 – Амгуэмское

**Общая закономерность изменения объема малых водохранилищ:** за три десятилетия эксплуатации протаивают покровные слои мягких просадочных грунтов в зонах затоплений; средний предел увеличения емкости чаш малых водохранилищ составляет 20 % от полного объема.



Возможное увеличение полного объема малых водохранилищ в области вечной мерзлоты по оценочным данным. Водоохранилища: 1 – на р. Долгой; 2 – Аркагалинское; 3 – Анадырское; 4 – на р. Каменушке; 5 – Иреляхское; 6 – Кадыкчанское; 7 – Певекское; 8 – на р. Ойуур-Юреге; 9 – Билибинское; 10 – Сытыканское; 11 – на р. Мархе; 12 – на р. Уэся-Лиендокит; 13 – на р. Эбэлэх; 14 – на р. Ваче; 15 – на р. Ханмей

# Заключение



Использован плакат Р. Дементьева «На стройки семилетки!» (1959)



# Список литературы

- Алексеев, В.Р. В краю вечного холода: записки географа-мерзлотоведа / В.Р. Алексеев. - Новосибирск: Издательство "ГЕО", 2010. - 393 с.
- Алексеев, В.Р. Мы живем на вечной мерзлоте / В.Р. Алексеев. - Якутск: Издательство ИМ СО РАН, 2011. - 36 с.
- Алексеев, В.Р. Наледеведение: словарь-справочник / В.Р. Алексеев. - Новосибирск: Издательство СО РАН, 2007. - 438 с.
- Анисимов, Л.И. Температурное состояние плотины на озере Долгом / Л.И. Анисимов, С.В. Соболев // Известия вузов. Строительство и архитектура, 1978. - №7. - с. 108-110.
- Анискин, Н.А. Исследование фильтрационного режима оснований высоких плотин на математических моделях / Н.А. Анискин, А.С. Антонов, Ю.Н. Мгалобелов, А.В. Дейнеко // Вестник МГСУ, 2014. - №10. - с. 165-179.
- Балагуров, Б.Ф. Прогнозирование ледотермического режима бьефов Адычанского гидроузла / Б.Ф. Балагуров, Г.Н. Нисар-Мухамедов // Материалы конференций и совещаний по гидротехнике. Ледотермические проблемы в северном гидротехническом строительстве и вопросы продления навигации. - Л.: Энергоатомиздат, 1989. - с. 28-32.
- Белов, А.Н. Прогноз температурного состояния гидротехнических сооружений гидроузла на ручье Уэся-Лиендокит (Республика Саха) / А.Н. Белов, Е.Н. Горохов, В.М. Шапкин. // Приволжский научный журнал, 2010. - №4. - с. 94-98.
- Битюрин, А.К. Изменение температурного поля долин водотоков после создания водохранилищ в условиях криолитозоны / А.К. Битюрин, С.В. Соболев, А.В. Февралев // Колыма, 1993. - №7. - с. 15-18.

- Битюрин, А.К. Методическое обеспечение инженерных расчетов температурно-фильтрационного режима гидроузлов в условиях вечной мерзлоты на ЭВМ / А.К. Битюрин, С.В. Соболев // Гидротехническое строительство, 1993. - №11. - с. 22-24.
- Битюрин, А.К. Программное обеспечение инженерных расчетов взаимодействия гидроузлов с природной средой в условиях Севера / А.К. Битюрин, С.В. Соболев // Колыма, 1994. - №6. - с. 26-28.
- Битюрин, А.К. Температурный режим каменнонабросных плотин, проектируемых для условий Крайнего Севера / А.К. Битюрин, В.Н. Грандилевский, С.В. Соболев // Проблемы инженерно-геологических изысканий в криолитозоне. - Магадан, 1989. - с. 318-320.
- Битюрин, А.К. Численное моделирование термокарста / А.К. Битюрин, С.В. Соболев // Известия вузов. Энергетика, 1991. - №12. - с. 80-84.
- Биянов, Г.Ф. Плотины на вечной мерзлоте / Г.Ф. Биянов. - М.: Энергоатомиздат, 1983. - 176 с.
- Богословский, П.А. О строительстве земляных плотин в районах распространения многолетнемерзлых грунтов / П.А. Богословский. // Труды ГИСИ, 1958. - Вып. 29. - с. 3-34.
- Богословский, П.А. Прогноз температурно-влажностного режима каменно-земляной плотины / П.А. Богословский, Е.Н. Горохов, В.А. Жданов, С.В. Соболев, А.В. Февралев // Проблемы инженерного мерзлотоведения в гидротехническом строительстве. - М.: Наука, 1986. - с. 89-96.

- Богословский, П.А. Расчет многолетних изменений температуры земляных плотин, основанных на толще мерзлых грунтов / П.А. Богословский // Труды Горьковского инженер.-строит. ин-та им. В.П. Чкалова. - Горький, 1957. - Вып. 27. - с. 123 - 178.
- Богословский, П.А. Сопоставление прогноза температурного режима ядра русловой плотины Усть-Хантайской ГЭС с натурными наблюдениями: материалы конференций и совещаний по гидротехнике / П.А. Богословский, С.В. Соболев, А.В. Февралев // Исследование, проектирование, строительство и эксплуатация гидротехнических сооружений на Крайнем Севере и в районах распространения вечной мерзлоты. - Л.: Энергия, 1982. - с. 242-244.
- Богословский, П.А. Температурный режим грунтового ядра каменнонабросной плотины Усть-Хантайской гидроэлектростанции / П.А. Богословский, С.В. Соболев, А.В. Февралев // Научные исследования по гидротехнике в 1975 году. - Л.: ВНИИГ, 1976. - Том I. - с. 150-151.
- Бурлаков, В.М. Районирование Вилюйского водохранилища. Типизация и классификация его берегов / В.М. Бурлаков // Влияние ГЭС на окружающую среду: сб. науч. тр. Сиб. отд-ния Акад. наук СССР. - Якутск, 1987. - с. 34-42.
- Бучко, Н.А. Искусственное замораживание грунтов: обзор / Н.А. Бучко, В.А. Турчина. - М.: Информэнерго, 1978. - 64 с.
- Вайнберг, А.И. Новая конструкция высокой каменнонабросной плотины с асфальтовой диафрагмой в суровых климатических условиях / А.И. Вайнберг, Ю.А. Ландау // Гидротехническое строительство, 2015. - №1. - с. 13-23.

- Васильев, Н.К. Водоупорные элементы грунтовых плотин в северной строительной-климатической зоне с использованием грунтово-криогелевых композитов / Н.К. Васильев, В.Б. Глаговский, А.А. Иванова, И.Н. Шаталина // Гидротехническое строительство, 2013. - №11. - с. 19-23.
- Вдовин, Ю.И. Водоснабжение на Севере / Ю.И. Вдовин. - Л.: Стройиздат, 1987 - 166 с.
- Великин, С.А. Результаты инструментальных наблюдений и адаптивного прогноза термоабразии берегов Вилюйского водохранилища / С.А. Великин, И.С. Соболев, С.В. Соболев, Д.Н. Хохлов // Гидротехническое строительство, 2013. - №6. - с. 2-8.
- Гнетов, Е.А. Модель температурно-криогенного режима ложа водохранилища в криолитозоне с учетом осадки дна при оттаивании в трехмерных условиях / Е.А. Гнетов // Приволжский научный журнал, 2016 - №4. - с. 85-89.
- Гнетов, Е.А. Трансформация чаши водохранилища в вечномерзлых грунтах за многолетний период эксплуатации по изысканиям и прогнозу / Е.А. Гнетов, Е.Н. Горохов, Н.Ф. Кривоногова, И.С. Соболев, С.В. Соболев, Д.К. Федоров // Приволжский научный журнал, 2013. - №4. - с. 91-99.
- Гоголев, Е.С. Разрушение пологих берегов и увеличение объема водохранилищ, расположенных в районах Крайнего Севера / Е.С. Гоголев, А.Н. Красавин // Энергетическое строительство, 1984. - №11. - с. 42-72.
- Гоголев, Е.С. Расчет оттаивания вечномерзлого грунта ложа водохранилища с учетом осадки / Е.С. Гоголев, С.В. Соболев // Известия вузов. Энергетика, 1986. - №5. - с. 102-104.

- Горохов, Е.Н. Виртуальная модель температурно-криогенного режима основания и оседания ложа водохранилища в криолитозоне / Е.Г. Горохов, И.С. Соболев, В.И. Логинов, Е.А. Гнетов // Приволжский научный журнал, 2013. - №4. - с. 37-47.
- Горохов, Е.Н. Виртуальные 3D-модели температурно-криогенного режима плотин в криолитозоне / Е.Н. Горохов // Приволжский научный журнал, 2012. - №3. - с. 188-193.
- Горохов, Е.Н. Метод расчета температурного режима каменно-земляной плотины с учетом сублимационного ледонакопления в наброске / Е.Н. Горохов. //Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1986. - Том 188. - с. 74-80.
- Горохов, Е.Н. Обеспечение экологической безопасности нефтепровода "Восточная Сибирь - Тихий океан" на участках, проложенных в многолетнемерзлых грунтах / Е.Н. Горохов, Е.В. Копосов, С.В. Соболев, В.И. Ларионов, М.А. Козлов, А.А. Маленов // Приволжский научный журнал, 2011. - №3. - с. 158-164.
- Горохов, Е.Н. Программный комплекс NORD трехмерного моделирования температурного режима каменно-земляных плотин / Е.Н. Горохов, В.И. Логинов // Инженерно-геологические изыскания и исследования в криолитозоне - теория, методология, практика: материалы международ. конф. - С. - Петербург: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2000. - с. 64-73.
- Горохов, Е.Н. Теория и метод расчета температурно-криогенного режима плотин из каменной наброски в криолитозоне / Е.Н. Горохов // Известия вузов. Сер. "Строительство", 2005. - №9. - с. 32-39.
- Горохов, М.Е. Регулирование температурно-фильтрационного режима каменно-земляных плотин путем управления конвекцией воздуха в низовой призме / М.Е. Горохов // Приволжский научный журнал, 2009. - №1. - с. 66-71.

- ГОСТ 1919-73. Гидрология суши. Термины и определения.
- Гулый, С.А. Анализ работы плотины, перешедшей с мерзлого на талый тип эксплуатации (на примере плотины АрГРЭС на р. Мянундже / С.А. Гулый // Проблемы инженерного мерзлотоведения: материалы IX международного симпозиума 3-7 сентября 2011 г., г. Мирный, Россия. - Якутск: Издательство ИМ СО РАН, 2011. - с. 237-242.
- Дегтярев, В.В. Гидротехническое строительство водных путей Якутского транспортного узла / В.В. Дегтярев, Ю.А. Долженко, В.А. Шлычков. - Новосибирск: ННГАСУ (Сибстрин), 2007. - 352 с.
- Джон, Б. Зимы нашей планеты: пер. с англ. / Б. Джон, Э. Дербишир, Г. Янг, Р. Фейрбридж. - М.: Мир, 1982. - 336 с.
- Долгих, С.Н. Прогнозное математическое моделирование грунтовых гидротехнических сооружений акционерной компании "Алмазы России - Саха" / С.Н. Долгих, С.В. Соболев, Е.Н. Горохов, И.С. Соболев, Н.Ю. Шулаков, М.Е. Горохов, А.Н. Белов, В.И. Логинов // Приволжский научный журнал, 2007. - №3. - с. 35-42.
- Ерахтин, Б.М. Использование гидроэнергетического потенциала северных рек для гидроэлектрификации страны / Б.М. Ерахтин, И.С. Соболев, С.В. Соболев, А.В. Февралев // Приволжский научный журнал, 2007. - №3. - с. 13-34.
- Заирова, В.А. Выбор противofильтрационного устройства в вариантах плотин Канкунского гидроузла / В.А. Заирова, Е.А. Филиппова, Р.Н. Онищук, А.Д. Созинов // Гидротехническое строительство, 2010. - №2. - с. 8-13.
- Иванов, Н.С. Теплофизические свойства мерзлых горных пород / Н.С. Иванов, Р.И. Гаврильев. - М.: Наука, 1965. - 74 с.

- Инструкция по проектированию гидротехнических сооружений в районах распространения вечномёрзлых грунтов / ВСН 30-83 Минэнерго СССР. - Л.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1983. - 100 с.
- Исаченко, В.П. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. - М.: Энергия, 1969. - 430 с.
- Когодовский, О.А. Гидроэнергетика Крайнего Северо-Востока / О.А. Когодовский, Ю.И. Фриштер. - М.: Энергоатомиздат, 1996. - 304 с.
- Константинов, И.П. О формировании берегов в области вечной мерзлоты (на примере Вилюйского водохранилища) / И.П. Константинов, В.Л. Суходревский // Изучение берегов водохранилищ Сибири. - Новосибирск, 1977. - с. 62-72.
- Кривоногова, Н.Ф. Особенности переработки берегов водохранилищ в криолитозоне / Н.Ф. Кривоногова, Л.И. Свительская, Д.К. Федоров // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. - Санкт - Петербург, 2009. - Т. 255. - с. 25-33.
- Кроник, Я.А. Переформирование чаши и берегов искусственных водохранилищ в криолитозоне / Я.А. Кроник, Т.С. Оникиенко // Инженерная геология, 1980. - №3. - с. 120-129.
- Кудояров, Л.И. Плотины из грунтовых материалов в районах Крайнего Севера и вечной мерзлоты / Л.И. Кудояров, М.П. Павчич, В.Г. Радченко, В.А. Турчина, Г.С. Шадрин. - Ленинград: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1973. - 132 с.
- Кузнецов, Г.И. Накопители промышленных отходов: учебное пособие / Г.И. Кузнецов, Н.В. Балацкая, Д.А. Озерский. - Красноярск: ИПК СФУ, 2008. - 180 с.



- Куницкий, В.В. Геокриологические условия территории Эвенкийского гидроузла на реке Нижняя Тунгуска. Прогнозная оценка влияний при строительстве водохранилища / В.В. Куницкий, С.О. Разумов, Г.П. Кузьмин, Р.В. Чжан. - Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО РАН, 2011. - 6 с.
- Куперман, В.Л. Гидротехническое строительство на севере / В.Л. Куперман, Ю.Н. Мызников, Л.Н. Торопов. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 304 с.
- Лапин, Г.Г. О темпах развития гидроэнергетики в России / Г.Г. Лапин // Гидротехническое строительство, 2011. - №1. - с. 2-6.
- Левачев, С.Н. Порт Сабетта - арктические ворота для транспортировки СПГ / С.Н. Левачев, И.Г. Контаржи, Л.В. Овчинников // Гидротехническое строительство, 2016. - №12. - с. 34-42.
- Лыков, А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. - М.: Высшая школа, 1967. - 600 с.
- Макаров, В.И. Термосифоны в северном строительстве / В.И. Макаров. - Новосибирск: Наука, 1985. - 168 с.
- Немцев, З.Ф. Безмашинное замораживание грунтов / З.Ф. Немцев, А.С. Шинкарев, Е.Ф. Сидоров. - Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1985. - 68 с.
- Низконапорные гидроузлы криолитозоны Якутии: рекомендации по проектированию и строительству / Р.В. Чжан, Г.И. Кузнецов, В.В. Шепелев, Г.П. Кузьмин, Д.М. Шестернев, Г.Ф. Биянов, Б.М. Козьмин, О.И. Алексеева, С.А. Великин, Г.В. Мелкозеров; отв. ред. Ю.М. Гончаров.- Якутск: ФГБУН Ин-т мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 2012. - 124 с.
- Общее мерзлотоведение / Под ред. В.А. Кудрявцева. - М.: МГУ, 1978. - 464 с.

- Оникиенко, Т.С. Уточнение связи объемов и уровней водохранилища Усть-Хантайской ГЭС / Т.С. Оникиенко // Гидротехническое строительство, 1955. - №3 – с.19 -23 .
- Панов, С.И. Научные аспекты гидротехники Крайнего Севера / С.И. Панов, Н.Ф. Кривоногова // Гидротехническое строительство, 2011. - №9. - с. 55-59.
- Панов, С.И. Основные направления деятельности АО "ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева" в области обеспечения безопасности гидротехнических сооружений / С.И. Панов, Е.А. Филиппова, В.С. Кузнецов, Д.В. Мишин, О.А. Буряков, А.Г. Василевский, А.Б. Бочаров, Ю.Г. Ротченко // Гидротехническое строительство, 2016. - №8. - с. 66-71.
- Паршев, А.П. Почему Россия не Америка: научное издание / А.П. Паршев. - М.: Крымский мост - 9Д, 2003. - 412 с.
- Плят, Ш.Н. Расчеты температурных полей гидросооружений / Ш.Н. Плят. - М.: Энергия, 1974. - 408 с.
- Проектирование плотин для оросительных мелиораций в Центральной Якутии / Отв. редактор Р.М. Каменский, Институт мерзлотоведения СО РАН. - Якутск: кн. изд-во, 1976. - 236 с.
- Рабочий учебный план подготовки магистров по направлению 08.04.01 Строительство профиль Гидротехническое строительство. - Н. Новгород: ННГАСУ, 2016.
- Рассказов, Л.Н. Гидротехнические сооружения: учеб. для вузов. В 2 частях / Л.Н. Рассказов, В.Г. Орехов, Н.А. Анискин, В.В. Малаханов, А.С. Бестужева, М.П. Саинов, П.В. Солдатов, В.В. Толстиков. - М.: Издательство АСВ, 2008. - Часть 1. - 576 с., Часть 2. - 528 с.

- Рекомендации по расчетам температурного режима плотин из грунтовых материалов, возводимых в северной строительной-климатической зоне / П 15-84 ВНИИГ. - Л.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1985. - 58 с.
- Руководство по проектированию плотин из грунтовых материалов, возводимых в северной строительной-климатической зоне / П 48-76 ВНИИГ. - Л.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1976. - 64 с.
- Румянцев, И.С. Изменение объема равнинных водохранилищ на эксплуатационной фазе жизненного цикла / И.С. Румянцев, И.С. Соболев, С.В. Соболев // Гидротехническое строительство, 2014. - №3. - с. 2-9.
- Сальва, А.М. Магистральный водовод р. Лена - озеро-водохранилище Туора Кюель - р. Татта в Центральной Якутии / А.М. Сальва // Гидротехническое строительство, 2016. - №3. - с. 23-26.
- Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012617703: Программный комплекс трехмерного моделирования температурно-криогенного режима каменно-земляных плотин (Nord - 3D) / Е.Н. Горохов, М.Е. Горохов, В.И. Логинов; Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т. - Н. Новгород, 2012.
- Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013612345: Программа для инженерных расчетов переформирования берегов водохранилищ "Берега" / И.С. Соболев, Д.Н. Хохлов; Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т. - Н. Новгород, 2013.
- Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014611920: Bottom Settlement v. 2.0 (BS v. 2.0) / Е.Н. Горохов, В.И. Логинов, И.С. Соболев, Е.А. Гнетов; Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т. - Н. Новгород, 2014.

- Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016619309: Temperature Regime with Bottom Settlement 3D v. 1.0 (TRBS - 3D v. 1.0) / Е.Н. Горохов, В.И. Логинов, Е.А. Гнетов; Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т. - Н. Новгород, 2016.
- Соболев, И.С. Автоматизация инженерных расчетов берегопереформирований на водохранилищах криолитозоны / И.С. Соболев, Д.Н. Хохлов // Проблемы инженерного мерзлотоведения: материалы Междунар. симп. (г. Мирный, 3-7 сент. 2011 г.). - Якутск: Ин-т мерзлотоведения Сиб. отд-ния рос. акад. наук, 2011. - с. 115-120.
- Соболев, И.С. Закономерности эволюции термоабразионных берегов водохранилищ криолитозоны / И.С. Соболев // Приволжский научный журнал, 2013. - №1. - с. 123-130.
- Соболев, С.В. Водоохранилища в области вечной мерзлоты / С.В. Соболев. - Н. Новгород: ННГАСУ, 2007. - 432 с.
- Соболев, С.В. Температурные расчеты сооружений и водохранилищ гидроузлов: учебное пособие / С.В. Соболев, Е.Н. Горохов, И.С. Соболев, А.Н. Ежков; Нижегород. гос. Архит.-строит. ун-т. - Н. Новгород: ННГАСУ, 2008. - 143 с.
- Соболев, С.В. Температурный режим причалов Якутского речного порта / С.В. Соболев, Н.А. Конькова // Известия вузов. Строительство и архитектура, 1989. - №6. - с. 68-71.
- Соболев, С.В. Термоабразия берега водохранилища при волнении / С.В. Соболев // Известия вузов. Строительство, 1992. - №1. - с. 68-72.
- СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88.

- СП 39.13330.2012. Плотины из грунтовых материалов. Актуализированная редакция СНиП 2.06.05-84\*.
- СП 58.13330.2012. Гидротехнические сооружения. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 33-01-2003.
- СТО РусГидро 02.03.119-2015. Гидротехнические сооружения гидроэлектростанций. Методические рекомендации по выполнению многофакторных исследований.
- Трупак, Н.Г. Замораживание грунтов в строительстве / Н.Г. Трупак. - М.: Стройиздат, 1970. - 224 с.
- Февралев, А.В. Прогнозирование температурного и фильтрационного режимов талой плотины на многолетнемерзлом основании / А.В. Февралев, С.В. Соболев // Колыма, 1993. - №7. - с. 12-15.
- Февралев, А.В. Расчет температурного режима водосливной плотины и ее фильтрующего основания / А.В. Февралев, А.В. Янченко // Материалы конференций и совещаний по гидротехнике. Гидротехническое строительство в районах вечной мерзлоты и сурового климата. - Л.: Энергия, 1979. - с. 95-100.
- Февралев, А.В. Расчет температуры фильтрующей плотины в системе ортогональных криволинейных координат на ЭЦВМ / А.В. Февралев // Материалы конференций и совещаний по гидротехнике. Гидротехническое строительство в районах вечной мерзлоты и сурового климата. - Л.: Энергия, 1979. - с. 90-95.
- Февралев, А.В. Температурный режим тела и фильтрующего основания бетонной плотины в системе криволинейных ортогональных координат / А.В. Февралев // Известия вузов. Строительство и архитектура, 1981. - №1. - с. 105-110.

- Федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования. Уровень высшего образования МАГИСТРАТУРА. Направление подготовки 08.04.01 Строительство. Утвержден Приказом Минобрнауки № 1419 от 30.10.2014 г.
- Федосеев, В.И. Противофильтрационные завесы гидротехнических сооружений на многолетней мерзлоте. Опыт проектирования и производства работ / В.И. Федосеев, И.Н. Шишов, В.А. Пехтин, Н.Ф. Кривоногова, А.А. Коган. - С.-Петербург: Издательство ОАО "ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева", 2009. - Том 1. - 230 с., Том 2. - 466 с.
- Цытович, Н.А. Механика мерзлых грунтов: учебное пособие / Н.А. Цытович. - М.: Высшая школа, 1973. - 448 с.
- Цытович, Н.А. Прогноз температурной устойчивости плотин из местных материалов на вечномерзлых основаниях / Н.А. Цытович, Н.В. Ухова, С.Б. Ухов. - Л.: Стройиздат, 1972. - 140 с.
- Якутия / Под ред. П.В. Виттенбурга. - Л.: Изд-во Акад. Наук СССР, 1927. - 752 с.

# Приложения

# Соотношения единиц измерения метрической системы и системы СИ

Величина	Метрические единицы	Перевод в единицы системы СИ
Длина	1 м	1 м
Время	1 час 1 сутки 1 год	3600 с (секунд) 86400 с 31556926 с
Масса	1 т 1 г	1000 кг 0,001 кг
Плотность	1 т/м <sup>3</sup> 1 г/см <sup>3</sup>	1000 кг/м <sup>3</sup> 1000 кг/м <sup>3</sup>
Сила	1 кгс 1 тс	9,80665 Н (Ньютон) 9806,65 Н = 9,80665 кН
Удельная сила тяжести (удельный вес)	1гс/см <sup>3</sup> 1 тс/м <sup>3</sup>	9,80665·10 <sup>3</sup> Н/м <sup>3</sup> 9,80665·10 <sup>3</sup> Н/м <sup>3</sup>
Температура	$\vartheta$ , °С – градус Цельсия	$T = \vartheta + 273,15$ , °К – градус Кельвина
Количество теплоты	1 кал 1 ккал 1 Мкал	4,1868 Дж (Джоуль) 4,1868 кДж 4186,7 кДж
Тепловой поток, тепловая мощность	1 ккал/час 1 Мкал/сутки	1,163 Вт (Ватт) 48,458 Вт



Величина	Метрические единицы	Перевод в единицы системы СИ
Удельная теплота по весу	1 ккал/кг 1 Мкал/т	4186,8 Дж/кг 4186,8 Дж/кг
Удельная теплота по объему	1 ккал/м <sup>3</sup> 1 Мкал/м <sup>3</sup>	4,1868·10 <sup>3</sup> Дж/м <sup>3</sup> 4186,8 кДж/м <sup>3</sup>
Теплоемкость	1 ккал/град 1 Мкал/град	4186,8 Дж/град 4186,8·10 <sup>3</sup> Дж/град
Удельная массовая теплоемкость	1 ккал/(кг·град) 1 Мкал/(т·град)	4186,8 Дж/(кг·град) 4,1868 Дж/(кг·град)
Удельная объемная теплоемкость	1 ккал/(м <sup>3</sup> ·град) 1 Мкал/(м <sup>3</sup> ·град)	4,1868 кДж/(м <sup>3</sup> ·град) 4186,8 кДж/(м <sup>3</sup> ·град)
Плотность теплового потока	1 ккал/(м <sup>2</sup> ·час) 1 Мкал/(м <sup>2</sup> ·сут)	1,1630 Вт/м <sup>2</sup> 48,458 Вт/м <sup>2</sup>
Температурный градиент	1 град/см	100 град/м
Коэффициент теплоотдачи	1 ккал/(м <sup>2</sup> ·ч·град)	1,1630 Вт/(м <sup>2</sup> ·град)
Коэффициент теплопроводности	1 ккал/(м·ч·град) 1 Мкал/(м·сутки·град)	1,163 Вт/(м·град) 48,458 Вт/(м·град)
Коэффициент температуропроводности	1 м <sup>2</sup> /час 1 м <sup>2</sup> /сутки	277,78·10 <sup>-6</sup> м <sup>2</sup> /с 11,574·10 <sup>-6</sup> м <sup>2</sup> /с
Давление	1 мм ртутного столба 1 мбар	133,322 Н/м <sup>2</sup> 100 Н/м <sup>2</sup>

# Теплофизические характеристики грунтов в естественном залегании

№ п/п	Грунт	Коэффициент теплопроводности		Коэффициент температуропроводности		Теплота таяния-замерзания
		$\lambda_{ТГ}$	$\lambda_{МГ}$	$a_{ТГ}$	$a_{МГ}$	$\gamma nL$
		Мкал/(м·сутки·град)		м <sup>2</sup> /сутки		Мкал/м <sup>3</sup>
1	Суглинок	0,0312	0,0384	0,0422	0,0835	8,06
2	Глинистый грунт	0,0398	0,0550	0,050	0,082	25,50
3	Песок	0,0377	0,0610	0,070	0,113	30,90
4	Песок	0,0569	0,0857	0,090	0,187	28,50
5	Суглинок	0,0312	0,0384	0,0422	0,0835	8,06
6	Суглинок моренный	0,0312	0,0408	0,0442	0,0890	10,80
7	Песок	0,0580	0,0730	0,091	0,160	24,56
8	Суглинок тяжелый	0,0309	0,0382	0,0422	0,0835	8,06
9	Песок	0,0550	0,0810	0,072	0,147	28,50
10	Насыпной грунт	0,0312	0,0408	0,0442	0,0890	28,30
11	Песок пылеватый	0,0362	0,0463	0,070	0,113	30,90
12	Суглинок	0,0360	0,0432	0,0610	0,0985	20,45
13	Супесь	0,0414	0,0698	0,069	0,112	28,50

№ п/п	Грунт	Коэффициент теплопроводности		Коэффициент температуропроводности		Теплота таяния-замерзания
		$\lambda_{ТГ}$	$\lambda_{МГ}$	$a_{ТГ}$	$a_{МГ}$	$\gamma nL$
		Мкал/(м·сутки·град)		м <sup>2</sup> /сутки		Мкал/м <sup>3</sup>
14	Суглинок легкий	0,0324	0,0396	0,0442	0,0890	10,8
15	Суглинок	0,0312	0,0384	0,0422	0,0835	8,06
16	Песок к/з	0,0312	0,0480	0,0446	0,0960	36,60
17	Насыпной грунт	0,0312	0,0408	0,0442	0,0890	28,30
18	Насыпной грунт	0,0312	0,0408	0,0442	0,0890	28,30
19	Суглинок	0,0312	0,0384	0,0422	0,0835	8,06
20	Песок	0,0377	0,0610	0,070	0,113	30,90
21	Глинистый грунт	0,0398	0,0550	0,050	0,082	25,50
22	Песок	0,0550	0,0810	0,072	0,147	28,50
23	Песок	0,0580	0,0730	0,091	0,160	24,56
24	Суглинок	0,0360	0,0432	0,0610	0,0985	20,45
25	Песок	0,0569	0,0857	0,090	0,187	28,50
26	Супесь	0,0414	0,0698	0,069	0,132	28,50
27	Песок	0,0580	0,0730	0,091	0,160	24,56

# Контрольные вопросы

1

Особенности условий строительства на северо-востоке России.

1. Территория, климат, вечная мерзлота, температурное состояние долин рек, мерзлотные явления в долинах рек на северо-востоке России. Дайте характеристику.
2. Изобразите в сравнении характер температурных полей недр Земли в средних широтах и в области вечной мерзлоты. Поясните понятия геотермического градиента и геотермической ступени. Что представляют собой вечномерзлые грунты в естественном залегании?
3. Как строят городские дома, теплотрассы, водоводы, магистральные нефтепроводы, автомобильные и железные дороги в области вечной мерзлоты? Поясните на схемах.

2

Гидротехнические сооружения в области вечной мерзлоты.

4. Перечислите типы плотин из грунтовых материалов в криолитозоне. Поясните схемами. Опишите условия, в которых возможно их строительство и условия, в которых должна вестись их эксплуатация.
5. Изобразите схематично конструкции талых земляных, каменно-земляных и каменнонабросных плотин в криолитозоне. На каких основаниях их можно строить? Назовите примеры.
6. Как в грунтовой плотине с помощью замораживающей системы можно создать мерзлотную противодиффузионную завесу? Какие существуют типы замораживающих систем? Сопроводите ответ соответствующими схемами. Объясните работу замораживающих систем.

7. Изобразите схематично конструкции мерзлых земляных и каменно-земляных плотин в криолитозоне. На каких основаниях их можно строить? Как осуществляются их сопряжения с берегами? Назовите примеры. Можно ли включить лед в тело мерзлой плотины?
8. Водосбросы гидроузлов с мерзлыми грунтовыми плотинами: принципиальная схема, особенности конструкции, сопряжения с телом грунтовых плотин и берегами.
9. Накопители промышленных отходов: разновидности накопителей по назначению, плановая схема намывного накопителя овражно-балочного типа, продольные разрезы по накопителям с ограждающими дамбами талого и мерзлого типов, пояснения к конструкциям.
10. Основные виды портовых причалов на реках криолитозоны: пояснить схемами, описать условия эксплуатации.

3

Физико-термические характеристики грунтов и строительных материалов.

11. Грунты и строительные материалы как многофазные системы, различие грунтов по льдистости, температура таяния-замерзания различных грунтов, основные теплофизические характеристики с единицами измерения, необходимые для температурных расчетов.
12. Изменение свойств грунтов при замерзании-оттаивании, тепловая осадка оттаявшего грунта.

4

Некоторые сведения из теории теплопередачи.

13. Перечислите виды теплопередачи, поясните понятия количества теплоты, мощности теплового потока, дайте графическое изображение температурного поля в двумерных условиях, запишите и поясните закон теплопроводности Фурье и дифференциальные уравнения нестационарной и стационарной теплопроводности, укажите размерности упомянутых величин.

14. Объясните, как сформулировать задачу нестационарной теплопроводности? Что такое краевые условия? Перечислите их состав и запишите математические выражения. Дайте характеристику каждого из условий.
15. Запишите дифференциальное уравнение Фурье-Кирхгофа нестационарной передачи теплоты в фильтрующем грунте, поясните его составляющие.
16. Запишите и поясните уравнения теплопередачи в каменной наброске при конвекции воздуха.

5

## Основы температурных расчетов и наблюдений гидротехнических сооружений.

17. Дайте аналитические решения стационарной теплопроводности плоской стенки при граничных условиях I, II, III рода. Изложите понятие теплового сопротивления. Объясните, почему наружная поверхность стального тонкостенного бака, наполненного горячей жидкостью, приобретает температуру этой жидкости?
18. Объясните метод конечных разностей применительно к одномерным условиям. Решите этим методом графически задачу о нестационарной теплопроводности плоской стенки. Что такое безразмерные переменные в задачах теплопроводности?
19. Назовите правила сложения температурных полей (суперпозиция). Решите графически с применением суперпозиции задачу о стационарном температурном состоянии основания сооружения для двумерных условий с учетом теплового поля недр Земли.
20. Выведите условие Стефана на границе раздела фаз при оттаивании –промерзании грунта.
21. Сформулируйте математически одномерную задачу промерзания (оттаивания) грунта. Запишите и поясните приближенное аналитическое решение Л.С. Лейбензона этой задачи. Какой характер имеет кривая промерзания-оттаивания во времени?

22. Поясните постановку и решение двухмерной задачи расчета с применением метода конечных разностей нестационарного температурного режима мерзлой земляной плотины.
23. Как построить стационарное температурное поле в поперечном сечении мерзлой земляной плотины с использованием метода электротепловой аналогии (ЭТА)? Проиллюстрируйте схемой.
24. В чем состоит приближенный аналитический расчет воздушной замораживающей системы? Как учесть наличие замораживающей системы в расчете температурного режима земляной плотины?
25. Дайте понятие о расчете температурного режима фильтрующей талой земляной плотины.
26. Дайте понятие о расчете температурного режима талой каменно-земляной плотины (с грунтовым ядром и призмами из каменной наброски).
27. Что вам известно о расчетах температурного режима грунтовых гидросооружений на ЭВМ? С какими современными программами вы знакомы и сможете применить их для таких расчетов в случае, если это потребуется в предстоящей практической деятельности?
28. Как конструктивно решить скважины для температурных измерений в натуральных условиях? Как провести измерения и в каком виде оформить результаты, чтобы выяснить фактический температурный режим сооружения? Покажите на примере грунтовой плотины в криолитозоне.

6

Температурный режим гидротехнических сооружений по расчетам и натурным наблюдениям.

29. Как примерно должны выглядеть температурные поля в поперечном сечении грунтовой плотины мерзлого типа в конце зимы и в конце лета для обеспечения ее нормальной эксплуатации? Поясните рисунком.

30. Как примерно должны выглядеть температурные поля в поперечном сечении каменно-земляной плотины талого типа в конце зимы и в конце лета для обеспечения ее нормальной эксплуатации? Поясните рисунком.
31. Какая опасность подстерегает каменно-земляную плотину талого типа с ядром, покоящуюся на мерзлом основании? Поясните на эскизе поперечного сечения плотины с основанием.
32. Изобразите вертикальный разрез хвостохранилища с ограждающей грунтовой дамбой мерзлого типа. На рисунке нанесите изотермы среднегодового температурного поля, каким оно должно быть при обеспечении нормальной эксплуатации объекта.
33. Попытайтесь осуществить постановку двумерной задачи расчета нестационарного температурного режима бетонной гравитационной плотины. Покажите, как примерно будут выглядеть температурные поля в плотине, расположенной в зоне сурового северного климата, в конце зимы и в конце лета.
34. Изобразите поперечное сечение шпунтового причала с талой грунтовой засыпкой у мерзлого берега. Поясните, как может развиваться температурный режим засыпки в период эксплуатации причала. Как поставить и решить задачу расчета температурного режима в засыпке и основании причала?

7

Наблюдения и расчеты температурного режима и переформирования ложа и берегов водохранилищ.

35. Сформулируйте в математической записи одномерную задачу оттаивания грунта основания водохранилища с учетом осадки, запишите и поясните ее приближенное аналитическое решение, полученное методом Л.С. Лейбензона. Какое решение, с учетом или без учета осадки, будет давать большую глубину оттаивания?
36. Охарактеризуйте двух – или трехмерную математическую модель температурного режима основания водохранилища с учетом оседания ложа (схема расчетной области; запись системы уравнений с краевыми условиями; описание численного расчета температуры и определения осадки оттаивающего грунта).



37. Как определить стационарное температурное состояние устойчивого к переформированию берега водохранилища методом электротепловой аналогии (ЭТА)? Сопроводите ответ схемой.
38. Назовите типы переформировывающихся берегов водохранилищ криолитозоны. Какие из берегов отличаются наиболее интенсивным переформированием? Как оно происходит? Как выглядит типичный профиль термоабразионного берега?
39. Охарактеризуйте прогнозную энергетическую модель переформирования термоабразионного берега водохранилища на заданный срок (двумерная расчетная схема; математическое описание основных процессов; порядок численного расчета).
40. К каким изменениям морфометрических параметров водохранилищ криолитозоны в период эксплуатации ведет тепловое оседание их ложа и переформирование термоабразионных берегов? Насколько существенными могут быть эти изменения?

Учебное издание

Соболь Станислав Владимирович  
Соболь Илья Станиславович

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ  
В КРИОЛИТОЗОНЕ

*Электронное учебное пособие*

Компьютерное оформление А.А. Курячев, О.А. Соболь  
Издано в авторской редакции

Подписано в свет \_\_\_\_\_ Гарнитура « Колибри». Размер 239 МБ

---

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет» 603950, Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65.

<http://www.nngasu.ru>, [srec@nngasu.ru](mailto:srec@nngasu.ru)



Соболь Станислав Владимирович,  
Род. 20.02.1946 г., в 1969 г. закончил  
ГИСИ им. В.П. Чкалова, инженер-  
гидротехник, доктор техн. наук с 1993 г.,  
профессор, зав. кафедрой  
гидротехнических и транспортных  
сооружений ННГАСУ.  
Усть-Хантайская ГЭС, 1972 г.



Соболь Илья Станиславович,  
Род. 20.09.1976 г., в 1998 г. закончил  
ННГАСУ, инженер-гидротехник, доктор  
техн. наук с 2015 г., профессор кафедры  
гидротехнических и транспортных  
сооружений ННГАСУ.  
Светлинская ГЭС, 2011 г.