

**Инженерная геология, мерзотоведение
и грунтоведение**

УДК 624.130:551.313

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-1-52-66>

Современное представление о работе грунтовых плотин среднего и низкого напоров в криолитозоне в условиях потепления климата

Р. В. Чжан

Институт мерзотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия
rvzhang@mpi.ysn.ru

Аннотация. Вопрос безопасной работы гидроузлов в криолитозоне является одним из важнейших. В настоящее время возраст работающих плотин подходит к критическому пределу. Интенсивные криогенные процессы (термокарст, термоэрозия, пучение, суффозия, сосредоточенная фильтрация по вытянувшимся ледяным включениям и т.д.) в сооружениях активизировались в связи с потеплением климата. Потепление климата на Земле, начавшееся во второй половине прошлого столетия, продолжается и в настоящий период. Однако в некоторых частях криолитозоны темпы потепления резко снизились, даже наметились тенденция похолодания и образование многолетнемерзлых пород. На планете возникла неустойчивая термодинамическая ситуация, затронувшая слой годовых теплооборотов литосферы, в которой находятся инженерные сооружения. В этой связи в статье рассмотрены существующие на сегодняшний день представления о принципах работы гидротехнических сооружений в криолитозоне. На конкретных примерах показано, что в процессе эксплуатации они часто переходят из мёрзлого в талое состояние и наоборот. Указывается на то, что этот переход нельзя связывать только с современным потеплением климата. Отмечено, что при сложных инженерно-геологических, гидрогеологических, мерзлотных условиях функциональное назначение гидроузла может обеспечиваться только при сохранении определённого теплового состояния, например, только мёрзлого. Назрел вопрос коренного пересмотра существующих норм проектирования гидротехнических сооружений в криолитозоне.

Ключевые слова: криолитозона, гидроузел, грунтовая плотина, многолетнемерзлые грунты, тепловлажностный режим.

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-1-52-66>

Current understanding of the performance of medium and small embankment dams on permafrost in a warming climate

R. V. Zhang

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia
rvzhang@mpi.ysn.ru

Abstract. Dam safety is one of the most critical issues in permafrost regions. At present, the existing dams are reaching their design life limit. Geocryological processes, such as thermokarst, thermal erosion, frost heaving, suffosion, and concentrated seepage through meltout voids have intensified at the damsites due to climate warming. Global warming which began in the second half of the twentieth century is continuing. However, the rates of warming have significantly slowed down in some parts of the permafrost zone, with some areas beginning to show a cooling trend and permafrost aggradation. Unsteady thermodynamic conditions have developed in the lithosphere, in the layer of annual ground temperature fluctuations which hosts engineering structures. This paper discusses the current concepts of dam design and construction in permafrost regions. Based on several case studies, it is demonstrated that embankment dams often change their state from frozen to thawed and back during the operation period. It is shown that these transitions are not always attributable to

observed climate warming. Where geotechnical, hydrogeological, and permafrost conditions are complicated, proper performance of embankment dams can only be provided by adhering to a selected thermal design, for example, to a frozen type. There is a need for radical revision of the existing standards for dam design in permafrost areas.

Key words: permafrost, hydraulic project, embankment dam, permafrost soils, hydrothermal regime.

Введение

Как известно, основной доминантой из многочисленных факторов, влияющих на устойчивость грунтовых плотин в криолитозоне, является их температурно-криогенный (тепловлажностный) режим. При проектировании принимают один из принципов строительства [1]:

- I принцип строительства предполагает, что вечномерзлые грунты основания сохраняются в мерзлом состоянии при строительстве и эксплуатации, а талые грунты противофильтрационного устройства в плотине и в основании замораживаются до начала заполнения водохранилища и сохраняются в мерзлом состоянии в течение всего периода эксплуатации;

- II принцип строительства допускает использование естественных талых или оттаивание вечномерзлых грунтов основания в ходе строительства и эксплуатации плотины на определенную глубину до начала заполнения водохранилища с талым противофильтрационным элементом в теле и основании плотины.

Исходя из принципа строительства определились понятия «мерзлая плотина» и «талая плотина».

Мерзлая плотина – плотина, водонепроницаемость которой обеспечивается мерзлым состоянием грунтов ее противофильтрационного устройства в теле и основании. То есть по напорному фронту грунты тела и основания образуют сплошной мерзлый противофильтрационный массив. В этом случае отсутствует гидравлическая связь бьефов.

Талая плотина – плотина, в которой противофильтрационную преграду образуют из талых грунтов, позволяющих существовать фильтрационному потоку, обеспечивающему гидравлическую связь бьефов в допустимых пределах, как с точки зрения устойчивости сооружения, так и с точки зрения необходимости сохранения проектных объемов воды в водохранилище. Грунты противофильтрационного устройства тела и основания, а также части низового клина находятся в талом состоянии.

Кроме того, нами выделен еще один тип плотин – *сезоннопромерзающая-протаивающая* [2]. Это плотина сезонного действия, противофильтрационная устойчивость которой в период паводка обеспечивается слоем сезоннопромерзшего грунта. Этот тип относится к грунтовым низкона-

порным плотинам водохозяйственного назначения – лиманное орошение, водоемы и небольшие водохранилища питьевого и технического назначения краткосрочного действия.

Особенность использования мерзлых грунтов в качестве противофильтрационной преграды в этих плотинах заключается в том, что промороженный сверху за зиму слой грунта полностью не оттаивает к моменту сброса воды с временного водохранилища (лимана), т.е. противофильтрационная и статическая устойчивость сооружения обеспечивается сезоннопромерзающим грунтом. Поэтому необходимость искусственных приемов по промораживанию этих плотин отпадает.

Таким образом, определяя тип плотины по тепловому состоянию, мы исходим из температурно-криогенного режима ее противофильтрационного устройства в период эксплуатации гидроузла.

Следует отметить, что в нормативной литературе до сих пор нет единого мнения и четкости в отношении принципов строительства гидроузлов в криолитозоне. Так, в рекомендациях [3] однозначно указано «сочетание I и II принципов строительства, а также талой и мерзлой конструкций плотины в одном створе не рекомендуется». В то же время допускается использование двух принципов строительства по одному напорному фронту [1, 3]. Более того, при наличии глубокого талика под руслами водотоков и мощной толщи сильносжимаемых при оттаивании вечномерзлых грунтов на пойме рекомендуется рассматривать возможность строительства плотины комбинированного типа: береговые части выполнять из грунта, а русловую – из бетона на талом основании [3]. При этом грунтовая часть плотины должна быть мерзлого типа. Сопряжение бетонной и грунтовой частей рекомендуется осуществлять с помощью замораживающих систем.

В основе устойчивости плотин мерзлого типа (**I принцип**) лежат высокие прочностные и водоупорные свойства мерзлых грунтов. Мерзлое состояние тела и основания плотины может создаваться естественным промерзанием и искусственным промораживанием грунтов [4–6]. Для плотин с постоянным водохранилищем искусственное промораживание грунтов тела и основания необходимо. Создание мерзлого ядра в теле плотины может быть достигнуто либо послойным промораживанием тела плотины в зимний

период, либо за счет постоянных или сезонно действующих охлаждающих устройств. Обычно это трубчатые системы, по которым циркулирует хладагент. Охлаждающие системы подразделяются на закрытые и открытые, с принудительной и естественной циркуляцией теплоносителя. В качестве теплоносителя применяют воздух, жидкости – рассолы, керосин, парожидкости – аммиак, фреон и др.

Безусловно, для промораживания плотин эффективно используют и простые приёмы, применяемые ещё в прошлом столетии, такие как удаление с гребня и низового откоса снега; устройство настилов на низовом откосе, позволяющих исключить контакт снега с поверхностью плотины и обеспечивающих проветривание откоса зимой и отражение солнечных лучей летом; устройство теплоизоляции на гребне и низовом откосе. В последнее время с появлением новых эффективных тепло- и гидроизоляторов, а также приёмов по повышению альбедо (пригрузка гребня и откосов плотин породами, близкими к белому цвету, покраска поверхностей и прочие) все чаще используют сочетания их с охлаждающими устройствами.

Отметим, что **I принцип** строительства (плотины мерзлого типа) рекомендовано принимать при следующих инженерно-геологических и инженерно-геокриологических условиях створа [3]:

- основание сложено сильнольдистыми, сильносжимаемыми при оттаивании грунтами (III категория сжимаемости оттаивающей толщи грунтов, коэффициент оттаивания больше 0,05);
- скорость подруслового потока не превышает $3 \cdot 10^{-5}$ м/с, мощность талика не более 15 м.

II принцип строительства, т.е. талому типу плотин, отдается предпочтение при следующих инженерно-геологических условиях створа:

- основание представлено скальными, полускальными, малосжимаемыми при оттаивании нескальными вечномёрзлыми грунтами (I и II категории сжимаемости оттаивающей толщи грунтов, коэффициент оттаивания не превышает 0,05);
- в русле водотока имеется глубокий или сквозной талик, а борта и пойма долины сложены грунтами I и II категории сжимаемости при оттаивании.

При проектировании и строительстве грунтовых плотин по **II принципу** требуются определенные мероприятия по защите от промерзания дренажа, гребня и низового откоса.

Таким образом, грунтовые плотины в криолитозоне работают в сложном термонапряженно-гидродинамическом поле. Сохранение квазистабильного состояния, обеспечивающего устойчивость сооружения в целом, представляет сложную инженерную задачу.

Практика эксплуатации гидротехнических сооружений этого класса в суровых климатических и сложных инженерно-геокриологических условиях криолитозоны показала, что нередко они переходят из одного теплового состояния в другое – талые в мёрзлые и мёрзлые в талые.

Рассмотрим процессы, происходящие в мерзлых плотинах при формировании температурно-криогенного режима. Опасным, с точки зрения статической и особенно фильтрационной устойчивости плотин, является резкий переход их из мёрзлого состояния в талое. В зависимости от инженерно-геокриологических условий оснований и тела грунтовых плотин интенсивность этого процесса может достигать очень больших скоростей. Непредсказуемо эти процессы протекают в коренных трещиноватых породах, трещины которых заполнены льдом, в льдонасыщенных породах зон тектонического дробления, а также на территориях так называемого «ледового комплекса».

Процесс вытаивания льда в трещинах происходит медленно и фильтрация обнаруживается только тогда, когда образуются сквозные пути. Возникшая струйная фильтрация приводит к интенсификации конвективного теплообмена водного потока с окружающими породами и стремительному увеличению зоны оттаивания их. Обнаруживается это при отсутствии мониторинговой службы на гидроузле уже на поздних стадиях развития процесса деградации мерзлоты. Результат – катастрофическое, практически мгновенное, нарастание фильтрационных расходов, угроза аварии и потеря функционального назначения гидроузла.

Особенно активизировались эти процессы в конце прошлого и начале текущего веков в связи с изменением климата на планете. Изменение климата свершившийся факт – потепление произошло и продолжается [7]. Хотя есть работы, которые на основе частотно-амплитудного анализа изменения температуры воздуха и фактических наблюдений показывают, что темпы потепления в последнее время резко снизились, на территории европейского Севера России, северо-востоке Канады, в восточных районах Монголии, где даже наметилась тенденция к похолоданию [8]. По мнению член-корреспондента РАН В.Т. Балобаева, период потепления скоро закончится и вновь наступит фаза похолодания [9]. Аналогичные ситуации на Земле происходили не один раз. В основе изменения климата лежат так называемые климатические циклы, близкие к циклам солнечной активности, а также орбитальные и планетарные причины, обусловленные расположением Земли, других планет Солнечной системы относительно Солнца при их вращении. В этой

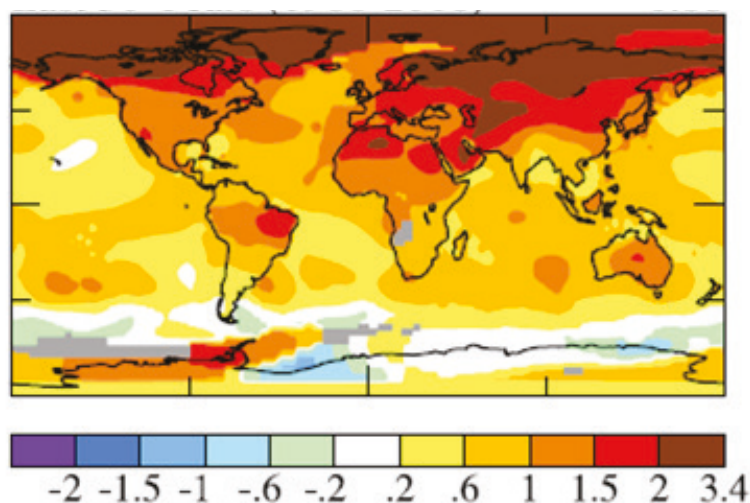


Рис. 1. Изменение температуры воздуха на Земле за 50 лет (1966–2017 г.)
Fig. 1. Global air temperature variation over 50 years (1966–2017)

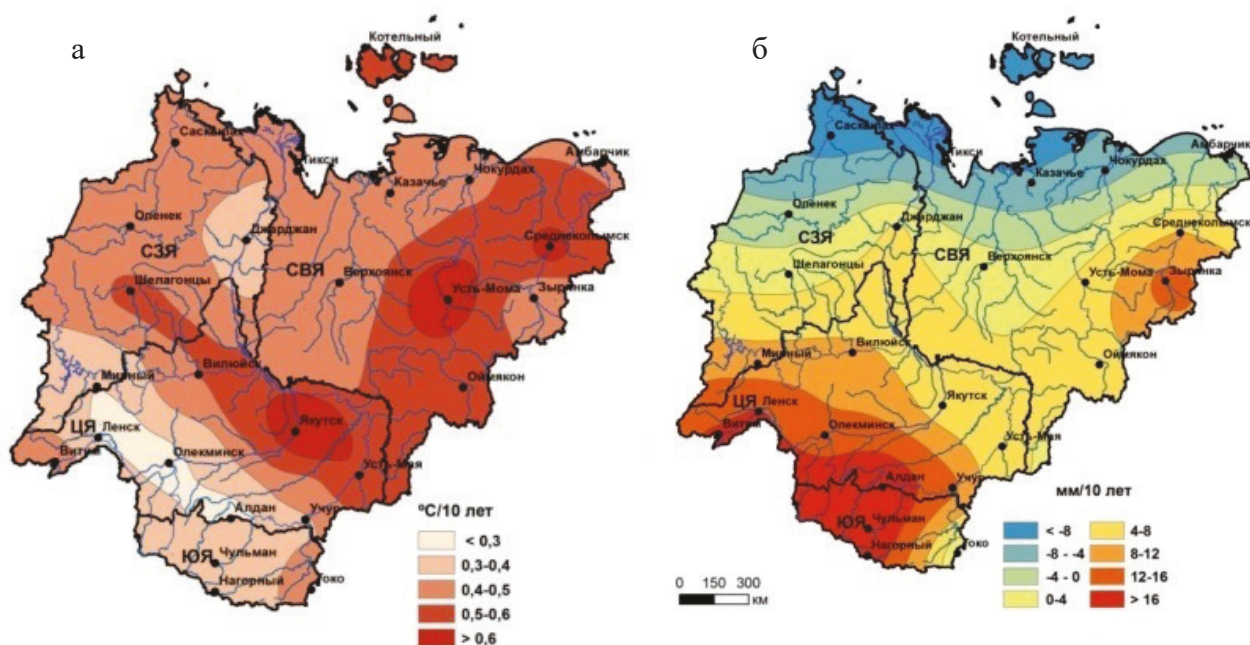


Рис. 2. Карты линейных трендов средней годовой температуры воздуха (а) и годовых осадков (б) в Якутии в 1966–2016 гг. [11]
Fig. 2. Linear trends of mean annual air temperature (a) and precipitation (b) in Yakutia, 1966–2016 [11]

связи заслуживает внимание также гипотеза В.И. Козлова [10] о нарушении циклов солнечной активности, происходящих в настоящий период, которое приведет к смене климата в ближайшие годы текущего столетия. Это природное явление вызвало повышенный интерес человечества, так как процессы, происходящие на Земле, затрагивают все сферы деятельности людей. Особенно повышаются риски природопользования на обширнейшей территории криолитозоны, занимающей более 65% территории России, и куда, как известно, перемещается эпицентр развития производных сил страны.

В качестве иллюстрации приведем карту об-

щего изменения температуры воздуха на Земле (рис.1) и Якутии (рис.2), характеризующую региональное потепление современного климата на территории криолитозоны России [11].

Потепление привело к изменению температурного режима в слое годовых теплооборотов, в котором находятся инженерные сооружения. Однако следует отметить, что от назначения сооружения температурные изменения в них по-разному сказываются на общем состоянии их устойчивости. Известно, что строительные свойства дисперсных мерзлых грунтов зависят от их температуры. Так, сопротивление сдвигу по поверхности смерзания мерзлых глинистых и песчаных

грунтов при изменении температуры с -4°C до -1°C уменьшается в 2,5 раза [12], что очень опасно для устойчивости промышленных и гражданских объектов. Для гидротехнических сооружений, где используются мерзлые грунты в качестве противофильтрационных преград, требования к температуре не столь высокие, так как фильтрационные свойства их при вышеуказанных температурных изменениях практически остаются неизменными. Массив будет водонепроницаемым до тех пор, пока существует лёд. Наличие льда в порах грунта, конечно же, обусловлено сложным термодинамическим состоянием системы. Противофильтрационная способность мёрзлых грунтов будет находиться в широком температурном диапазоне – от низких температур до близких к нулю. Но с практической точки для надёжной работы плотин мерзлого типа, например для Якутии, считается температура -2°C .

Как было отмечено выше, потепление климата привело к повышению среднегодовых значений температуры воздуха и осадков. Реакция криолитозоны выразилась в увеличении глубины сезонного протаивания и повышении температуры в слое годовых теплооборотов. Это привело к увеличению стока сезонноталого слоя и уменьшению прочности мерзлых грунтов основания гидротехнических сооружений.

Вместе с тем, не следует связывать потерю устойчивости природно-технических комплексов, где имеют место ошибки проектно-строительных работ, а также недопустимо низкий эксплуатационный уровень, с потеплением климата.

Рассмотрим переход грунтовых плотин из мерзлого типа в талый в условиях современного потепления климата на примере гидроузла Аркагаалинской ГРЭС на р. Мянунджа в Магаданской области и гидроузла на р. Матта в Якутии.

Гидроузел на р. Мянунджа

Гидроузел расположен на р. Мянунджа в пос. Мянунджа Сусуманского района Магаданской области (координаты $63^{\circ}02''$ с.ш., $147^{\circ}10''$ в.д.). Построен в 1952 – 1955 гг. для образования водохранилища-охладителя Аркагаалинской ГРЭС. Это один из первых гидроузлов мёрзлого типа, построенных на Северо-Востоке России.

Климат района суровый, резко континентальный. Абсолютный минимум температуры воздуха достигает $-55,2^{\circ}\text{C}$, абсолютный максимум – $32,1^{\circ}\text{C}$. Среднегодовая температура воздуха по многолетним наблюдениям составляет $-12,8^{\circ}\text{C}$. Годовое количество атмосферных осадков составляет 278 мм. Толщина снежного покрова на открытых участках не превышает 30 см, на залесённых участках и в пониженных формах рельефа – 1,2 м. Снег выпадает в последних числах сентября и

лежит до 15–17 мая. Ветры в районе имеют местный характер и не превышают 5–6 м/с. Гидроузел располагается на территории Верхнеколымского нагорья с абсолютными отметками водораздела – 1000–1100 м, дна долины – 800–850 м. Сейсмическая активность района при проектировании объекта была принята 7 баллов [13].

Гидрологическая характеристика водотока. Река Мянунджа относится к бассейну р. Колыма и является левым притоком р. Эмтегей. Берёт начало вблизи водораздела между бассейном р. Аян-Урях и бассейном р. Индигирка на высоте около 1150 м. Длина её составляет 65 км, площадь водосбора – 1070 км², площадь водосбора до створа расположения Аркагаалинского гидроузла – 513 км², среднегодовой объём стока – 118 млн. м³. Долина реки симметрична, имеет ширину 0,5–1 км, заболочена. В пределах гидроузла р. Мянунджа течёт в северо-западном и западном направлениях, принимая притоки: правые – р. Беликан, руч. Толон-Урях и руч. Кедровый, левые – наиболее крупный руч. Долгий.

Русло р. Мянунджа на всём протяжении извилистое, разветвлённое, блуждающее по плоскому, широкому, заболоченному дну долины. Режим уровней реки при открытом русле очень неустойчив и зависит от количества выпавших атмосферных осадков. Пик половодья в конце мая при свободном состоянии реки составляет примерно 1,2–1,4 м над летней меженью. Летне-осенние паводки обычно выше весеннего половодья и в большинстве случаев они образуют годовые максимумы. Среднегодовой расход реки составляет 3,76 м³/с, что соответствует примерно 50% обеспеченности. Основной расчетный максимальный расход в створе плотины обеспеченностью 1% составляет 338 м³/с, поверочный (0,1%) – 551 м³/с. Скорости течения воды в реке во время паводков достигают 3–3,3 м/с, что придаёт потоку бурный характер. В летнюю межень скорость течения понижается до 0,2–0,4 м/с [14]. Ледостав устанавливается в начале октября. Максимальная мощность льда возможна до 45 см. Основная масса льда оттаивает на месте. В зимнее время на р. Мянунджа наблюдается подрусловый поток. Расход подруслового потока в 8 км ниже створа Аркагаалинского гидроузла был определён в количестве 20–25 л.с.

В геологическом строении долины р. Мянунджа в створе Аркагаалинского гидроузла принимают участие породы юрского, мелового и четвертичного периодов. Коренные породы представлены базальтами, андезитами и андезитобазальтами различной степени выветрелости. С глубины 4–5 м эти породы переходят в трудноразборную скалу и приобретают монолитный характер. В долине реки характерной особенностью скальных пород



Рис. 3. Плотина на р. Мяунджа. Общий вид [20]

Fig. 3. Dam on Myaundzha River, Arkagalinskaya Power Station. A general view [20]

является их сильная трещиноватость и выветренность. Трещины заполнены льдом и мелкоземом, представляют собой так называемый криогенный элювий в виде сверху супеси с дресвой, ниже андезитобазальтов (щебень и глыбовой материал) мощностью до 10 м. Этот элювий является прокладкой между коренными породами и аллювиально-делювиальными отложениями, представленными на склонах щебенистыми супесями и суглинками, в русле гравием и галечниками мощностью до 4 – 5 м. На пойме аллювий прикрыт слоем торфяников и льдистых супесей мощностью до 1 м [15].

Геокриологические и гидрогеологические условия района. Гидроузел возведён в районе сплошного распространения многолетнемерзлых пород мощностью 180 – 200 м. Глубина сезонного протаивания изменяется от 0,5 до 3,5 м. Влажность (льдистость) галечно-гравийных отложений в среднем составляет 20 %, элювиальной супеси – 27 %. Осадка аллювия при оттаивании составляет 10 – 15 %. В пределах основного русла и протоки р. Мяунджа были обнаружены два талика мощностью до 20 м. Правобережный пологий склон в месте примыкания плотины сложен мелкодисперсными илисто-торфянистыми грунтами делювиально-солифлюкционного типа с большим содержанием подземного повторно-жильного льда. В плане эти криогенные проявления образуют полигональную сетку со сторонами 15 – 20 м. Жилы льда прослеживаются до глубины 5 – 7 м. Трещины в скальных породах, как правило, заполнены льдом с включением дресвы и щебня. Ширина выявленных трещин достигает 5 см. Существенной особенностью геокриологического строения долины в период изысканий явилось наличие вблизи правого берега линзы чистого льда, погребённой в илистых отложениях. Все

грунты долины находились в многолетнемерзлом состоянии, за исключением русла реки, где, как отмечено выше, были выявлены талики [16]. В состав гидроузла входят водохранилище, земляная плотина мерзлого типа, бетонный водослив, водосбросной канал с консольным водосбросом. Общий вид гидроузла приведен на рис. 3.

Водоохранилище сезонного регулирования, каньонного типа, занимает узкую часть долины р. Мяунджа шириной 600–700 м. Основные характеристики водохранилища, принятые в проекте: отметка нормального подпорного уровня (НПУ) – 779, отметка форсированного подпорного уровня (ФПУ) – 780,5 м. Минимальная отметка сработки в зимний период – 777,5 м, площадь зеркала при НПУ – 1136 500 м², полный объём – 4 426 650 м³. Максимальная глубина водохранилища – 9,67 м, максимальная ширина – 845 м, средняя ширина – 700 м, длина – 2160 м. Сработка водохранилища в меженный период осуществляется в пределах, установленных режимом водопотребления Аркагалинской ГРЭС и потребителями пос. Мяунджа.

Плотина – земляная мерзлого типа, высотой 12 м, длиной по гребню 870 м и шириной 11,5 м отсыпана из смеси гальки, гравия и песка. Коэффициент заложения откосов равен: верхового – 2, низового – 1,5. В качестве противофильтрационного устройства служит мерзлое ядро с зубом из щебнистого суглинка шириной по основанию 6 м, врезанного в аллювиальные отложения основания плотины. Для тепловой защиты мерзлого ядра по откосам и гребню был уложен слой торфа, по которому выполнено каменное крепление. Упорные призмы плотины отсыпаны из гравийно-галечных грунтов, представленных грубо окатанными обломками глинистых песчаников неоднородного гранулометрического состава: галечника 20–60 %, гравия 40–60 % и

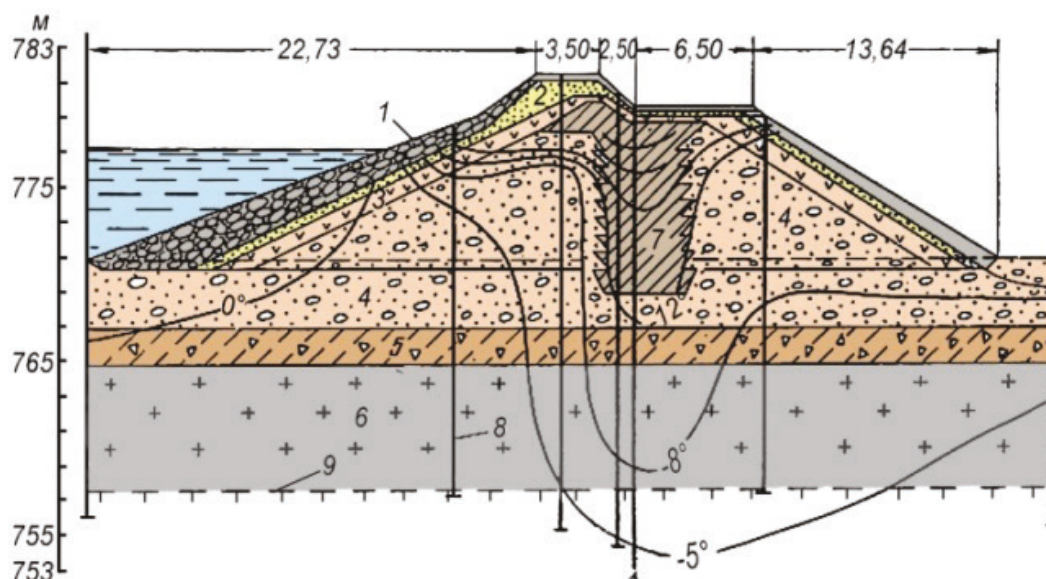


Рис. 4. Гидроузел на р. Мяунджа. Температурное поле в поперечном разрезе на 30.01.1957 г.: 1 – каменная отмостка; 2 – песок; 3 – торф; 4 – песчано-гравийный грунт; 5 – суглинок щебенистый; 6 – андезитобазальты выветрелые, трещиноватые; 7 – суглинок щебенистый; 8 – скважина термометрическая; 9 – граница многолетнемёрзлых пород (положение на момент окончания строительства) [17]

Fig. 4. Myaundzha dam. Temperature distribution across the dam on 30.01.1957 [17]: 1 – stone riprap; 2 – sand; 3 – peat; 4 – sandy gravel; 5 – rubbly silt; 6 – weathered, fractured basaltic andesite; 7 – rubbly silt; 8 – temperature borehole; 9 – permafrost boundary (position by the end of dam construction) [17]

песка с примесью пылеватых частиц 10–20 %. Грунт ядра плотины в карьере имел следующий гранулометрический состав: щебень и дресва 40–50 %, мелкозем с фракциями менее 0,25 мм 15–20 %. Число пластичности в пределах 8,5–9,3. Суглинок для ядра плотины заготавливался в карьере бульдозерами послойно по мере естественного оттаивания и укладывался в талом состоянии при положительных температурах воздуха. В нижней части зуба грунт уплотнялся вручную, а в дальнейшем грунт уплотнялся бульдозерами или 10-тонными катками. На рис. 4 показаны типичное поперечное сечение плотины и температурное поле, отражающее работу замораживающих колонок [17].

Бетонный водослив, тип – гравитационный, практического профиля автоматического действия (саморегулирующийся, без затворов) с шириной водосливного фронта 142,3 м, высотой 10,5 м расположен в скальных грунтах на левом берегу речной долины, на отметке 771 м и рассчитан при НПУ 780 и напоре 9 м на пропуск 338 м³/с (P=1%), а при ФПУ 780,5 (P=0,1%) – 551 м³/с. Водослив сопрягается с земляной плотиной при помощи устоя и по длине разделен температурными швами на 7 секций. Отвод воды осуществляется каналом траншейного типа. Противофильтрационные устройства в основании водосбросного тракта отсутствуют.

Эксплуатация. Для образования мерзлого

массива в теле и основании плотины в периоды строительства и эксплуатации использовались различные типы замораживающих систем. Первоначально для промораживания грунтов тела плотины и подруслового талика в зимний период была устроена воздушная замораживающая система вертикальных замораживающих колонок на участке длиной 330 м, с шагом 1,5 м в русле и 2 м в остальной части. Система состояла из 494 вертикальных коаксиально расположенных труб диаметром 100 и 57 мм, длиной от 16 до 24 м, заглубленных в коренные породы основания на 6 – 10 м. Внутренние трубы подсоединялись к металлическому коробу, из которого воздух откачивался вентилятором производительностью 10 000 м³/ч. Расход воздуха через одну колонку 200 м³/ч. Один вентилятор обслуживал 50 колонок. В течение 1953 – 1954 гг. этой системой охлаждения удалось переморозить подрусловый талик.

К зиме 1955 г. плотину отсыпали на высоту 7,2 м, но вынуждены были приостановить её дальнейшую отсыпку, так как в августе этого же года при заполнении водохранилища на 3 м под бетонным водосливом была обнаружена фильтрация, которая имела прогрессирующий характер. Произошло это по причине отсутствия под водосбросом каких-либо противофильтрационных устройств. Эта часть гидроузла была запроектирована и построена по второму принципу, т.е. по талому варианту.

С мая 1955 г. по май 1957 г. талик развился на глубину более чем 45 м и в сторону плотины на 90–95 м. Этот процесс сопровождался нарастанием фильтрационных расходов, что потребовало специальных мероприятий. Здесь явное грубое нарушение СНиП – совмещение по водонапорной линии двух принципов строительства при возведении гидроузлов в условиях криолитозоны.

Процесс оттаивания стал приобретать угрожающий характер, поэтому произвели следующие работы: зацементировали протаявшие участки основания, усилили замораживающую систему, перед водосбросом сделали отсыпку суглинистого понура толщиной 0,3 – 0,5 м, отсыпали низовой откос плотины гравийно-галечным грунтом. В конце августа 1957 г. воздушная замораживающая система, работающая только зимой, была заменена на круглогодично действующую рассолную систему. Жидкостная замораживающая система была установлена на расстоянии 2 м от воздушных колонок с шагом 1,5 м. Для возврата воды в водохранилище были построены зумф и насосная станция. Объём перекачки доходил до 7 тыс.м³/сут.

К концу 1959 г. отмечена наибольшая угроза разрушения плотины из-за утечки рассола из замораживающей системы и суффозии засоленного грунта ядра – в теле плотины образовались пустоты и провалы воронки. Аварийную ситуацию удалось ликвидировать только в 1960–1962 гг. в результате проведения цементации трещиноватых скальных пород в основании водосброса и плотины на глубину 40 м от гребня [18]. Это сократило фильтрационный поток более чем в 10 раз и позволило в 1962 г. вновь создать мерзлотную завесу в ядре плотины и основании до 20 м, но на участках, где не наблюдалась фильтрация. Так выглядела ситуация на Маяндженском гидроузле Аркагаалинской ГРЭС на период с конца 60-х – начала 70-х гг. прошлого столетия. На тот момент были сделаны следующие выводы. Основной принципиальной ошибкой проектировщиков и строителей, реализовавших это проектное решение, было совмещение двух принципов использования грунтов тела и основания плотины по напорному фронту. Бетонный водослив был построен без каких-либо противифльтрационных устройств, а также без сохранения вечной мерзлоты в основании, а земляная плотина – с её сохранением. В результате этого интенсивное оттаивание скальных трещиноватых грунтов в основании водослива начало оказывать отепляющее воздействие на состояние льдогрунтовой стенки в земляной плотине. Устранение этого влияния потребовало больших ремонтных работ и значительных материальных затрат. Даже после

20 лет эксплуатации не представлялось возможным говорить об установлении температурного режима сооружения. Недостатком конструкции водосбросного сооружения является недостаточное заглубления зуба ядра плотины в основание – зуб не прорезал слабые аллювиальные отложения и не был врезан в коренные породы.

В последующие годы мероприятия по обеспечению устойчивости гидроузла продолжались. Так в 1974 – 1977 гг. с целью сокращения фильтрационных потерь и улучшения термического режима сооружения было выполнено расширение верховой призмы плотины на 15–34 м в сторону водохранилища с одновременным повышением отметки гребня на 1–2 м. В результате эксплуатации было установлено, что надежная работа мерзлого противифльтрационного ядра плотины обеспечивается при его толщине 3 м, которую так и не удалось реализовать.

По данным обследования и исследований гидроузла Северо-Восточной научно-исследовательской станции Института мерзлотоведения СО РАН, проведённых в конце прошлого – начале настоящего веков, следует, что оно находится в удовлетворительном состоянии и выполняет возложенные на него функции обеспечения водой ГРЭС. Однако с точки зрения теплового режима, гидроузел претерпел большие изменения. В результате длительной эксплуатации сооружение перешло из мерзлого в талое состояние. С 1998 г. морозильная система была отключена. В настоящее время плотина работает по II (талому) принципу [19].

На рис.5 изображена динамика нулевой изотермы в продольном сечении плотины за период с 1999 по 2016 г., а на рис. 6 показано положение кривой депрессии, разрез ПК 3+50 по состоянию на 09.08.2005 г. [20].

Гидроузел на р. Матта

Гидроузел на р. Матта в Горном районе РС(Я) [21] возведен для водоснабжения пос. Бердигестях, сооружение III класса капитальности (рис. 7). Координаты 61°59'с.ш., 132°23' в. д. Годы строительства 1987–1988, пуск в эксплуатацию в 1989 г.

Район расположения гидроузла относится к восточному склону древней аллювиальной равнины Лено-Вилуйского междуречья. Абсолютные отметки на водоразделах достигают 300–340 м. Климат резко континентальный. Среднегодовая температура воздуха за период 1961–1990 гг. равна –10°С. Однако в связи с изменением климата за период с 1981–2010 гг она повысилась на 2–3°С. Изменилось и количество выпадаемых осадков, которое увеличилось в среднем на 3 мм и составило 307 мм. Среднегодовая скорость ве-

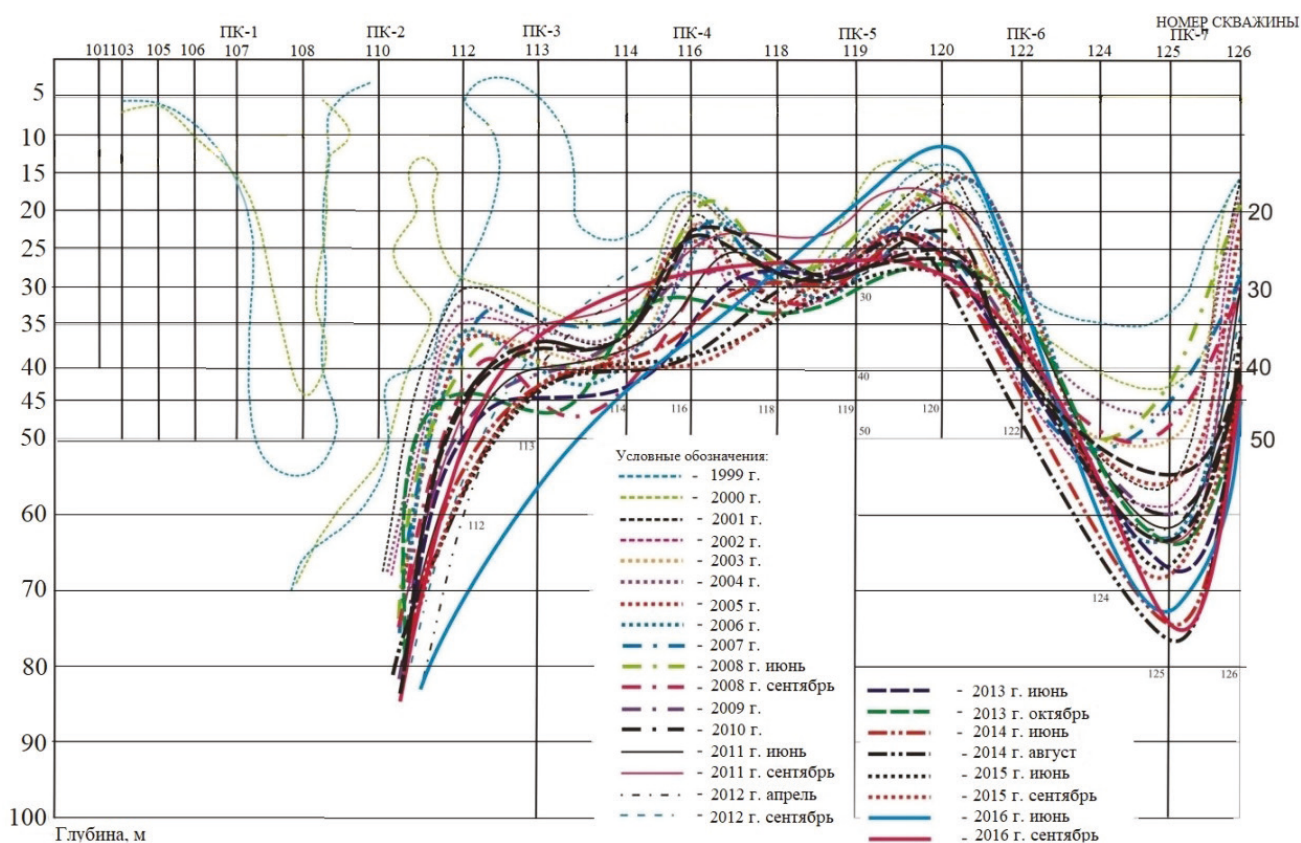


Рис. 5. Плотина на р. Мяунджа, Аркагалинская ГРЭС. Динамика нулевой изотермы в продольном сечении плотины за период с 1999 по 2016 г. [20]

Fig. 5. Myaundzha dam. Dynamics of 0°C isotherm in the dam cross-section from 1999 to 2016 [20]

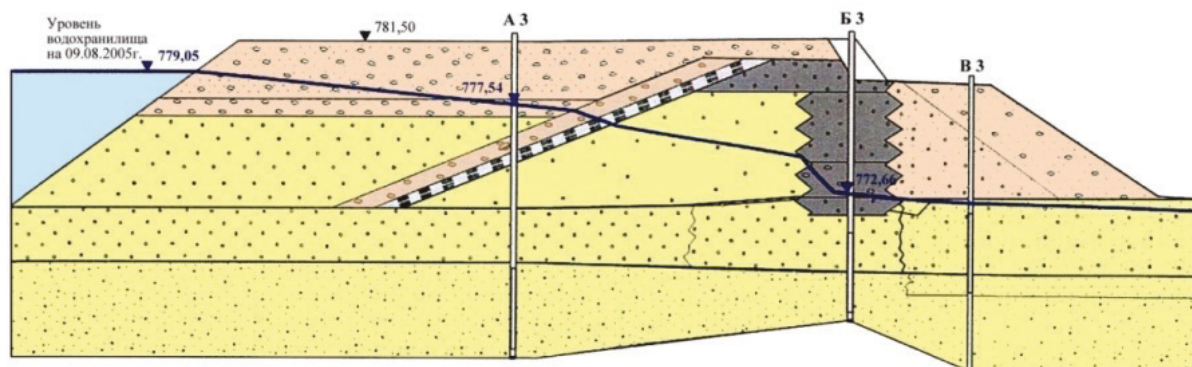


Рис. 6. Плотина р. Мяунджа, Аркагалинская ГРЭС. Положение кривой депрессии, разрез ПК 3+50 по состоянию на 09.08.2005 [21]

Fig. 6. Myaundzha dam. Position of the seepage line at sta. 3+50 on 09.08.2005 [21]

тра равна 3 м/с.

В геологическом отношении района принимают участие различные по возрасту, но близкие по литологическому составу юрские и меловые терригенные отложения, залегающие на сильно эродированной поверхности кембрийских осадочных пород и кристаллических сланцев докембрия. Мезозойские отложения несогласованно перекрываются рыхлыми неогеновыми отложениями, лежащими на горизонтах юры и нижнего мела [22].

Четвертичные отложения покрывают водо-

разделы и представлены элювием неогена и современным аллювием в долинах рек, ручьев и временных водотоков. Отложения представлены мерзлыми покровными суглинками с косой и горизонтальной криотекстурой влажностью до 32 %. Покровные суглинки подстилаются мерзлыми песками с массивной криогенной текстурой, их влажность достигает 27 %. Наибольшая влажность грунтов до 80–90 % отмечена в верхних слоях многолетнемерзлых пород. На склонах долин развит делювиально-солифлюкционный покров. Важное значение в формировании мик-



Рис.7. Гидроузел на р. Матта. Общий вид плотины (октябрь 2016 г.) [21]

Fig. 7. Dam on Matta River. A general view (october 2016) [21]

ро- и мезорельефа имеют криогенные процессы, связанные с суровым климатом и наличием многолетнемерзлых пород.

Повсеместно развит полигональный микро-рельеф. Территория гидроузла относится к зоне сплошной криолитозоны. Мощность многолетнемерзлых пород достигает 400 м. Температура пород на глубине годовых колебаний изменяется от -3 до -5°C , глубина сезонного протаивания в различных ландшафтных условиях от 0,4 до 2 м.

В гидрогеологическом отношении рассматриваемый район относится к Ленскому бассейновому округу, речного бассейна р. Лена, водохозяйственного участка – Лена от устья р. Олёкма до водомерного поста г. Покровск. Водоток второго порядка. Протекает по территории Горного района РС(Я). Является левым притоком р. Синяя и впадает в нее на 118 км от её устья. Длина реки – 195 км, площадь водосборного бассейна – 4110 км². На правом берегу – с. Бердигестях. По данным наблюдений с 1975 по 1992 г. среднегодовой расход воды в районе села (151 км от устья) составляет 1,19 м³/с. Основной приток р. Матта – руч. Дугда, впадающий в неё слева [23, 24].

В состав гидроузла входят следующие гидротехнические сооружения: водохранилище сезонного регулирования, глухая земляная плотина, сифонный водосброс. Водохранилище долинного типа, сезонного регулирования. Полный объём 3470 тыс. м³, полезный объём 3124 тыс. м³, длина 4,8 км. Отводящий канал длиной 450 м, земляной без облицовки, рассчитан на пропуск 143,4 м³/с.

Плотина – земляная мерзлого типа (рис.8), высотой 11 м (отм. гребня 217,0), глухая, шириной

по гребню 9 м, длиной 774 м, заложение откосов верхового 1: 5, низового – 1: 2. Отметки ФПУ 216,0 м, НПУ 214 м, напор 5 м. Отсыпана из супесчано-суглинистых разностей. Для сброса паводковых вод и бытовых попусков плотина оборудована 16 металлическими сифонами диаметром 1420 мм с общим расходом 143,4 м³/с и двумя сифонами диаметром 325 мм, расходом 0,46 м³/с для санитарного сброса воды из водохранилища. Грунты основания представлены мерзлыми коренными породами юрского возраста в виде мелкозернистых слаболитифицированных песчаников, в которых встречаются горизонты, содержащие угли мощностью до 40 см. Коренные породы перекрыты сверху суглинками до глубины 5–6 м (влажность от 13 до 22,2 %), ниже до глубины 8 м пылеватыми песками с влажностью, близкой к полной влагоемкости. Суглинки темно-серые, серые и бурые, легкие, сильно льдистые, имеют косо- и горизонтально-слоистые криогенные текстуры, местами содержат растительные остатки.

Проект составлен институтом «Якутгипроводхоз». Гидроузел явился экспериментальным, так как до этого в водохозяйственной практике в Якутии водосбросы сифонного типа на пропуск таких расходов не применялись. Учитывая возможность гидродинамической катастрофы, грозящей затоплением п. Бердигестях в результате прорыва плотины, по просьбе Проектно-строительного объединения по мелиорации и водному хозяйству «Якутводмелиорация» Институт мерзлотоведения СО РАН в 1990 г. организовал мониторинговые исследования на гидроузле.

Эксплуатация. Исследования показали, что в период эксплуатации в теле и основании плотины

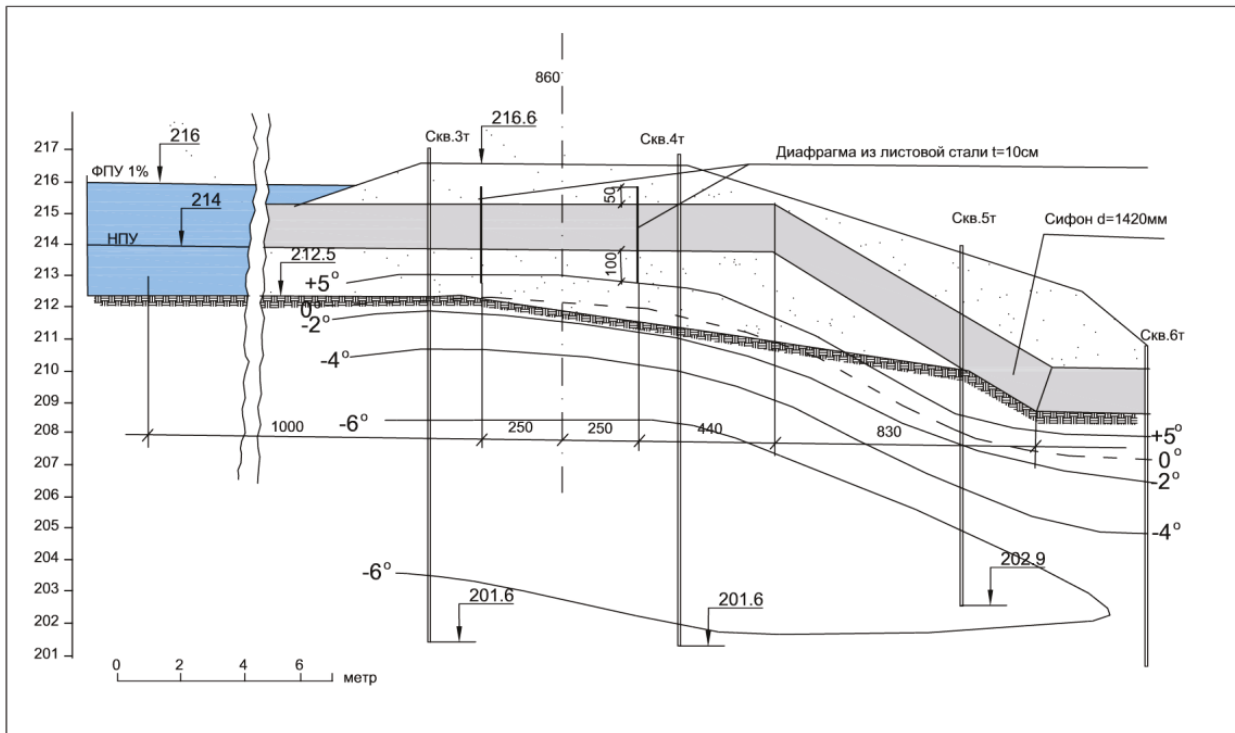


Рис. 8. Гидроузел на р. Матта. Температурное поле тела и основания плотины в сечении на ПК 4+75 в августе 1994 г. [25]
Fig. 8. Matta dam. Temperature distribution in the dam embankment and foundation, sta. 4+75, August 1994 [25]

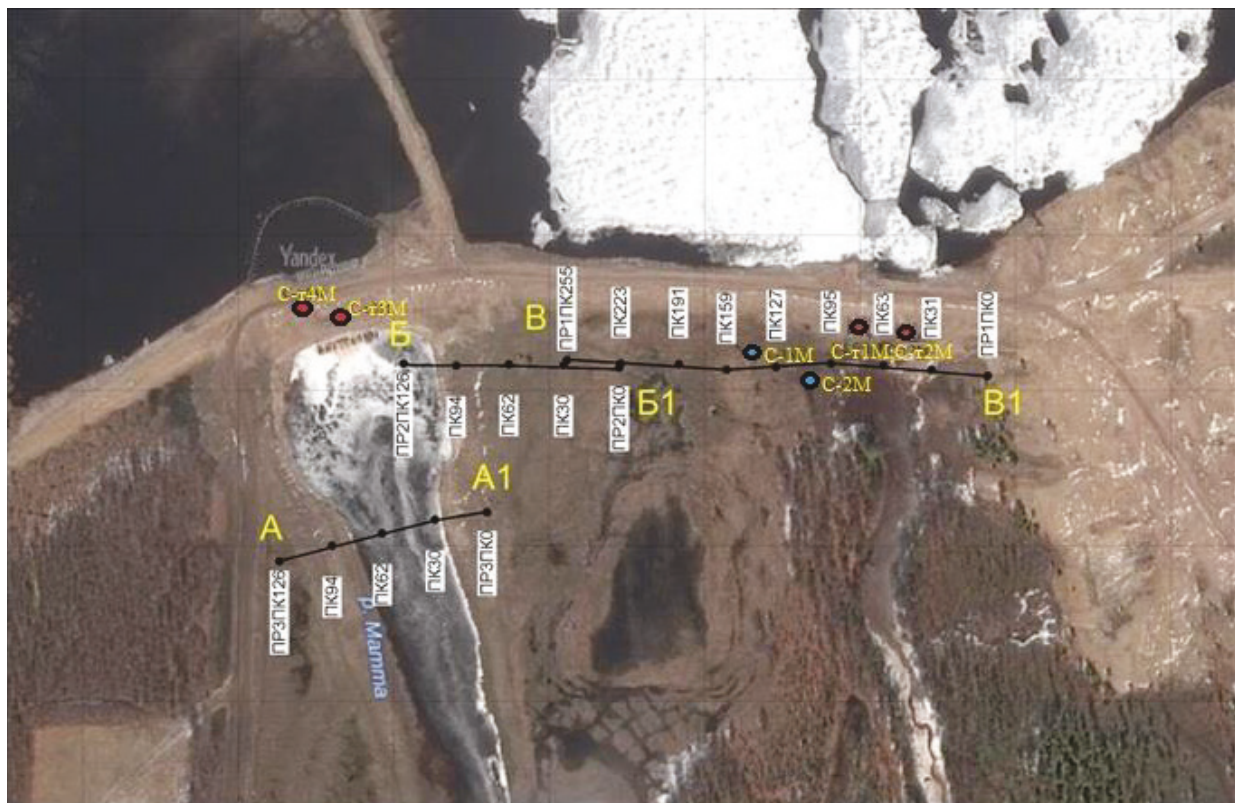


Рис. 9. Гидроузел на р. Матта. Схема расположения буровых скважин и геофизических профилей (октябрь 2016 г.) [21]
Fig. 9. Matta dam. Location of boreholes and geophysical profiles (october 2016) [21]

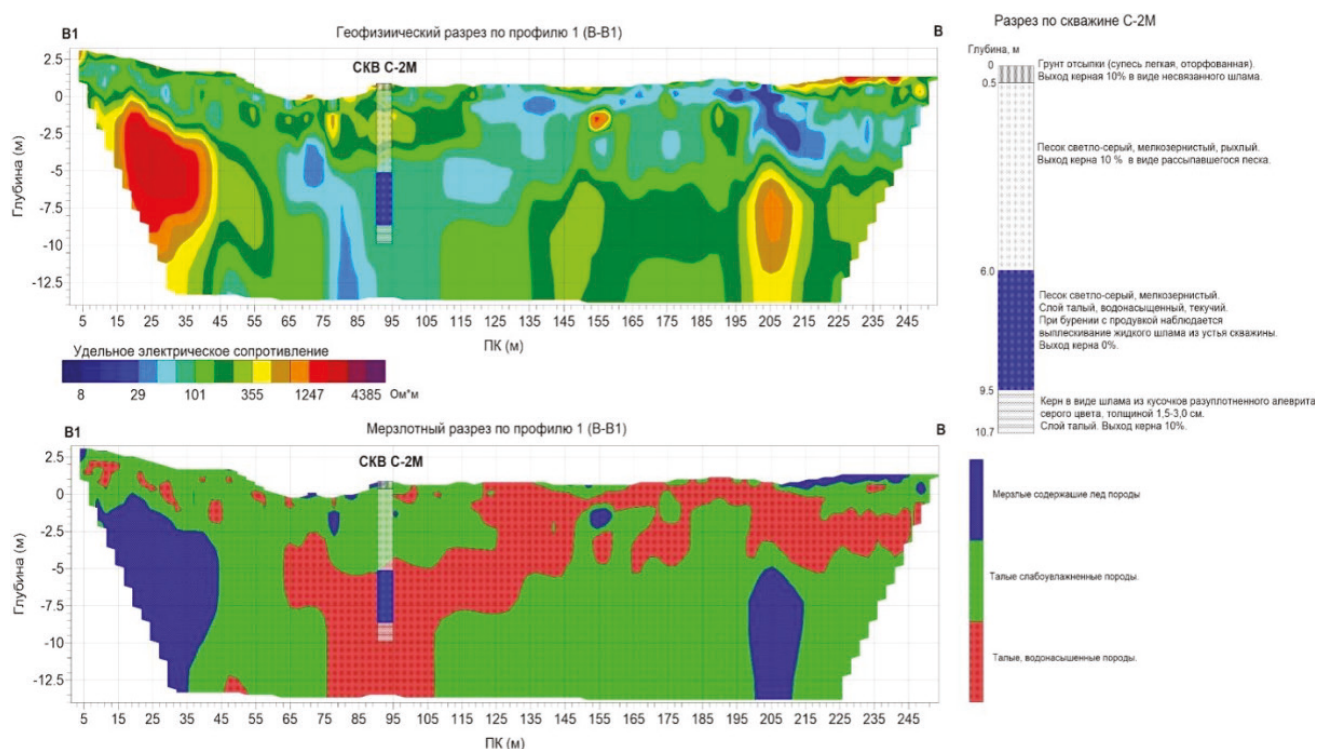


Рис. 10. Гидроузел на р. Матта. Геофизический (верхний) и геокриологический (нижний) профили в нижнем бьефе плотины [21]
Fig. 10. Matta dam. Geophysical (upper) and geocryological (lower) profiles in the downstream area [21]

происходят сложные температурно-криогенные процессы. Построенная по первому принципу плотина в результате работает по таломерзлому варианту. Таломерзлое состояние присутствует в продольном и поперечном сечениях плотины. В русловой части сохраняется постоянный талик (в интервале глубин 205,5 – 210,5 м), в гребне и под сифонами максимальный талик, по которому происходит фильтрация воды из водохранилища (рис. 8), зафиксирован на отметке 213,3 м (протаивание равно 4,3 м). Зимой под сифонами талик промерзает (сифоны играют роль охладителей). На откосах плотины и бортовых примыканий образуются наледи, что чревато негативными последствиями [25].

Учитывая сложное инженерно-геокриологическое состояние тела и основания плотины в 1989 г., был разработан проект жидкостной замораживающей системы из 18 термосифонов диаметром 219 мм. К сожалению, проект не был осуществлен.

Геокриологические исследования вновь были продолжены на гидроузле в 2016 г. в связи с тем, что грунтовая плотина фильтрует и существует угроза потери статической устойчивости. Цель исследований – оценка геокриологического состояния гидроузла, организация геокриологического мониторинга и предложения технических рекомендаций по повышению его устойчивости. В состав исследований входили буровые, физико-механические, геотехнические, геофизические,

геотермические и фильтрационные работы [21]. На рис. 9 показана схема расположения буровых скважин и геофизических профилей в октябре 2016 г.

Исследования показали, что плотина работает по таломерзлому варианту, имея при этом сложную геокриологическую картину по продольному разрезу. В основании плотины существует талик (рис. 10). Это подтверждено геотермическими и геофизическими исследованиями. Температура грунтов в скважинах т3м и т4м через 22 года (1994 – 2016 гг.) эксплуатации на глубине 10 м повысилась на 5,5°C [21].

В заключение следует отметить, что хотя гидроузел работает с октября 1989 г. по настоящее время, т.е. 30 лет, он постоянно требует производства ремонтных работ. Плотина, построенная по мерзлому варианту, в результате эксплуатации перешла в талое состояние. Обусловлено это, по нашему мнению, потеплением климата. Среднегодовая температура воздуха для районов Центральной Якутии повысилась почти на 3° С.

По-прежнему существует проблема пропускной способности запроектированного сифонного водосброса – ее нехватка. Поэтому для увеличения сбросных расходов дополнительно в 2015 г. в районе русла были построены еще шесть сифонов диаметром 500 мм. Кроме этого существуют проблемы и с эксплуатацией сифонных водосбросов. Часто из-за осенних половодий сифоны оказываются затопленными и зимой вода в них замерзает.

Образовавшийся лед перед паводками удаляется. Требуется исследование по обоснованию проектирования аванкамер, так как при работе сифонов происходит размыв между сифонами. Конструктивно не обеспечена устойчивость сифонов – во время работы происходят значительные вертикальные перемещения, грозящие их разрушением.

В целом для обеспечения устойчивости гидроузла необходимо провести более тщательные комплексные инженерно-геокриологические исследования объекта, восстановить мониторинговую сеть и вернуться к рассмотрению проекта по возможному оборудованию гидроузла замораживающей системой.

Выводы

На примере Мяунджеского гидроузла и гидроузла на р. Матта получен ценный научный и практический результат – в суровых климатических и сложных геокриологических условиях криолитозоны Восточной Сибири возможен переход гидротехнического сооружения из мёрзлого состояния в талое [26]. При этом сооружения обладают статической и противифльтрационной устойчивостью. Следует отметить положительную роль мониторинга на сооружениях, благодаря которому предотвращен ряд аварий на гидроузлах. В дальнейшем возникает принципиальный вопрос о формировании принципов строительства гидротехнических сооружений в условиях криолитозоны, который должен быть четко прописан в Сводах правил.

Литература

1. СНиП 2.06.05-84*. Плотины из грунтовых материалов. М., 1991. 49 с.
2. Чжан Р.В. Температурный режим и устойчивость низконапорных гидроузлов и грунтовых каналов в криолитозоне. Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2002. 207 с.
3. Рекомендации по проектированию и строительству плотин из грунтовых материалов для производственного и питьевого водоснабжения в условиях Крайнего Севера и вечной мерзлоты. М.: НИИВОДГЕО; Стройиздат, 1976. 112 с.
4. Биянов Г.Ф. Плотины на вечной мерзлоте. М.: Энергия, 1975. 184 с.
5. Чжан Р.В. Прогноз температурного режима низко- и средненапорных грунтовых плотин в Якутии. Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 1983. 43 с.
6. Биянов Г.Ф., Когодовский О.А., Макаров В.И. Грунтовые плотины на вечной мерзлоте. Якутск: ИМЗ СО АН СССР, 1989. 152 с.
7. Всероссийская конференция «Изменение климата в XXI веке: современные тенденции, прогностические сценарии и оценка послед-

ствий». СПб.: ИНЕНКО, 2005. 47 с.

8. Павлов А.В., Малкова Г.В. Современные изменения климата на севере России. Новосибирск: Изд-во «Гео», 2005. 55 с.

9. Балобаев В.Т., Скачков Ю.Б., Шендер Н.И. Прогноз изменения климата и мощности мерзлых пород Центральной Якутии до 2200 г. // География и природные ресурсы. Новосибирск: Наука, 2009, № 2. С. 50–56.

10. Козлов В.И. Аритмия Солнца или ... «фазовая катастрофа»? // Наука и техника в Якутии. 2018. № 2 (35). С. 56–62.

11. Горохов А.Н., Федоров А.Н. Современные тенденции изменения климата в Якутии // География и природные ресурсы. 2018. №2. С. 111–119. doi: 10.21782/GiPR0206-1619-2018-2(111-119).

12. СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. М., 1990. 71 с.

13. СНиП II-7-81* Строительство в сейсмических районах (утв. постановлением Госстроя СССР от 15 июня 1981 г. № 94) (с изменениями от 27 декабря 1999 г.). 68 с.

14. Декларация безопасности комплекса гидротехнических сооружений Аркагаалинской ГРЭС. п. Мяунджа, 2012.

15. Геология СССР. Т. XXX (Северо-Восток СССР). М.: Недра, 1970. 536 с.

16. Геокриология СССР. Восточная Сибирь и Дальний Восток / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Недра, 1989. 515 с.

17. Цветкова С.Г. Опыт строительства плотин в районах распространения многолетнемерзлых грунтов // Материалы к основам учения мерзлой коры. Вып. VI. М.: Изд-во АН СССР, 1960. С. 87 – 110.

18. Ведерников А.Е. Мерзлотные процессы в теле и основании плотин на р. Мяунджа // Труды ВНИИ-1. Магадан, 1963. Т. 22. С.179–237.

19. Геотермические, фильтрационные и статические исследования земляной плотины. Обоснование перевода земляной плотины из мёрзлого в талое состояние. ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2005–2007 гг.

20. Гулый С.А. Особенности температурного и фильтрационного режимов грунтовой плотины на р. Мяунджа // Наука и техника в Якутии. 2017. № 2. С.16–22.

21. Готовцев С.П., Сыромятников И.И. Термовлажностный режим низконапорных гидроузлов «Куогалы» и «Матта»: Научно-технический отчет по контракту № 153-у/ЗК с ГБУ «Управление по мелиорации земель и сельхозводоснабжению МСХ и ПП РС (Я) по теме «Геокриологический мониторинг термовлажностного режима гидротехнических сооружений Центральной Якутии». Фонды ИМЗ СО РАН. Якутск, 2016. 77 с.

22. Игнатенко Н.А. Геологическое строение и

формирование Якутско-Кангаласского района. М.: Изд-во АН СССР, 1961.

23. *Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т. 17. Ленско-Индигирский район. Вып. 2. Средняя Лена / Под ред. И. В. Осиповой. Л.: Гидрометеиздат, 1965. 164 с.*

24. *Схема комплексного использования и охраны водных объектов бассейна р. Лена. Кн. 1. Общая характеристика речного бассейна. Утверждена приказом Ленского бассейнового водного управления Росводресурсов от 2014 г. № 77-п. 2014. 137 с.*

25. *Чжан Р.В. Температурный режим плотины на р. Матта в п. Бердигестях Горного улуса РС(Я). Фонды Института мерзлотоведения СО РАН. Якутск: ИМЗ СО РАН, 1994. 30 с.*

26. *Чжан Р.В. Геокриологические принципы работы грунтовых плотин в криолитозоне в условиях меняющегося климата // Фундаментальные исследования. 2014. № 9 (часть 2). С. 288–296.*

References

1. *SNiP 2.06.05-84*. Plotiny iz gruntovykh materialov. M., 1991. 49 s.*

2. *Chzhan R.V. Temperaturnyy rezhim i ustoychivost' nizkonapornykh gidrouzlov i gruntovykh kanalov v kriolitozone. Yakutsk: Izd-vo IMZ SO RAN, 2002. 207 s.*

3. *Rekomendatsii po proektirovaniyu i stroitel'stvu plotin iz gruntovykh materialov dlya proizvodstvennogo i pit'evogo vodosnabzheniya v usloviyakh Kraynego Severa i vечноy merzloty. M.: NIIVODGEO; Stroyizdat, 1976. 112 s.*

4. *Biyanov G.F. Plotiny na vечноy merzlote. M.: Energiya, 1975. 184 s.*

5. *Chzhan R.V. Prognoz temperaturnogo rezhima nizko- i srednenapornykh gruntovykh plotin v Yakutii. Yakutsk: Izd-vo IMZ SO RAN, 1983. 43 s.*

6. *Biyanov G.F., Kogodovskiy O.A., Makarov V.I. Gruntovye plotiny na vечноy merzlote. Yakutsk: IMZ SO AN SSSR, 1989. 152 s.*

7. *Vserossiyskaya konferentsiya «Izmenenie klimata v XXI veke: sovremennyye tendentsii, prognosticheskie stsennarii i otsenka posledstviy». SPb.: IN-ENKO, 2005. 47 s.*

8. *Pavlov A.V., Malkova G.V. Sovremennyye izmeneniya klimata na severe Rossii. Novosibirsk: Izd-vo «Geo», 2005. 55 s.*

9. *Balobaev V.T., Skachkov Yu.B., Shender N.I. Prognoz izmeneniya klimata i moshchnosti merzlykh porod Tsentral'noy Yakutii do 2200 g. // Geografiya i prirodnyye resursy. Novosibirsk: Nauka, 2009, № 2. S. 50–56.*

10. *Kozlov V.I. Aritmiya Solntsa ili ... «fazovaya katastrofa?» // Nauka i tekhnika v Yakutii. 2018. № 2 (35). S. 56–62.*

11. *Gorokhov A.N., Fedorov A.N. Sovremennyye*

tendentsii izmeneniya klimata v Yakutii // Geografiya i prirodnyye resursy. 2018. №2. С. 111–119. doi: 10.21782/GiPR0206-1619-2018-2(111-119)

12. *SNiP 2.02.04-88. Osnovaniya i fundamenty na vechnomerzlykh gruntakh. M., 1990. 71 s.*

13. *SNiP II-7-81* Stroitel'stvo v seysmicheskikh rayonakh (utv. postanovleniem Gosstroya SSSR ot 15 iyunya 1981 g. № 94) (s izmeneniyami ot 27 dekabrya 1999 g.). 68 s.*

14. *Deklaratsiya bezopasnosti kompleksa gidrotekhnicheskikh sooruzheniy Arkagalinskoy GRES. p. Myaundzha, 2012.*

15. *Geologiya SSSR. T. XXX (Severo-Vostok SSSR). M.: Nedra, 1970. 536 s.*

16. *Geokriologiya SSSR. Vostochnaya Sibir' i Dal'nyy Vostok / Pod red. E.D. Ershova. M.: Nedra, 1989. 515 s.*

17. *Tsvetkova S.G. Opyt stroitel'stva plotin v rayonakh rasprostraneniya mnogoletnemerzlykh gruntov // Materialy k osnovam ucheniya merzloy kory. Vyp. VI. M.: Izd-vo AN CCCP, 1960. S. 87 – 110.*

18. *Vedernikov A.E. Merzlotnye protsessy v tele i osnovanii plotin na r. Myaundzha // Trudy VNII-1. Magadan, 1963. T. 22. S.179–237.*

19. *Geotermicheskie, fil'tratsionnyye i staticheskie issledovaniya zemlyanoy plotiny. Obosnovanie perevoda zemlyanoy plotiny iz merzlogo v taloe sostoyanie. OAO «VNIIG im. B.E. Vedeneeva», 2005–2007 gg.*

20. *Gulyy S.A. Osobennosti temperaturnogo i fil'tratsionnogo rezhimov gruntovoy plotiny na r. Myaundzha // Nauka i tekhnika v Yakutii. 2017. № 2. S.16–22.*

21. *Gotovtsev S.P., Syromyatnikov I.I. Termovlazhnostnyy rezhim nizkonapornykh gidrouzlov «Kuogaly» i «Matta»: Nauchno-tekhnicheskiiy otchet po kontraktu № 153-u/ZK s GBU «Upravlenie po melioratsii zemel' i sel'khozvodosnabzheniyu MSKh i PPRS (Ya) po teme «Geokriologicheskiiy monitoring termovlazhnostnogo rezhima gidrotekhnicheskikh sooruzheniy Tsentral'noy Yakutii». Fondy IMZ SO RAN. Yakutsk, 2016. 77 s.*

22. *Ignatenko N.A. Geologicheskoe stroenie i formirovanie Yakutsko-Kangalasskogo rayona. M.: Izd-vo AN SSSR, 1961.*

23. *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR: Gidrologicheskaya izuchennost'. T. 17. Lensko-Indigirskiy rayon. Vyp. 2. Srednyaya Lena / Pod red. I. V. Osipovoy. L.: Gidrometeoizdat, 1965. 164 s.*

24. *Skhema kompleksnogo ispol'zovaniya i okhrany vodnykh ob"ektov basseyna r. Lena. Кн. 1. Obshchaya kharakteristika rechnogo basseyna. Uтверждена приказом Ленского бассейнового водного управления Росводресурсов от 2014 г. № 77-п. 2014. 137 с.*

25. *Chzhan R.V. Temperaturnyy rezhim plotiny na r. Matta v p. Berdigestyakh Gornogo ulusa RS(Ya).*

Fondy Instituta merzlotovedeniya SO RAN. Yakutsk:
IMZ SO AN SSSR, 1994. 30 s.

26. *Chzhan R.V.* Geokriologicheskie printsipy

raboty gruntovykh plotin v kriolitozone v usloviyakh
menyayushchegosya klimata // Fundamental'nye
issledovaniya. 2014. № 9 (chast' 2). S. 288–296.

Поступила в редакцию 05.03.2019

Принята к публикации 27.03.2019

Об авторе

ЧЖАН Рудольф Владимирович, доктор технических наук, главный научный сотрудник, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Россия, 677010, г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36,
<https://orcid.org/0000-0001-9038-3380>, rvzhang@mpi.ysn.ru.

About the author

ZHANG Rudolf Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher, Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 36, Merzlotnaya st., Yakutsk, 677010, Russia,
<https://orcid.org/0000-0001-9038-3380>, rvzhang@mpi.ysn.ru.

Информация для цитирования:

Чжан Р. В. Современное представление о работе грунтовых плотин среднего и низкого напоров в криолитозоне в условиях потепления климата // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2019. Т. 24, № 1. С. 52–66. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-1-52-66>.

Citation:

Zhang R. V. Current understanding of the performance of medium and small embankment dams on permafrost in a warming climate // Arctic and Subarctic natural resources. 2019. V. 24, no. 1. P. 52–66. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-1-52-66>.