Чжан Р.В.**Опыт строительства гидротехнических сооружений в Якутии и изменение инженерно-геологических условий территории под влиянием гидроузлов и меняющегося климата***Институт мерзлотоведения им П. И. Мельникова СО РАН
(Россия, Якутск)**doi:10.18411/spc-12-03-2018-09**ids: 000001:spc-12-03-2018-09***Аннотация**

По хозяйственному назначению гидротехнические сооружения в Якутии возводятся для создания водохранилищ гидроэлектростанций, хвостохранилищ горнообогатительных предприятий, прудов охладителей тепловых электростанций, водоснабжения населенных пунктов и промышленных предприятий, а также сельскохозяйственных нужд. Приводится опыт строительства гидротехнических сооружений на территории Якутии. Рассмотрены инженерно-геокриологические особенности формирования температурно-криогенного режима этих сложных природно-технических систем в суровых природно-климатических и сложных геокриологических условиях криолитозоны. Показана роль мониторинга, как способа ранней диагностики состояния сооружений с целью принятия превентивных мер по обеспечению устойчивости гидроузлов.

Ключевые слова: криолитозона, многолетнемерзлые породы, гидроузел, плотина, температурно-криогенный режим, природно-техногенная система, теплообмен, фильтрация, устойчивость сооружения.

По хозяйственному назначению гидротехнические сооружения в Якутии возводятся для создания водохранилищ гидроэлектростанций, прудов охладителей тепловых электростанций, хвостохранилищ горнообогатительных предприятий, водоснабжения населенных пунктов и промышленных предприятий, а также сельскохозяйственных нужд. Гидротехническое строительство в условиях крайнего Севера, в криолитозоне, существенно отличается от районов вне зоны распространения многолетнемерзлых пород и выделено в самостоятельное направление – гидротехника Крайнего Севера.

В практике северного гидростроительства получили широкое распространение плотины из местных материалов – земляные, каменно-земляные, каменно-набросные. Фильтрационная устойчивость плотин в зависимости от климатических, геологических и инженерно-геокриологических условий оснований обеспечивается противофильтрационными элементами (экраном или ядром), которые в зависимости от температурного состояния определяют тип плотин – талый (фильтрующие) и мерзлый (нефильтрующие). Ниже по тексту будут рассмотрены все гидроузлы энергетического профиля и отдельные питьевого и сельскохозяйственного назначения.

Гидротехнические сооружения энергетического назначения

Гидротехнические сооружения энергетического назначения представлены двумя гидроузлами, расположенные в Западной Якутии, на р. Виллой левом притоке р. Лена, объединенные в каскад Виллюйских ГЭС: Виллюйская ГЭС–1,2 (пос. Чернышевский), Виллюйская ГЭС-3 (Светлинская ГЭС, пос. Светлый) и плотиной Нерюнгринской ГРЭС на р. Олонгоро (пос. Серебряный бор, Южная Якутия).

Природно-климатические, геологические, инженерно-геокриологические, гидрогеологические условия строительства довольно подробно изложен в научно-

технической литературе [1], [2], [3], [4], [5], [6]. Изыскания и исследования района строительства ГЭС засвидетельствовали сложные природно-климатические, геологические и инженерно-геокриологические условия района. Наличие многолетнемерзлых пород и непростые криогидрогеологические условия осложняют устойчивую работу гидротехнических сооружений ГЭС. Мониторинговые исследования за гидроузлом показали, что комплекс гидротехнических сооружений, входящий в состав гидроузла, образовали сложную природно-техническую систему, которая стала «жить» по законам естественной природы, одновременно оказывая техногенное влияние на неё.

Вилуйская ГЭС-1, 2 – это первая гидроэлектростанция в мире, построенная в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород. Установленная мощность электростанции 680 МВт. Предназначена для энергоснабжения Западного Якутского района Республики Саха (Якутия). Гидроузел расположен в верхнем течении реки Вилуй, на 1348 км от устья, вблизи пос. Чернышевский Мирнинского района (координаты: 63°01' с. ш. 112°28' в. д.). Годы строительства гидроузла 1959 - 1967 гг, 1970 г - начало эксплуатации.

В климатическом отношении район каскада Вилуйских ГЭС относится к Восточно-сибирской климатической области. Климат района резко континентальный с продолжительной холодной зимой и коротким, но относительно теплым летом при большем диапазоне годовых и суточных амплитуд температуры воздуха. Среднегодовая температура воздуха за многолетний период составляла -7,90С. Среднегодовое количество осадков около 380 мм. Наибольшая высота снежного покрова составляет около 80 см, максимальная наблюдаемая за зиму - около 100 см. Таковы были климатические параметры района до начала возведения гидроузла. За период эксплуатации сооружений средняя годовая температура воздуха повысилась на 1,7°С и составила - 6,2°С, а количество осадков в среднем увеличилось на 43 мм.

При изложении результатов исследования на гидроузлах Вилуйского каскада ГЭС, как впрочем и на других гидротехнических сооружениях, мы старались подчеркнуть трансформацию природной среды под влиянием деятельности человека и изменении климата на Земле, а также обратить внимание на условия, в которых стали функционировать сооружения.

В геологическом отношении гидроузел расположен в восточной части Сибирской платформы в области сочленения двух крупных разновозрастных структур – верхнепалеозойской Тунгусской синеклизы и мезозойской Вилуйской впадины. Представляет территорию, где развиты три комплекса пород двух формаций (осадочных и магматических), перекрывающих друг друга: нижнепалеозойский (кембрий - ордовик), верхнепалеозойский (пермь - карбон) и мезозойский (триас - юра). В створе плотины геологическое строение долины р. Вилуй определяется мощными интрузиями диабазов: на правом склоне в его верхней части включающими ксенолиты пермских песчано-глинистых и известковых пород, на левом – туфогенными породами триаса. Практически весь массив диабазов разбит системой трещин различной ориентации.

Четвертичные отложения представлены песчано-галечными аллювиальными породами, а также щебенистым суглинком [7] (Ефимов, 1959).

Район относится к сплошной криолитозоне, мощностью 200-400 м, с температурой грунтов от -2 до -60С. Глубина сезонного протаивания в зависимости от литологического состава, влажности и орографии изменяется от 0,5 до 5 м. Льдистость коренных пород не превышает 1-3%, рыхлых четвертичных – 25-35%, озерно-болотных до 100%. Криогенные образования представлены солифлюкцией, буграми пучения,

термокарстам и наледями [3], [5]. Гидрогеологические условия определяются принадлежностью гидроузла к Якутскому артезианскому бассейну. Подземные воды представлены надмерзлотным горизонтом сезонноталого слоя и подмерзлотным водоносным горизонтом, на глубинах 300 – 320 м, минерализованных вод (150 г/л)[5].

В состав гидроузла входят следующие гидротехнические сооружения:каменно-набросная плотина; здания ГЭС-1 и 2 с подводящими и отводящими каналами, водоприемниками, напорными водоводами; водосброс;водосбросной канал; водохранилище. Ниже приведена краткая характеристика только тех сооружений, на которых проводятся мониторинговые исследования.

Каменно-набросная плотина талого типа с суглинистым экраном переходящим в основании в бетонный зуб, а в верхней части в ядро, прикрытого песчано-гравийной смесью. Высота плотины 75 м, длина по гребню 600 м. При возведении плотины выветрелые коренные породы и рыхлые четвертичные отложения основания были удалены. Сопряжение экрана со скальным осуществлено с помощью армированной плиты и потерны, из которой в последствие произведена цементация основания по всему створу. Противофильтрационное устройство – экран отсыпан из суглинисто-дресвяных грунтов по двойному обратному фильтру из дроблёного долерита. Следует отметить, что на строительстве Вилуйской ГЭС впервые в мировой практике была разработана технология возведения противофильтрационного устройства из связных грунтов при температуре наружного воздуха до минус 400С [8], [9].

Низовая упорная призма отсыпалась из крупнообломочных пород с небольшим количеством мелкозема слоями 10-20 м пионерным способом с верхней бровки уступа, главным образом зимой, с уплотнением груженым автотранспортом. Летом для уплотнения наброски использовались гидромониторы.

Бетонный водосброс береговой, практического профиля расположен в правобережном примыкании плотины ГЭС-1 и представляет собой однопролетное отверстие шириной 40м с порогом на отм.231,0м, перекрываемое сегментным стальным затвором высотой 16,0м. Расход при НПУ- 3900 м3/сек, при ФПУ - 5200м3/сек. Водосброс имеет горизонтальный порог длиной 20,4 м и продолжается криволинейным в плане водосбросным каналом открытого типа.

Конструктивные особенности гидроузла обусловили динамику формирования его температурно-криогенного режима. Не останавливаясь на тонкостях теплообмена в различных частях тела и основания плотины, эти процессы подробно описаны в трудах А.Е. Демидова [10], Р.М.Каменского[11], Б.А. Оловина[12], Н.А. Мухетдинова[13], Я. А. Кроника[14], отметим общие тенденции формирования термо-криогенного процесса.

За период эксплуатации гидроузла, особенно в первые годы, в теле и основании сооружения происходили знакопеременные тепловые процессы в продольном и поперечных направлениях сооружения. Причем разнонаправленные процессы могли происходить одновременно. Такое тепловое состояние безусловно формировало и формирует в нём сложное термонапряженное состояние и требует пристального контроля за устойчивостью как отдельных узлов, так и сооружения в целом. Сооружение до сих пор остаётся в неустановившемся термонапряженном состоянии, а исследование температурно-криогенного режима гидроузла показало сложную динамику его формирования на фоне круглогодичного разрушения каменной наброски с образованием мелкозема, закупоривающего поры наброски[15].

В настоящее время устойчивость гидроузла в целом соответствует нормам безопасности, регламентированной директивными документами. Однако проблемы устойчивости правобережного примыкания плотины, выявленные на основе

анализа многолетних мониторинговых наблюдений свидетельствуют о том, что с 1996 г. наметились деформации правобережного массива. Причиной потери устойчивости массива явилось резкое повышение, до положительных значений, температуры пород.

Развитие таликовой зоны в правобережном примыкании плотины свидетельствует об активизации тепловых процессов в ксенолитах карбонатных пород, свойства и контуры которых в период изысканий были исследованы не в полной мере. Оказалось, что эти породы при оттаивании теряют не только прочностные, но и фильтрационные свойства. В настоящее время проводится доисследование инженерно-геокриологических условий этого участка и разрабатывается проект реконструкции правобережного примыкания.

Водохранилище долинного типа, сезонного регулирования. Характерной особенностью водохранилища является очень сложная конфигурация его береговой линии, представляющая собой чередование озеровидных расширений и каньонообразных участков, присутствие многолетнемерзлых льдистых пород, и сложная гидрогеологическая обстановка, обусловленная наличием высоко минерализованных подземных вод. Площадь водной поверхности при НПУ 245,0 м составляет 2170 км², площадь затопления земель – 1112 км². Длина водохранилища 470 км, ширина до 18 км, глубина до 70 м. Полная и полезная емкость водохранилища соответственно равны 40,4 и 22,4 млн. м³. Общая протяженность береговой линии составляет более 2500 км. Берега были систематизированы по геологическому строению, типизированы по размываемости и морфологии (скальные, нейтральные, аккумулятивные, термоденудационные, термоабразионные, термокарстовые) [16], [17], [18].

Заполнение водохранилища до НПУ происходило с 1967 по 1973 годы. С тех пор водохранилище эксплуатируется в нормальном режиме, отражающий внутригодовой сток и график сработки.

Аналогов строительства и эксплуатации подобного водохранилища в криолитозоне не было. Поэтому с самого начала его эксплуатации была поставлена цель изучить процессы теплового и механического взаимодействия ложа и берегов с водными массами, а также разработать методику расчета изменения их морфологических параметров.

Многолетние мониторинговые наблюдения и теоретические разработки показали особенности морфологии ложа и берегов водохранилищ в криолитозоне. Средние скорости разрушения термоабразионных берегов Вилуйского водохранилища за многолетний период эксплуатации (1970–2011 гг.) составили 0,35–1,41 м/год. Морфологические исследования показали, что со временем вмещающий объем ложа водохранилищ в криолитозоне увеличивается. Для Вилуйского водохранилища за период с 1967 по 1982 гг. увеличение объема оценивается всего лишь величиной 0,05 км³ или 0,14% [19]. Процесс формирования морфологии ложа и берегов водохранилища близок к квазиустановившемуся. Наблюдения за формированием берегов проводятся с 1970 г по настоящий период [20].

Таким образом, гидроузел, по своей сути, явился натурной моделью, на котором вот уже полвека ведется мониторинг, что позволяет визуализировать состояние этой сложной природно-технической системы и вовремя разрабатывать и принимать те или иные инженерные решения по обеспечению её устойчивости.

Следует отметить, что строительство и эксплуатация гидроузла проходило на фоне глобального изменения климата, которое оказывает существенное влияние на процессы, происходящие в слое годовых теплооборотов литосферы, где расположены природно-технические системы, устойчивость которых зависит от теплового состояния

горных пород. В этих условиях большое значение приобретают мониторинговые исследования (геокриологический мониторинг), которые уточняют природную среду и условия работы в ней гидротехнических сооружений.

Вилуйская ГЭС-3 (Светлинская ГЭС) руслового типа входит в состав Вилуйского каскада ГЭС (координаты: 63004/с. ш. 113029/в. д.). Предназначена для энергоснабжения объектов алмазодобывающей и газонефтяной промышленности Якутии. Проектная мощность ГЭС — 360 МВт. Строительство ГЭС началось в 1979 году, в 2008 году станция была официально принята в эксплуатацию с тремя из четырёх генераторов.

Не останавливаясь на природно-климатических условиях района возведенной ГЭС, которые описаны выше, отметим, что орография района строительства сформирована р. Вилуй и её многочисленными притоками, которые прорезают трапповое плато, образуя узкую каньонообразную долину. Склоны долины имеют сложный профиль: верхняя часть сложена интрузивными породами, а средняя и нижняя – глинисто-карбонатными породами. Левый берег р. Вилуй имеет крутые склоны по отношению к правому, более пологому берегу.

В геологическом отношении район створа плотины расположен на стыке тектонических структур Сибирской платформы – Вилуйской и Тунгусской синеклиз с наложенным Ангаро-Вилуйским прогибом, где на участке Ботуобинской седловины, на Сюльдюкарском своде и размещена ВГЭС-3. Коренные породы района представлены морскими отложениями глинисто-карбонатных толщ верхнего кембрия, трапповыми интрузиями триаса, терригенными отложениями карбона, перми, юры, и перекрыты комплексом четвертичных отложений различного генезиса. В разрезе бортов долины четвертичные отложения и коренные породы, вовлеченные в оползневые дислокации.

Гидроузел расположен в зоне сплошного распространения многолетней мерзлоты со сквозным таликом под руслом р. Вилуй. Криогенная толща общей мощностью 300 м. имеет двухъярусное строение. В верхней части многолетнемерзлые породы находятся в пластичном или твердомерзлом состоянии, в нижней – пористо-трещинная среда имеет отрицательные температуры, заполнена криопэгами и не содержит ледяных включений. Мощность слоя сезонного протаивания изменяется от 0,45 до 4 м. Температура мерзлых пород на подошве слоя годовых колебаний составляет $-0,6$ – $-6,30^{\circ}\text{C}$. Льдистость коренных пород в среднем 3-5 %, на отдельных участках до 15%. В четвертичных склоновых и аллювиальных отложениях преобладает массивная, линзовидная, базальная криогенная текстура, льдистость пород изменяется от 5 до 60% [5].

В связи со строительными работами в котловане на ряде участков произошли изменения мерзлотных условий. В результате проведения электрооттайки по фронту цементационной завесы под строительными штольнями на левом берегу р. Вилуй, произошло растепление мерзлого массива от $-(2 \div 3)^{\circ}\text{C}$ до 70°C . Аналогичное растепление мерзлого массива наблюдалось в основании правобережной каменно-земляной плотины в откосах продольной перемычки перед строительным каналом. После вскрытия котлована слой годовых колебаний опустился на глубину врезки по всему склону и имеет мощность 18 м и более.

Гидрогеологические условия района гидроузла характеризуется распространением подземных вод, которые по отношению к многолетнемерзлым породам подразделяются на надмерзлотные, подмерзлотные и воды таликовой зоны под долиной р. Вилуй. Надмерзлотные воды – безнапорные пресные (минерализация до 0,1 г/л), подмерзлотные воды – напорные, сильноминерализованные (минерализация 80

г/л). Криопэги приурочены к трещинной системе и пористой среде нижнего яруса первой надпойменной террасы.

Водопроницаемость грунтов в строительном котловане оценивалась средним коэффициентом фильтрации 1 м/сут, а отдельных прослоев известняков и доломитов 10 м/сут. Коэффициент фильтрации оползневых блоков при их оттаивании в пределах пород илгинской свиты составит 50-100 м/сут, верхоленской свиты 1-6 м/сут. Коэффициент фильтрации пород с зияющими трещинами бортового отпора в левом борту долины оценивается в тысячи метров в сутки.

С целью обеспечения статической и фильтрационной устойчивости гидроузла была проведена цементация береговых примыканий и основания в створе плотины. Для осуществления этих работ многолетнемерзлые породы основания были подвержены оттаиванию электрическим способом на глубину до 60 м [21].

Необходимо отметить, что вышеприведенные инженерно-геокриологические условия строительства по своей сложности не имеют мировых аналогов. В связи с этим возникает комплекс проблем по обеспечению устойчивости гидроузла в целом. Наличие в основании и бортах речной долины слабо прочных мергелисто-глинистых пород, нарушенных оползневыми процессами, а также открытых гравитационных трещин (до 4 м); минерализованных напорных вод и криопегов гидравлически связанных с водами водохранилища, которые при взаимодействии с льдистыми породами создают предпосылки обходной фильтрации могут создать проблему гидродинамической устойчивости геокриологической среды основания ГЭС.

В состав гидроузла входят: левобережная насыпная плотина длиной 112 м и наибольшей высотой 50 м; правобережная насыпная плотина длиной 273 м и наибольшей высотой 50 м, с общей длиной напорного фронта 537 м, включая совмещённое русловое здание ГЭС; подводящий и отводящий каналы; водохранилище площадью 104 км², полной и полезной ёмкостью 1,08 и 0,19 км³, длиной 141,2 км, шириной до 0,46 км, глубиной до 50 м. При создании водохранилища затопливается 288 га сельхозугодий.

К сожалению, мы не обладаем данными мониторинга гидроузла в последние годы, так как ВГЭС-3 принадлежит частной компании и информация носит закрытый характер. И тем не менее, следует констатировать, что сооружение успешно эксплуатируется уже в течение 10 лет.

Плотина Нерюнгринской ГРЭС (координаты 56040/с.ш. и 1240 51/в.д.) является первым гидротехническим сооружением в мире, которое построено на высоте 1000 м в условиях вечной мерзлоты на площадке с сейсмичностью в 9-10 баллов. Плотина построена в долине р. Олонгоро, в Южной Якутии, для технических нужд Нерюнгринской ГРЭС, с общей установочной мощностью 1220 Гкал/час, электрической мощностью 570/630 МВт. Годы строительства 1980-1985 гг.

Климат резко континентальный, среднегодовая температура воздуха равна - 9,50С. Зима - суровая, продолжительная, лето - короткое, умеренно-теплое, иногда жаркое. Среднегодовое количество осадков за многолетний период составляет 470 мм. Район строительства входит в зону интенсивных сейсмических воздействий. Балльность 9 - 10 по шкале MSK – 64 для средних грунтовых условий [22].

В геологическом отношении район гидроузла относится к южной окраине Алданского кристаллического массива и находится в верховье р. Олонгоро. Коренные докембрийские кристаллические породы, представленные гранито-гнейсами, местами перекрываются юрскими песчаниками, алевролитами, аргиллитами с пластами каменных углей. Алевролиты с прослоями углей, граниты и гнейсы разрушены в щебень, дресву и сапролиты до глубины 25-30 м. Четвертичные отложения покрывают

водоразделы, склоны и днище долин слоем небольшой мощности и представлены песчано-гравийным и валунно-галечным аллювием; торфом и оторфованными супесями и суглинками, мощностью на пойме до 5 м, на склонах составляет от 0,1 до 1,2 м.

В гидрогеологическом отношении рассматриваемый район находится в пределах Чульманского артезианского бассейна. Подземные воды залегают в трещиноватых юрских и архейских породах. В районе выделяются два основных водоносных комплекса: подземные воды рыхлых четвертичных отложений и трещинные и трещинно-пластовые воды юрских и архейских пород. Воды верхнего водоносного горизонта (верховодка) создают трудности при строительстве – обводнение строительной площадки и развитие криогенных явлений. Мощность многолетнемерзлых пород на склонах колеблется от 3,0 до 30 м. Температура их на глубине 15 м изменяется от -0,1 (склон восточный) до -1,00С (склон западной экспозиции). Глубина сезонного протаивания в среднем изменяется от 1,0 до 2,5 м.

Главную роль в криогенном строении мерзлых пород играют текстурообразующие сегрегационные льды, представленные линзами, прослойками, прожилками, гнездами. Значительную льдистость имеют супесчаные делювиально-солифлюкционные отложения, у подножия склона северной экспозиции примерно 70% [5].

Состав гидроузла входят следующие гидротехнические сооружения: глухаякаменно-землянаяплотина; водосливнаябетоннаяплотина; сифонный водосброс; водохранилище сезонного регулирования.

Каменно-земляная плотина, второго класса капитальности, талого типа–глухая с суглинистым экраном и цементационной завесой. Длина по гребню 1590 м, ширина–12,0м, максимальная высота в русле 27 м. Крепление откосов – каменная наброска. Максимальный напор 22м. Противофильтрационный экран сопрягается с основанием с помощью зуба глубиной 1,4 – 3,0м и шириной по низу 8,0–16,0 м. Грунты основания–песчаники мелко и средне зернистые и алевролиты крепкие, трещиноватые и сильнотрещиноватые. Цементационная завеса в основании трехрядная с расстоянием между рядами 1,6м осуществлена до глубины 10 м длиной по фронту 1600 м. В эксплуатации находится с 1983 г.

Водосливная бетонная плотина, двухпролетная возведена из монолитного бетона расположена на левом примыкании в створе глухой плотины. Имеет два водоприемных отверстия прямоугольной формы, пропускная способность которых при НПУ 797,0 м составляет 96м³/сек. Противофильтрационное устройство – монолитный железобетонный понур толщина 1м и длиной по фронту 22м. Отметка низа–793,3м. Максимальный напор на пороге водослива – 1,6м. На гребне плотины устроен автодорожный мост шириной 7 м.

Водохранилищеобеспечиваеттехнической водой нужд ГРЭС, сбросаи охлажденияводыпослеконденсаторовтурбин.Объём водохранилища:полный – 43,9млн.м³,площадьзеркала–4,56км²,длина – 3,7км.Режимрегулированияуровняводыосуществляетсячерезводосливную плотинуи сифонныеводосбросы.СредняяглубинаводохранилищаприНПУ(отм. 797,0м)составляет9,3мНаибольшая глубинавруслер.Олонгоро– 23м.Площадьмелководийсглубинамименьше2м составляет13% площади зеркала.Коэффициентиспользованияводохранилища0,81[23].

В процессе эксплуатации, по крайней мере, было две аварии глухой части плотины – в 1983 и 1993 гг. Обе аварии произошли из-за потери сплошности противофильтрационного устройства – суглинистого

экрана. В 1994 г. при выполнении реконструкции, на ПК 13+32 глухой каменно-земляной плотины установлен, дополнительно к существующему, постоянный сифонный водосброс производительностью – 24 м³/сек. Это позволяет, при необходимости, сбрасывать уровень воды в водохранилище до отметки ниже порога водосливной плотины. Таким образом, суммарная водопропускная способность водосбросов увеличилась до 120 м³/сек (96 м³/с - водосброс + 24 м³/с - сифон).

Опыт строительства и эксплуатации Нерюнгринского гидроузла свидетельствует о низкой изученности гидрологического режима р. Олонгоро, некачественном строительстве противофильтрационного экрана и негативном влиянии криогенных процессов, происходящих в теле плотины в период становления термо-напряженно-деформированного состояния.

Выводы о работе ГТС энергетического назначения

Опыт строительства и эксплуатации гидроузлов энергетического назначения показал, что в целом они выполняют свои функции - обеспечивают электроэнергией промышленные объекты и населенные пункты. Одновременно следует отметить, что проектирование, строительство и эксплуатация крупных гидроузлов в зоне сплошной криолитозоны по многим показателям являются пионерными. Так, гидроузел ВГЭС-1,2 явился первым, на котором в суровых природно-климатических условиях был отработан способ круглогодичного возведения плотины. А створ гидроузла ВГЭС-3, явился самым сложным по инженерно-геокриологическим и гидрогеологическим условиям строительства. На этом объекте впервые была отработана методика способа строительства с оттайкой многолетнемерзлых пород основания после полного возведения грунтовой плотины. Кроме этого, водохранилище ВГЭС-1,2 явилось первой моделью искусственно созданного водоема таких огромных размеров в условиях криолитозоны, что позволило исследовать морфологию дна и берегов в процессе эксплуатации гидроузла.

Однако в настоящее время существуют проблемы устойчивости отдельных сооружений, входящих в состав гидроузлов, обусловленные изменениями инженерно-геокриологических условий среды, в которых они находятся. Рассматривая эти крупные гидротехнические узлы, как природно-технические системы, приходим к выводу о том, что процессы формирования температурно-криогенного режима носит перманентный характер и обуславливает их сложно-напряженное состояние. В процессе эксплуатации гидроузлов оказалось, что предпроектные инженерно-геокриологические изыскания не всегда проводятся в полной мере. Да и трудно было предположить, что процессы деградации многолетнемерзлых пород под воздействием водохранилищ будут происходить на таких обширных площадях и с такой большой скоростью. Следует отметить, что это происходит на фоне общего потепления климата на Земле. В сложившихся условиях возрастает роль мониторинга и, как показала практика, особенно эффективны измерительные комплексы, в состав которых входят геофизические исследования.

Гидротехнические сооружения промышленного и питьевого водоснабжения

Возрождение традиционного мясомолочного направления сельского хозяйства РС(Я), а также дальнейшее развитие горнодобывающей промышленности, объектов энергетики в значительной степени возможно только при надежной работе гидроузлов среднего и малого напоров, являющихся неотъемлемой частью водохозяйственного и мелиоративного строительства.

Анализ статистических данных отказов и аварий гидротехнических сооружений среднего и низкого напоров, построенных вне зоны вечной мерзлоты свидетельствует о

том, что по сравнению с высоконапорными они наиболее подвержены деформациям. Причем резко этот процент увеличивается после 30 лет эксплуатации, связанный с процессами старения материалов, из которых возведены сооружения.

Такая же тенденция отмечена и на гидротехнических объектах в криолитозоне, в частности, на объектах АК «АЛРОСА» в Западной Якутии.

Опыт строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений промышленного и питьевого водоснабжения в основном базируется на опыте горнодобывающего освоения Западной Якутии. В этом районе построено более 15 плотин из местных материалов. Ниже приведено описание некоторых из них и отмечены основные проблемы строительства и эксплуатации.

Для понимания работы гидроузлов в Западной Якутии обратим внимание на тот факт, что в начале голоценового оптимума (примерно 10 - 5 тыс. лет назад), происходила деградация мерзлоты от дневной поверхности до 30-40 м [5]. После возвращения холодного климата началось быстрое промерзание пород. Скальные и полускальные отложения берегов речных долин, находившиеся в зоне аэрации, подверглись сильной деструкции. Результатом этого криогенного процесса явилась трещиноватость пород. К моменту строительства гидротехнических объектов трещины оказались либо полностью заполнены льдом, либо заполнены льдом частично и имели открытую трещиноватость, то есть промерзание пород происходило в условиях неполного их водонасыщения.

Анализ нештатных ситуаций на гидротехнических сооружениях Западной Якутии показывает, что в большинстве случаев при эксплуатации грунтовых плотин на участках примыкания к береговым массивам мерзлых скальных и полускальных трещиноватых пород имеет место развитие обходной фильтрации. Скорость продвижения талой зоны в береговых массивах вниз по долине в нижнем бьефе достигает десятков, а в отдельных случаях и сотни метров в год. [24].

Гидроузел на р. Ирелях Мирнинского горно-обогатительного комбината Акционерной компании «АЛРОСА» является гидротехническим сооружением II класса, предназначенным для обеспечения хозяйственно-питьевого и производственного водоснабжения г. Мирный и фабрики №3. Расположен в 3 км к западу от г. Мирный и в 30,5 км от устья р. Ирелях. Географические координаты плотины гидроузла: 62°31' с. ш. и 113°53' в. д. Площадь землеотвода под ГТС гидроузла — 419 га. Из них 400 га занято под водохранилище. Гидроузел введен в эксплуатацию в 1964 г.

Инженерно-геологические, геокриологические и гидрогеологические условия. Геокриологический разрез в створе плотины гидроузла характеризуется мощной толщей терригенно-карбонатных пород раннего палеозоя. До 40 м породы сильно выветрелые, трещиноватые, трещины заполнены прожилками льда, и при оттаивании сильно водопроницаемы, коэффициент фильтрации достигает 45 м/сутки. Площадка гидроузла расположена в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых грунтов мощностью 300 и более метров. Температура мерзлых грунтов на глубине 15 м от -1,90С до -3,30 С. Глубина сезонного протаивания изменяется от 1,5 до 3,0 м.

В русловой части коренные породы прикрыты аллювиальными отложениями и представлены илами с галькой и гравием, иловатыми суглинками, гравийно-галечными разностями с песчаным заполнителем, находящимися в многолетнемерзлом состоянии с содержанием льда до 60%.

По трассе водосбросного канала, расположенного на левом берегу на второй надпойменной террасе, коренные породы сильно трещиноваты (до 15-20 мм).

Современные мерзлотно-гидрогеологические условия по створу плотины по данным изысканий осложнились интенсивным развитием талика в основании и береговых примыканиях по фронту и глубине. Этот талик образовался в процессе эксплуатации плотины на глубину более 70 м, при отепляющем воздействии сбрасываемой воды. Подмерзлотные воды находятся на глубине 310-315 м, являются напорными (до 100 м), высокоминерализованными, с запахом сероводорода, и имеют отрицательную температуру[1].

В состав сооружений гидроузла входят: плотина, замораживающая система, водохранилище, береговой водосброс, плотина перехвата, дренажная насосная станция, водозаборный узел с насосной станцией.

Плотина земляная, насыпная, с мерзлым ядром, высотой 20,5 м, длиной по гребню — 320 м., шириной гребня 8.0 м. По классу капитальности плотина отнесена ко II классу, построена по 1 принципу строительства, с сохранением многолетнемерзлых грунтов основания в мерзлом состоянии..

Плотина на р. Ирелях является одной из первых инженерных сооружений в Западной Якутии. На гидроузле по сей день отрабатываются инженерные приёмы по обеспечению её статической и особенно противofiltrационной устойчивости. В разные периоды эксплуатации гидроузла на нем для замораживания тела и основания плотины были использованы воздушные, жидкостные, парожидкостные системы. А также для обеспечения фильтрационной устойчивости испытывали криогели[25].

За 50-летний срок эксплуатации гидроузла определился ряд факторов, потенциально способных привести к развитию гидродинамической аварии. Основной из них является оттаивание грунтов до 70 м. в основании. Причина фильтрации связана с большой трещиноватостью пород основания. При вытаивании льда образовались мощные фильтрационные ходы. Принятые до настоящего времени меры по уменьшению фильтрационных расходов не позволили в полной мере стабилизировать процессы растепления в основании плотины, но значительно снизили опасность потери водохранилищем своего функционального назначения - снабжения водой г. Мирного и фабрики №3. В настоящее время фильтрация через сооружение стабилизировалась в пределах ~ 1130 м³/ч и угрозы для безопасности ГТСиводоснабженияг.Мирныйне создает[26].

Гидроузел оборудован контрольно-измерительной аппаратурой, которая позволяет отслеживать ситуацию на объекте и разрабатывать инженерные рекомендации по ликвидации возникающих не штатных ситуаций. В этой связи безусловно, на гидроузле необходимо продолжить работы по организации и проведению геокриологического мониторинга. Современные геофизические комплексы в сочетании с термометрией являются на сегодня наиболее информативным средством получения реальной картины состояния гидроузла в целом.

Гидроузел на р. Мархар расположен на Северо-Западе Якутии и предназначен для обеспечения хозяйственно-питьевого и промышленного водоснабжения промкомплекса на карьере «Юбилейный» Айхальского ГОКа. Координаты 65056/ с. ш., 111029/ в. д.

Инженерно-геологические, геокриологические и гидрогеологические условия. Основание плотины сложено туфами пермь-триасового и долеритами нижнетриасового возрастов. Туфы сильно выветрелые с поверхности на глубину до 6-10 м, до щебенистых и дресвяных грунтов с супесчаным и суглинистым заполнителем до 30-40%. Глубина залегания слабо выветрелых долеритов обычно колеблется в пределах 0,5-3,0 м. Район гидроузла приурочен к зоне распространения многолетнемерзлых пород, имеющих мощность до 500-600 м. Температура грунтов на

глубине нулевых годовых амплитуд -6°C . В пределах поймы нормативная глубина сезонного оттаивания составляет 3,0-3,5 м, а в пределах русла 3,0-4,0 м. С поверхности все элювиальные грунты перекрыты элювиально-делювиальными отложениями суглинисто-песчаных грунтов мощностью до 1,5-2,0 м, с льдистостью до 30%. Скальные грунты слабоблестные - долериты практически не имеют видимых включений льда. Криогенная текстура туфов и туфоалевролитов преимущественно трещиноватая. Подмноголетнемерзлой толщии залегают подмерзлотные, сильноминерализованные воды.

В состав гидроузла входят: глухая земляная плотина, водохранилище, водосбросной канал, насосная станция.

Плотина каменно-земляная, мерзлого типа. В качестве противофильтрационного элемента имеет ядро, зуб и понур из суглинка, а также мерзлотную завесу в ядре и основании. Максимальная высота плотины – 18 м, ширина по гребню – 13 м, длина – 1004 м, заложение низового и верхового откосов 1:2. Максимальный напор на плотину – 17 м. Упорные призмы отсыпаны из вскрышных долеритовых пород карьера «Юбилейный». Отсыпка плотины велась с весны 1989 по осень 1991 года, причем укладка суглинка в противофильтрационные элементы производилась только в теплое время года.

Водонепроницаемость грунтов основания и тела плотины обеспечивалось за счет создания по напорному фронту плотины мерзлотной завесы с помощью жидкостных сезоннодействующих охлаждающих устройств-термосифонов с естественной конвекцией теплоносителя (керосина) и воздушной замораживающей системы.

В первый же год после отсыпки плотины, зимой 1991-92г. у подошвы низового откоса плотины, по руслу бывшего водосбросного канала был обнаружен локальный выход фильтрационных вод. Для ликвидации фильтрации, при работающей замораживающей системы, в декабре 1998 г была проведена отсыпка бермы мерзлым грунтом. Многолетнемерзлый грунт, с температурой около -5°C , доставлялся непосредственно из карьера «Юбилейный». Средняя температура воздуха в районе гидроузла в этот период составляла -40°C . Отсыпка велась одним слоем, достигавшим 11 метров в русловой части, при ширине около 50 метров. Сразу по окончании отсыпки и при дальнейших наблюдениях, выходов фильтрационного потока в нижнем бьефе плотины не отмечалось[27].

В результате работы воздушной и жидкостной замораживающих систем с вынужденной конвекцией теплоносителей в зимние периоды 1999-2001 гг. талик был проморожен, грунты мерзлотной завесы в течение летнего периода сохраняются в мерзлом состоянии.

При дальнейшей эксплуатации гидроузла для обеспечения надежной работы мерзлотной завесы достаточно будет использовать только одну замораживающую систему с естественной конвекцией теплоносителя[28].

Таким образом, специалистами АК «АЛРОСА» был разработан и внедрен метод «холодного штампа» для ликвидации фильтрующего талика плотины мерзлого типа в условиях Крайнего Севера.

Выводы о работе ГТС промышленного и питьевого назначения

Анализ состояния гидротехнических сооружений промышленного и питьевого назначения показал, что несмотря на аварийные ситуации, периодически возникающие на сооружениях, гидроузлы выполняют свое функциональное назначение вот уже на протяжении более 50 лет. Основной причиной аварийных и предаварийных ситуаций на гидроузлах являются изменения инженерно-геокриологических условий пород

оснований и криогенного состояния сооружений в процессе формирования их сложного термо-напряженно- деформированного состояния. Не всегда были адекватные и конструктивные решения сооружений. Важным оказалось знание генетического формирования криогенного состояния многолетнемерзлых пород.

Для обеспечения устойчивости гидроузлов используются различные инженерные приемы, позволяющие обеспечить выбранный способ строительства и эксплуатации сооружений. Так возникшую фильтрацию в скальных и полускальных породах в период эксплуатации сооружений, удалось предотвращать совместными методами, включающие в себя эксплуатацию замораживающих систем различных типов и способ «холодного штампа». Наиболее перспективный путь снижения аварийности заключается в своевременной (ранней) диагностике начала развития негативных процессов и подготовке грунтовых условий к развитию таких процессов и в принятии превентивных необходимых инженерных мер. То есть обязательная организация на каждом сооружении мониторинговой системы, которая включала бы в себя помимо стандартных видов натурных наблюдений, также современные измерительно-прогностические комплексы.

Поддержанию гидроузлов в рабочем состоянии способствуют вовремя составленные «Декларации безопасности», в которых расписана «дорожная карта» эксплуатации гидроузлов на текущий период. На выполнение рекомендаций по безаварийной работе гидроузлов хозяйствующими организациями ежегодно затрачиваются миллионы рублей.

Гидротехнические сооружения сельско-хозяйственного и мелиоративного назначения

В настоящее время количество гидроузлов этого класса насчитывает свыше 900. Как свидетельствует опыт эксплуатации все они в той или иной мере подвержены деформациям. Причины и виды деформаций гидротехнических сооружений этого класса в Якутии обобщены в работах [29], [9],[30], [31],[32]. Основной причиной деформаций является криогенные процессы и явления, протекающие в теле и основании сооружений в процессе формирования криогенно-температурного режима.

Характерной особенностью термо-криогенного состояния низконапорных грунтовых плотин в силу малых размеров в условиях Якутии является то, что в большинстве случаев они промерзают естественным путем.

Примером плотин, промерзших естественным путем в период эксплуатации и успешно проработавших определенный период, может служить ряд плотин водохозяйственного и мелиоративного назначения, построенных в различных улусах Якутии в 40-70-х годах XX века [32].

Однако в условиях потепления климата на Земле, начавшегося с середины прошлого столетия, гидротехнические сооружения в криолитозоне нередко переходят в талое состояние [33]. Низконапорные гидроузлы попали в зону интенсивных термодинамических процессов, происходящих в литосфере. Их температурно-криогенное состояние, являющееся основой устойчивости, испытывают тепловой прессинг, размеры которого необходимо знать. Таким образом, в настоящий период вновь становится актуальным исследование температурно-криогенного режима низконапорных гидроузлов на основе геокриологического мониторинга.

Выводы о работе ГТС сооружения сельско-хозяйственного и мелиоративного назначения

Гидротехнические сооружения сельско-хозяйственного и мелиоративного назначения в условиях криолитозоны Якутии имеют свою специфику, обусловленную сложными природно-климатическими и геокриологическими условиями, а также

изменением климата на Земле. В силу низкого класса капитальности, требования к проектированию и эксплуатации несколько занижены. Что в корне не верно, так как в общем объёме гидротехнических сооружений России они занимают существенный процент. А в условиях рискованного землепользования Якутии значение гидротехнического строительства этого назначения очень велико.

Анализ работы водопропусков свидетельствует о том, что наряду с проектно-технологическими, эксплуатационными условиями, большинство аварий происходит из-за недоучета при проектировании и эксплуатации процессов теплового и механического взаимодействия сооружений с окружающей средой. В большинстве случаев главной причиной разрушения гидроузлов является криогенный отказ. Безусловно, все сооружения должны иметь геокриологические мониторинговые системы [34].

Заключение

Краткий обзор состояния гидротехнического строительства в Якутии свидетельствует о том, что проблема устойчивости сооружений является актуальной и в настоящее время. Эта проблема приобретает новые грани в связи с глобальным изменением климата, которое происходит на Земле с середины прошлого столетия. Территория Якутии попала в зону интенсивных климатических изменений. Достаточно отметить, что среднегодовая температура воздуха в ряде районов повысилась на два с лишним градуса по Цельсию. Реакция многолетнемерзлых пород на эти климатические изменения в разных регионах разная. В этой связи следует отметить, что гидроузлы перешли в разряд, так называемых природно-технических систем и представляют сложные комплексы, в которых происходят не менее сложные криогенные процессы. Все это ставит перед инженерами и учеными новые задачи и проблемы, решение которых необходимо для успешного природопользования.

На повестке дня вновь стоит вопрос повышения качества изысканий при обосновании проектных решений гидроузлов. Об этом красноречиво говорит проблема реконструкций сооружений, которые необходимо провести на ряде гидроузлов.

Остро стоит вопрос также с экологией экосистем криолитозоны, отличительными особенностями которых являются их высокая степень уязвимости, чрезвычайная чувствительность к любым природным и техногенным изменениям, а также низкий потенциал самовосстановления.

Низконапорные гидроузлы ирригационного и сельскохозяйственного назначения продолжает оставаться проблемным звеном гидротехнического строительства в условиях криолитозоны. Анализ работы свидетельствует о том, что по-прежнему имеет место безграмотное их проектирование, строительство и эксплуатация. В силу низкого класса капитальности, требования к проектированию и эксплуатации несколько занижены. Что в корне не верно, так как в общем объёме гидротехнических сооружений России они занимают существенный процент.

Рассматривая проблему гидротехнического строительства в целом по России следует отметить, что продолжается работа по совершенствованию нормативных актов. Так, Федеральный закон «О безопасности гидротехнических сооружений» [35], «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» [36] и другие нормативные документы уточнили понятие «авария сооружения», а также ввели новое понятие – «механическая безопасность». Делается попытка увязать наши нормативные акты в этой области с зарубежными «Еврокодами» [37]. Однако следует отметить тот факт, что обновление нормативных документов по линии актуализации существующих СНиПов и написание Сводов Правил (СП), происходит на низком научном уровне. Так, актуализированная редакция СНиП 2.06.05-84*[38] СП 39.13330.2012[39], искажила

принципы работы гидротехнических сооружений в криолитозоне. В своё время Инструкция по проектированию гидротехнических сооружений в районах распространения вечномёрзлых грунтов[40 и СНиП 2.06.05-84*[38] узаконили два принципа строительства гидротехнических сооружений в криолитозоне: первый принцип предполагает, что фильтрационная и статическая устойчивость плотины и ее основания обеспечивается мерзлыми грунтами, второй принцип – талыми. Однако СП 39.13330.2012 по не понятным причинам исключил типизацию плотин по температурно-криогенному признаку. Это совершенно не допустимо, так как противоречит накопленному научно-практическому опыту, и является шагом назад в развитии гидротехнического строительства в районах криолитозоны. Ведущие гидротехники России считают, что «...Такой подход не просто является грубой ошибкой, а серьезным преступлением, обуславливающим повышение аварийности и не отвечающим требованиям всех федеральных законов безопасности гидротехнических сооружений и Технического регламента безопасности зданий и сооружений»[31]. Этот тезис с новой силой прозвучал в Решении XI Международного симпозиума по проблемам инженерного мерзлотоведения, прошедшего 5-8 сентября 2017 года в г. Магадане [41].

1. Гидрогеология СССР. Якутская АССР. М.: Недра, 1970, 383 с.
2. Кондратьева К.А., Марахтанов В.П., Нистратова Т.А. Геокриологические условия Лено-Вилуйского региона. Условия формирования сезонно-и многолетнемерзлых пород. Геокриология СССР. Средняя Сибирь. Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Изд-во «Недра», 1989, с. 227-249.
3. Климовский И.В., Готовцев С.П. Криолитозона Якутской алмазонасной провинции. Новосибирск: ВО «Наука», 1994, 167 с.
4. Гаврилова М.К. Климат Центральной Якутии. Якутское книжное издательство. Якутск: 1973. – 120 с.
5. Геокриология СССР. Средняя Сибирь /под ред. Э.Д.Ершова. – М. :Недра, 1989, с.94–195.
6. Алексеев С.В., Вахрамеев А.Г., Коцупало Н.П., Рябцев А.Д. Промышленные рассолы Сибирской платформы: гидрогеология, бурение и добыча, переработка, утилизация / Алексеев С.В., Вахрамеев А.Г., Коцупало Н.П., Рябцев А.Д. – Иркутск: Изд-во «Географ», 2014. – 162 с.
7. Ефимов А.И. Гидрогеологические особенности района месторождения алмазов трубки «Мир» в Западной Якутии. – Тр. II совещания по подземным водам и инженерной геологии Восточной Сибири. Вып. II, Иркутск, 1959, с. 79-87.
8. Батенчук Е.Н., Биянов Г.Ф., Торопов Л.Н., Мызников Ю.Н. Зимняя укладка связных грунтов на Крайнем Севере. М.: Изд. «Энергия», 1968, с.8-13.
9. Биянов Г.Ф. Плотины на вечной мерзлоте. М.: Энергоатомиздат, 1983, 176 с.
10. Демидов А.И., Смирнов Е.А. Температурный режим Вилуйской плотины в первые годы эксплуатации. Тр. координац. совещаний по гидротехнике. Вып. 72. Л.: 1972, с. 52-57.
11. Каменский Р.М. Термический режим плотины и водохранилища Вилуйской ГЭС. Якутск: Изд. ИМЗ СО АН СССР, 1977, 100 с.
12. Оловин Б.А., Медведев Б.А. Динамика температурного поля плотины Вилуйской ГЭС. Новосибирск: Изд-во «Наука» СО, 1980, 48 с.
13. Мухетдинов Н.А. Основные факторы, определяющие тепловлажностный режим низовой призмы каменнонабросной плотины. Опыт проектирования и строительства плотин из местных материалов на Крайнем Севере. Тр. Координационных совещаний по гидротехнике. Выпуск 89. Л.: 1974, с. 11- 15.
14. Кроник Я.А., Гаврилов А.Н., Мнушкин М.Г., Абрамов Б.И. Натурные наблюдения за деформациями и криогенными процессами в теле плотины Вилуйской ГЭС при её эксплуатации. Инженерное мерзлотоведение в гидротехническом строительстве. Тр. конференций и совещаний по гидротехнике. Л.: Энергоатомиздат ЛО, 1984, с. 198 – 202.
15. Чжан Р.В., Великин С.А., Шестернев Д.М. Температурно-криогенный режим гидроузла Вилуйской ГЭС-1,2: геокриологический мониторинг // Гидротехническое строительство, 2017, № 6, с.10-23.
16. Ермолаев А.И. Классификация термоабразионных берегов водохранилищ и прогнозирование их переработки // Береговые процессы в криолитозоне. Новосибирск, 1984, с. 85-92.
17. Константинов И.П. Динамика берегов водохранилища Вилуйской ГЭС в период наполнения и начальной эксплуатации // Береговые процессы в криолитозоне. Новосибирск, Наука, 1984, с. 38-50.

18. Бурлаков, В. М. Районирование Вилюйского водохранилища. Типизация и классификация его берегов / В. М. Бурлаков // Влияние ГЭС на окружающую среду: сб. науч. тр. / Акад. наук СССР, Сиб. Отд-ние, Якут. Филиал, Якутск, 1987, с. 34-42.
19. Кудояров Л. И. Влияние изменений мерзлотных условий в чаше водохранилища на функционирование северных ГЭС / Л. И. Кудояров, Т. С. Оникиенко // Гидротехническое строительство. 1990, № 2, с. 8-11.
20. Великин С. А., Соболев И. С., Соболев С. В., Хохлов Д. Н. Результаты инструментальных наблюдений и адаптивного прогноза термоабразии берегов Вилюйского водохранилища. Гидротехническое строительство, № 6, 2013, с. 2-8.
21. Фрумкин В. Н., Шерман М. М. О строительстве Вилюйской ГЭС – III на многолетнемёрзлом полускальном основании. – Гидротехническое строительство. 2003 - № 12. – С. 18-20.
22. СП 14.13330.2014 Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП П-7-81*. М.: 2014, с.
23. Разработка проекта правил использования Нерюнгринского водохранилища. Кн. 2. «Правила технической эксплуатации и благоустройства Нерюнгринского водохранилища». Экологическая и водохозяйственная фирма ООО «ВЕД». М.: 2013, 39 с.
24. Шестернёв Д. М., Великин С. А., Радостева А. В. Проблемы безопасной эксплуатации гидротехнических систем Западной Якутии на примере Сытыканского гидроузла. // Подземная гидросфера / Материалы XX Всероссийского совещания по подземным водам Востока России. Иркутск, 2012, с. 413-418.
25. Алтунина Л. К., Кувшинов В. А., Долгих С. Н. Криогели для тампонажных работ в районах распространения многолетнемёрзлых пород // Гидротехника, 2010. № 3. – с. 52-57.
26. Разработка проекта правил использования водных ресурсов Иреляхского водохранилища. ООО «ВЕД», М., 2013, 138 с.
27. Дюкарев В. П., Сергиевский В. В., Сухно А. М. Опыт ликвидации фильтрующего талика плотины в условиях Крайнего Севера. Гидротехническое строительство, 2001, № 12, с. 14 – 16.
28. Критерии безопасности ГТС гидроузла на р. Марха Айхальского ГОКа АК «АЛРОСА». Пос. Айхал, 2003 г. 47 с.
29. Слосов Л. Н. Гидротехнические сооружения для сельского хозяйства Центральной Якутии. Якутск: Якутское кн. изд-во, 1963, 54 с.
30. Селеверстов А. П. Гидросооружения мелиоративного назначения на вечномерзлых грунтах. – М., 1979. – 66 с.
31. Кроник Я. А. Анализ аварийности и безопасности геотехнических систем в криолитозоне // Материалы пятой конференции геокриологов России МГУ имени М. В. Ломоносова 14-17 июня 2016 г. Том 1. М.: «Университетская книга», 2016, с. 104-113.
32. Чжан, Р. В. Температурный режим и устойчивость низконапорных гидроузлов и грунтовых каналов в криолитозоне / Р. В. Чжан. – Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2002, 208 с.
33. Чжан Р. В. Геокриологические принципы работы грунтовых плотин в криолитозоне в условиях меняющегося климата // "Фундаментальные исследования" № 9 (часть 2), 2014, с. 288-296.
34. Чжан Р. В. Геокриологический мониторинг низко и средненапорных грунтовых плотин в криолитозоне в связи с изменением климата // Современные проблемы науки и образования, 2013. № 6; URL: www.science-education.ru/113-11144.
35. Федеральный закон «О безопасности гидротехнических сооружений» от 21.07.1997 г № 117-ФЗ (ред. от 03.07.2016 г, с изм. и доп. вступил в силу 01.01.2017 г).
36. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений. Федеральный закон № 384-ФЗ от 30.12.2009.
37. Руководство для проектирования к Еврокоду: Геотехническое проектирование EN-1997-1. Пер. с английского. Минобрнауки РФ. НИУ МГСУ. М. 2013, 360 с.
38. СНиП 2.06.05-84*. Плотины из грунтовых материалов. М., 1991, 49 с.
39. СП 39.13330.2012 Плотины из грунтовых материалов. Актуализированная редакция СНиП 2.06.05-84*. М.: 2013, с.
40. Инструкция по проектированию гидротехнических сооружений в районах распространения вечномерзлых грунтов. ВСН 30 – 83. Л., Минэнерго СССР, 1983, 100 с.
41. Материалы XI Международного симпозиума по проблемам инженерного мерзлотоведения, г. Магадан (Россия), 5-8 сентября 2017 г.: тезисы докладов / отв. ред. Р. В. Чжан; Сибирское отд. РАН, ФБУН Ин-т мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН. Якутск: Издательство ФБУН Ин-т мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, 2017, 380 с.