

НАДЕЖНОСТЬ ОСНОВАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ В КРИОЛИТОЗОНЕ

УДК 627.8:624.139

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2016-4(79-92)

ГИДРОУЗЛЫ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ РОССИИ

Р.В. Чжан

*Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН,
677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия; zhang@mpi.ysn.ru*

Представлен краткий обзор 70-летнего опыта строительства и эксплуатации гидроузлов в Арктической зоне России. На этой территории построено более 20 гидроузлов водохозяйственного и энергетического назначения. Территория относится к зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород и крайне сурового климата. Особенность гидротехнического строительства в Арктике в том, что в результате создания искусственных природно-технических комплексов (гидроузлов) резко меняются мерзлотно-грунтовые условия территории. Гарантией статической и фильтрационной устойчивости гидроузлов является сохранение их тела и основания в мерзлом состоянии, что достигается использованием специальных инженерных приемов. В то же время исследования последних десятилетий показали, что даже при изменении теплового состояния гидроузлы могут сохранять устойчивость.

Криолитозона, гидроузел, грунтовая плотина, многолетнемерзлые грунты, тепловлажностный режим

HYDROSYSTEMS IN THE ARCTIC ZONE OF RUSSIA

R. V. Zhang

*Melnikov Permafrost Institute, SB RAS,
677010, Yakutsk, Merzlotnaya str., 36, Russia; zhang@mpi.ysn.ru*

An overview of the almost 70-years' experience of construction and operation of hydrosystems in the Arctic zone of Russia is provided. Over 20 hydrosystems of waterworks and power facilities have been built in this region, which is situated in the zone of continuous permafrost and has an extremely severe climate. The specific feature of hydraulic engineering in the Arctic is the dramatic changes in the permafrost conditions of the territory due to the construction of man-made engineering facilities (hydrosystems). The guarantee of static and filtration stability of hydrosystems is the conservation of their body and foundation in the frozen state. This aim can be attained by using special engineering techniques. However, the investigations carried out during the last decades have confirmed that the hydrosystems can maintain stability even if the thermal condition is changing.

Cryolithozone, hydrosystem, embankment dam, perennially frozen ground, hydrothermal regime

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на суровые природно-климатические и сложные инженерно-геокриологические условия арктических и субарктических территорий, большинство расположенных здесь гидроузлов находится в рабочем состоянии, при этом проектный срок их работы давно истек. Безусловно, это заслуга эксплуатационных служб хозяйствующих субъектов, проводящих постоянный контроль, ремонт и реконструкцию. Накоплен богатый опыт возведения и эксплуатации гидроузлов различного назна-

чения в суровых условиях Арктики. Этот опыт позволил создать специфическую отрасль строительства – северную гидротехнику. У ее истоков стояли талантливые российские инженеры и научные школы Санкт-Петербурга, Москвы, Нижнего Новгорода, Якутска, Красноярска, Мирного и др.

В работе рассмотрены гидроузлы, расположенные на территории как Арктики, так и Субарктики России, ввиду схожести их природно-климатических условий*.

* Строго говоря, часть рассматриваемых гидроузлов расположена несколько южнее географической границы Арктической зоны России, ограниченной координатой 66°33' с.ш. Однако автор счел необходимым привести эти материалы ввиду их информативности, так как указанные границы являются в определенной степени условными и в настоящее время уточняются.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ И ИНЖЕНЕРНО-ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ СТРОИТЕЛЬСТВА В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ РОССИИ

В силу значительной протяженности с запада на восток (около 22 600 км), арктические районы занимают территорию свыше 20 млн км² и представлены разнообразными природно-климатическими, геологическими, гидрогеологическими, гидрологическими и инженерно-геокриологическими условиями, что обусловило использование разных принципов, способов и методов строительства инженерных сооружений в этих зонах. Вся территория криолитозоны разделена по природно-климатическим условиям на три строительные зоны: 1) с наименее суровыми условиями; 2) суровыми; 3) наиболее суровыми [СП 39.13330.2012].

Общие закономерности формирования, строение, распространение, мощность, температура горных пород и рациональное природопользование в криолитозоне наиболее компактно и сконцентрированы представлены в фундаментальном четырехтомном труде «Геокриология СССР» под редакцией Э.Д. Ершова [1988, 1989а–в], где для каждого выделенного региона сделано заключение с рекомендациями использования пород в качестве оснований и среды инженерных сооружений.

ОПЫТ СТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ ГИДРОУЗЛОВ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ

На территории Арктики и Субарктики в настоящее время находится более 20 гидротехнических сооружений водохозяйственного и энергетического назначения. Опыт строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений в Арктике относится к началу XX в. Это связано прежде всего с освоением Северного морского пути и прилегающих территорий, богатых природными ресурсами – полиметаллами (никель, вольфрам, олово, золото, серебро и др.), углеводородами (нефть, газ, уголь) и т. д. Для разработки и добычи этих полезных ископаемых вдоль побережья морей Северного Ледовитого и Тихого океанов возникали населенные пункты с инфраструктурой. Особенностью территории является повсеместное распространение сильнольдистых многолетнемерзлых пород (ММП), дающих большие осадки при оттаивании. Механический перенос на эти территории приемов и способов строительных работ, используемых вне зоны распространения ММП, имел негативный характер. Здания и сооружения разрушались в результате потери устойчивости грунтов оснований из-за нарушения их тепловлажностного режима.

Особое место в инженерных комплексах при освоении арктических территорий занимают гидротехнические сооружения, обеспечивающие питьевое и техническое водоснабжение населенных пунктов и промышленных предприятий. В далекие 40-е гг. прошлого столетия опыт строительства гидроузлов в криолитозоне практически отсутствовал, если не считать отдельных плотин, построенных без проекта – хозяйственным способом. Российским инженерам пришлось с «чистого листа» разрабатывать конструкции и технологии возведения гидротехнических сооружений, которые обладали бы статической и фильтрационной устойчивостью в этих сложных природно-климатических и инженерно-геокриологических условиях. Были сформулированы принципы использования грунтов в гидросооружениях по их тепловому состоянию. В 1937 г. Е.Б. Близняк [1937] ввел понятия «мерзлая» и «таялая» плотины. В последующем В.С. Тимофейчук [1977] предложил классификацию и принципы строительства гидросооружений в криолитозоне. Однако инженеры еще долгое время вели дискуссии по принципам строительства, пока СНиП 2.06.05-84* [1991], а затем СП 39.13330.2012 [2012] окончательно не узаконили два принципа строительства гидротехнических сооружений в криолитозоне. Первый принцип предполагает, что фильтрационная и статическая устойчивость плотины и ее основания обеспечивается мерзлыми грунтами; согласно второму принципу – тальми грунтами.

Водонепроницаемость и высокие прочностные свойства мерзлых грунтов при условии, что все поры их заполнены льдом, позволили использовать такие грунты в качестве материала для гидротехнических сооружений. При этом особое внимание уделяется породам основания сооружений [Инструкция..., 1983].

Формирование ледогрунтового ядра в теле плотин может происходить как за счет естественного промерзания грунтов, так и в результате искусственного их промораживания. Промораживание грунтов осуществляется разными способами:

1) путем послойного наращивания и промораживания грунта тела плотины; мерзлое состояние поддерживается с помощью специальных вентилируемых зимой полостей (потерн, шахт) или устройством на низовом откосе навесов, позволяющих исключить контакт снега с поверхностью плотины и обеспечивающих проветривание откосов зимой и отражение солнечных лучей летом;

2) с помощью специальных замораживающих систем (скважин с погруженными в них замораживающими установками).

Географическое местоположение 22 гидросооружений, построенных в Арктике и Субарктике России за 70-летний период, показано на рисунке. Основные геокриологические характеристики



Местоположение гидроузлов в Арктической зоне России (<http://арктика-сегодня>).

1 – местоположение плотины и ее номер в таблице; 2 – южная (субаэральная) граница Арктической зоны; 3 – северная граница континентального шельфа.

грунтов оснований и конструктивные особенности этих плотин приведены в таблице. К настоящему времени это наиболее репрезентативная сводка о гидротехнических сооружениях для арктических территорий РФ.

Плотина на р. Долгой (высотой 10 м), построенная в 1943 г., явилась сооружением, на котором последовательно проверялись различные системы замораживания и охлаждения грунтов (см. таблицу, п. 3) [Богословский, 1958; Борисов, Шамишур, 1959]. Первоначально она была оборудована системой скважин (с шагом 2.5 м) с погруженными в них замораживающими колонками. В качестве теплоносителя использовался раствор хлористого кальция. Рассол охлаждался в зимнее время в специальных резервуарах на поверхности. От рассольного охлаждения вскоре пришлось отказаться из-за коррозии обсадных труб и попадания рассола в тело плотины, что приводило к деградации мерзлого состояния грунта при отрицательных температурах. Вместо рассола в качестве теплоносителя был применен наружный воздух отрицательной температуры. Система воздушных замораживающих колонок оказалась достаточно эффективной и надежной. В последующем она успешно была применена при возведении плотин на руч. Наледном [Борисов, Шамишур, 1959], руч. Певек [Кузнецов, Ушакова, 1966; Демченко и др., 2005], ключе Поселковом [Солодкин, 1966], оз. Мелком в восточном секторе Арктики [Гришин и др., 1966] и на других плотинах в различных регионах криолитозоны.

Следует отметить, что промораживание и дальнейшее поддержание грунтов в мерзлом со-

стоянии с помощью охлаждающих трубных систем с успехом применяются и в настоящее время. Предложены и запатентованы десятки конструкций охлаждающих систем, работающих на принудительной и естественной тяге хладагента [Кузьмин, Чжан, 2004; Устройство..., 2012]. В качестве хладагента помимо воздуха используются жидкости и парожидкости. В разных климатических зонах криолитозоны и инженерно-геокриологических условиях створов для различных конструкций плотин и компоновок гидроузлов на местности были отработаны: шаг установки замораживающих колонок, тип теплоносителя, условия движения (естественное или искусственное) теплоносителя в охлаждающих устройствах. Однако замораживание пород тела и основания плотин не превышало глубины 20 м. Инженеров-практиков интересовала предельная глубина эффективной работы установок в условиях естественной конвекции как наиболее экономичной по сравнению с принудительной тягой.

Для этого гидростроители Вилюйской ГЭС-3 провели натурный эксперимент с целью определения эффективности замораживающих установок на глубине до 100 м. На полигоне были испытаны сезонно действующие охлаждающие установки (СОУ) следующих конструкций: две парожидкостные с использованием в качестве рабочего вещества аммиака и фреона-12, две жидкостные с керосином, одна воздушная. В одной жидкостной СОУ движение хладагента происходило за счет естественной конвекции, в другой – принудительно с помощью насоса. Циркуляция воздуха в воздушной СОУ осуществлялась также при помощи

Гидроузлы

№ п/п	Плотина, назначение	Год строительства	Место-расположение	Координаты		Среднегод. температура воздуха, °С	Мощность мерзлоты, м	Температура на глубине нулевых годовых колебаний, °С
				с.ш.	в.д.			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Плотина на руч. 89-го пикета; питьевое водоснабжение	1940	Западная Сибирь, Норильский промышленный район	69°31'	88°20'	-9.5	200	-
2	Плотина на руч. Разведочном; водоснабжение	1942	Западная Сибирь, Норильский промышленный район	69°31'	88°20'	-9.5	-	-
3	Плотина на р. Долгой; техническое водоснабжение, водохранилище-охладитель	1943	Западная Сибирь, Норильский промышленный район	69°31'	88°20'	-9.5	200	0...-4
4	Плотина на р. Наледной; водоснабжение	1951	Западная Сибирь, Норильский промышленный район	69°31'	88°20'	-9.5	200	0...-4
5	Плотина Норильской ТЭЦ-2; техническое водоснабжение, водохранилище-охладитель	1968	Западная Сибирь, Норильский промышленный район	69°31'	88°20'	-9.5	400	0...-4
6	Плотина на оз. Мелком; водоснабжение	1964	Западная Сибирь, Норильский промышленный район	69°31'	88°20'	-9.5	200	0...-4
7	Плотина на руч. Портовом; водоснабжение	1940-1965	Пос. Амдерма, Ненецкий автономный округ	69°45'	61°40'	-10.5	150	-5
8	Ледозащитная дамба в порту Дудинка; защита причала от ледохода	1975	Г. Дудинка, Красноярский край	69°00'	86°00'	-8.0	300	-1...-4

в Арктической зоне России

Плотина				Источник	Примечание
Материал тела и основания	Высота, м	Длина, м	Принцип строительства		
10	11	12	13	14	15
<p>Зона прерывистого распространения ММП. <i>Тело:</i> грунтовая с ядром и понуром, с дренажем; верховая призма из супеси и суглинка, низовая – из песчаного грунта. <i>ПФЭ:</i> ядро из глинобетона, понур – супесь, в основании металлический шпунт. <i>Основание:</i> коренные породы (мерзлые мергели, известняки, сланцы, доломиты) перекрыты льдистыми супесями и суглинками</p>	5.5	–	Талый	[Борисов, Шамшура, 1959; Середа, 1959; Геокриология СССР..., 1989а]	Разрушилась через 1 год
<p>Зона прерывистого распространения ММП. <i>Тело:</i> грунтовая с ядром и диафрагмой; упорные призмы из песка прикрыты сверху торфом и камнем; дренаж отсутствует. <i>ПФЭ:</i> ядро из супеси с деревянным шпунтом. <i>Основание:</i> коренные породы (сланцы, доломиты) перекрыты супесями с прослоями льда</p>	2.0	–	Мерзлый	[Богословский, 1958; Борисов, Шамшура, 1959; Геокриология СССР..., 1989а]	Разрушена специально через 4 года. Сброс воды осуществлялся через гребень
<p>Зона прерывистого распространения ММП. <i>Тело:</i> грунтовая с ядром и понуром; призмы из песка прикрыты торфом и двойной отмосткой. <i>ПФЭ:</i> ядро из глинобетона, понур – суглинок. <i>Основание:</i> коренные породы (долериты, мергели, известняки, сланцы, доломиты, песчаники) перекрыты льдонасыщенной мореной (пылеватые супеси, гравелистые суглинки, пески)</p>	10	130	Мерзлый	[Цвид, 1957; Богословский, 1958; Борисов, Шамшура, 1959; Цветкова, 1960; Цытович и др., 1972; Геокриология СССР..., 1989а]	Работает. Оборудована ЗС: жидкостные и воздушные колонки; навес по низовому откосу
<p>Зона прерывистого распространения ММП. <i>Тело:</i> грунтовая с ядром; призмы из суглинка; по низовому откосу деревянный проветриваемый настил. <i>ПФЭ:</i> глинобетонное ядро. <i>Основание:</i> коренные породы (сланцы, доломиты, песчаники)</p>	7	60	Мерзлый	[Борисов, Шамшура, 1959; Цветкова, 1960; Биянов, 1983; Геокриология СССР..., 1989а]	Работает. Оборудована воздушной ЗС. По низовому откосу устроен деревянный навес с продухами
<p>Зона прерывистого распространения ММП. <i>Тело:</i> грунтовая с диафрагмой и дренажем; призмы из песчано-гравелисто-галечникового грунта. <i>ПФЭ:</i> диафрагма из стального шпунта. <i>Основание:</i> коренные породы (габбро-диабазы, долериты, мергели, известняки, гипсы, сланцы, доломиты, песчаники) перекрыты четвертичными льдистыми гравелисто-галечниковыми отложениями</p>	20	680	Талый	[Дахно, Овчаренко, 1968; Биянов и др., 1989; Геокриология СССР..., 1989а]	Работает
<p>Зона прерывистого распространения ММП. <i>Тело:</i> грунтовая с ядром, призмы из щебенистого грунта. <i>ПФЭ:</i> ядро из суглинка с включением щебня. <i>Основание:</i> коренные породы (глинистые сланцы) перекрыты льдистыми заторфованными супесями и суглинками, галькой, щебнем</p>	7	214	Мерзлый	[Цветкова, 1960; Гришин и др., 1966; Биянов и др., 1989; Геокриология СССР..., 1989а]	Работает. Оборудована двухрядной воздушной ЗС
<p>Зона сплошного распространения ММП. <i>Тело:</i> верховой клин из суглинка, низовой – каменная наброска. <i>ПФЭ:</i> мерзлое ядро из суглинка. <i>Основание:</i> коренные породы (диабазы) перекрыты четвертичными отложениями (супеси, суглинки, крупнообломочные разности с прослоями и линзами льда)</p>	7	190	Мерзлый	[Цытович и др., 1972; Биянов и др., 1989; Геокриология СССР..., 1988]	Работает. Оборудована ЗС. По низовому откосу деревянный настил с продухами
<p>Зона сплошного распространения ММП. <i>Тело:</i> мерзлый грунт и лесототходы. <i>ПФЭ:</i> мерзлый песок и суглинок с примесью опилок и горбыля, сверху прикрыт опилками и грунтом. <i>Основание:</i> переслаивающиеся супеси, суглинки и пески подстилаются гляциально-морскими суглинками и супесями</p>	14	620	Мерзлый	[Кузнецов, Ушакова, 1966; Кизим, 1982; Биянов и др., 1989; Геокриология СССР..., 1989а]	Работает

1	2	3	4	5	6	7	8	9
9	Русловая плотина Хантайской ГЭС на р. Хантайка; гидроэнергетика	1975	Пос. Снежногорск, Красноярский край	68°05'	87°47'	-8.0	30-400	-2...-3
10	Правобережная плотина Хантайской ГЭС; гидроэнергетика	1975	Бассейн р. Хантайка, Красноярский край	68°05'	87°47'	-8.0	30-400	-2...-3
11	Левобережная плотина Хантайской ГЭС; гидроэнергетика	1975	Бассейн р. Хантайка, Красноярский край	68°05'	87°47'	-8.0	30-400	-2...-3
12	Русловая плотина Курейской ГЭС на р. Курейка; гидроэнергетика		Пос. Светлогорск, Красноярский край	66°05'	88°20'	-8.0	30-400	-2...-3
13	Плотина в левобережном понижении Курейской ГЭС; гидроэнергетика	1985	Бассейн р. Курейка, Красноярский край	66°05'	88°20'	-	-	-
14	Плотина на руч. Певек, Чуанская ТЭЦ; питьевое и хозяйственное водоснабжение	1969	Г. Певек, Чукотский автономный округ	69°42'	170°19'	-9.5	230	-7
15	Плотина на руч. Поннеурген; Билибинская АЭС; водоснабжение питьевое и хозяйственное	1975	Пос. Билибино, Чукотский автономный округ	68°03'	166°32'	-10.4	100-400	-2...-8
16	Плотина Серебряковской ГЭС-1 на р. Вороньей; гидроэнергетика	1964-1967	Северо-восток Кольского п-ова	68°50'	35°34'	0.6	15-20	0

10	11	12	13	14	15
<p>Зона сплошного и прерывистого распространения ММП.</p> <p><i>Тело:</i> каменная наброска с ядром; по низовой грани ядра устроен фильтр.</p> <p><i>ПФЭ:</i> ядро из моренных грунтов с цементационной завесой в основании.</p> <p><i>Основание:</i> морена, рыхлые аллювиальные отложения представлены гравием, галечником, валунами, подстилаются сильновыветрелыми трещиноватыми долеритами и известняками</p>	65	300	Талый	[Биянов, 1983; Геокриология СССР..., 1989а]	Работает
<p>Зона сплошного и прерывистого распространения ММП.</p> <p><i>Тело:</i> каменная наброска.</p> <p><i>ПФЭ:</i> ядро из морены.</p> <p><i>Основание:</i> морена, озерно-ледниковые, делювиально-аллювиальные отложения (суглинки, супеси, гравий, галька)</p>	33	2500	Талый	[Биянов, 1983; Биянов и др., 1989; Геокриология СССР..., 1989а]	Работает
<p>Зона сплошного и прерывистого распространения ММП.</p> <p><i>Тело:</i> каменная наброска.</p> <p><i>ПФЭ:</i> ядро из морены.</p> <p><i>Основание:</i> долериты, прикрытые суглинками</p>	11	1800	Талый	[Биянов и др., 1989; Геокриология СССР..., 1989а]	Работает
<p>Зона островного распространения ММП.</p> <p><i>Тело:</i> каменно-земляная.</p> <p><i>ПФЭ:</i> ядро из моренных суглинков.</p> <p><i>Основание:</i> коренные породы (интрузии долеритов с ксенолитами, песчаниками и графитами) перекрыты четвертичными отложениями в виде торфа, супесей, суглинков, песков и гравия</p>	81.5	1844	Талый	[Биянов и др., 1989; Геокриология СССР..., 1989а]	Работает
<p>Зона сплошного и прерывистого распространения ММП.</p> <p><i>Тело:</i> каменно-земляная; упорные призмы из горной массы.</p> <p><i>ПФЭ:</i> экран с понуром из моренных суглинков, имеется дренажное устройство со стороны низовой грани экрана по типу обратного фильтра.</p> <p><i>Основание:</i> коренные породы (долериты и песчаники) перекрыты супесями</p>	29.5	1130	Талый	[Биянов и др., 1989; Геокриология СССР..., 1989а]	Работает
<p>Зона сплошного распространения ММП.</p> <p><i>Тело:</i> щебенистая супесь с упорной призмой из каменной наброски в низовом клине.</p> <p><i>ПФЭ:</i> ядро из суглинка.</p> <p><i>Основание:</i> коренные породы (сильнотрещиноватые, сильновыветрелые, ожелезненные глинистые сланцы, многочисленные линзы ископаемого льда)</p>	24.9	552	Мерзлый	[Геокриология СССР..., 1989в; Демченко и др., 2005]	Работает. Оборудована воздушной ЗС
<p>Зона сплошного распространения ММП.</p> <p><i>Тело:</i> упорные призмы из гравийно-галечника, дресвы и щебня с ядром.</p> <p><i>ПФЭ:</i> ядро из суглинка, гальки, гравия, дресвы и щебня, имеется дренаж в низовой упорной призме.</p> <p><i>Основание:</i> четвертичные гравийно-галечниковые аллювиальные отложения с линзами льда, подстилаются коренными породами (сланцами и песчаниками)</p>	18	680	Талый	[Бадера и др., 1978; Биянов, 1983; Геокриология СССР..., 1989в; Демченко и др., 2005]	Работает
<p>Зона островного распространения ММП.</p> <p><i>Тело:</i> каменно-набросная с ядром.</p> <p><i>ПФЭ:</i> ядро из супесчаной морены.</p> <p><i>Основание:</i> коренные породы – граниты; четвертичные отложения – морена</p>	78	1820	Талый	[Биянов, 1983; Геокриология СССР..., 1988]	Работает

1	2	3	4	5	6	7	8	9
17	Плотина на р. Казачка, Анадырская ТЭЦ; водоснабжение	1983	Пос. Анадырь, Чукотский автономный округ	64°44'	177°31'	-8.0	40-120	-1.5...-5.6
18	Плотина в восточном секторе Арктики, мыс Шмидта; водоснабжение поселка и порта	1964	Чукотский автономный округ	68°55'	179°27'	-8.0	200-300	-
19	Приустьевая плотина на руч. Ыраас-Юрях; водохранилище-отстойник	1996-1998	Пос. Анабар, Анабарский улус РС (Я)	73°13'	113°33'	-14	800	-7...-9
20	Плотина на руч. Поисковом, Депутатский ГОК; техническое водоснабжение	1980-1984	Пос. Депутатский, Усть-Янский улус РС (Я)	68°18'	139°58'	-13.2	300	-6.5
21	Нижне-Кумахская плотина на р. Кумах; водоснабжение	1940-1945	Г. Оймякон	63°27'	139°56'	-15.7	300	-7...-8
22	Верхне-Кумахская плотина на р. Кумах; водоснабжение	1941-1942	Пос. Эге-Хая, Верхоянский улус РС (Я)	67°32'	134°40'	-15.7	300	-7...-8
23	Плотина на руч. Сыгыган-Сыр, Сарылахская обогатительная фабрика; техническое водоснабжение	1975-1990	Пос. Усть-Нера	66.5°34'	143°24'	-14.7	150	-7

Примечание. ММП – многолетнемерзлые породы; ПФЭ – противодиффузионный элемент;

10	11	12	13	14	15
<p>Зона сплошного распространения ММП. <i>Тело:</i> грунтовая из щебенисто-гравийного грунта с ядром и замораживающей системой. <i>ПФЭ:</i> супесчано-суглинистое ядро. <i>Основание:</i> коренные породы (угленосные породы, базальты и андезитобазальты) перекрыты четвертичными отложениями (торф, супеси, суглинки, пылеватый песок с гравием и галькой) высокой льдистости с включениями чистого льда в виде инъекционного и повторно-жильного льда</p>	16	1250	Мерзлый	[<i>Геокриология СССР..., 1989в; Демченко и др., 2005</i>]	Работает. Оборудована парожидкостной ЗС
<p>Зона сплошного распространения ММП. <i>Тело:</i> грунтовая с ядром; верховая и низовая призмы из глинистого сланца. <i>ПФЭ:</i> ядро из суглинистых грунтов со щебнем и торфом. <i>Основание:</i> коренные породы (сильнотрещиноватые глинистые сланцы) перекрыты торфянистыми суглинками и супесями, галькой и щебнем, сильно льдонасыщенны (с линзами льда)</p>	7.5	214	Мерзлый	[<i>Геокриология СССР..., 1989в</i>]	Работает. Оборудована рассольной ЗС
<p>Зона сплошного распространения ММП. <i>Тело:</i> каменно-набросная с ядром. <i>ПФЭ:</i> ядро из суглинка, экран с понуром из намытых пылеватых песков. <i>Основание:</i> коренные породы (сильнотрещиноватые льдистые карбонатные образования, разрушенные до щебенисто-дресвяно-суглинистого состояния) перекрыты четвертичными отложениями, представленными льдистыми супесчано-суглинистыми разностями, алевритами, песками, галечниками и дресвяно-щебенистыми разновидностями</p>	31	553	Мерзлый	[<i>Геокриология СССР..., 1989б</i>]	Работает
<p>Зона сплошного распространения ММП. <i>Тело:</i> грунтовая с ядром из супесчано-суглинистого грунта с примесью гальки и гравия. В основании верховой и низовой упорных призм устроены каменно-набросные дамбы из песчаника. <i>ПФЭ:</i> ядро из супеси. <i>Основание:</i> коренные породы (переслаивающиеся песчаники, алевриты и глинистые сланцы) перекрыты аллювиально-делювиальными галечно-гравелистыми грунтами</p>	39	135	Мерзлый	[<i>Геокриология СССР..., 1989б</i>]	Работает. Оборудована жидкостной ЗС
<p>Зона сплошного распространения ММП. <i>Тело:</i> грунтовая из супеси с деревянным ядром. <i>ПФЭ:</i> деревянная ряжевая стенка погружена в мерзлые грунты основания на 3 м, обсыпана суглинком с уплотнением. <i>Основание:</i> коренные породы перекрыты гравийно-галечниковыми отложениями и прикрыты слоем суглинка. Встречаются линзы льда</p>	8	95	Мерзлый	[<i>Калабин, 1946; Богословский, 1958; Биянов и др., 1989; Геокриология СССР..., 1989в</i>]	Разрушена
<p>Зона сплошного распространения ММП. <i>Тело:</i> грунтовая из супеси с диафрагмой. <i>ПФЭ:</i> деревянная шпунтовая диафрагма. <i>Основание:</i> коренные породы (сильновыветрелые песчаники, алевриты и аргеллиты) перекрыты гравийно-галечниковыми отложениями с повторно-жильными льдами</p>	7	90	Мерзлый	[<i>Калабин, 1946; Богословский, 1958; Кузнецов, Ушакова, 1966; Трупаков, 1970; Цытович и др., 1972; Геокриология СССР..., 1989в</i>]	Разрушена
<p>Зона сплошного распространения ММП. <i>Тело:</i> грунтовая с ядром и зубом, упорные шпунты из песчано-гравийной смеси. <i>ПФЭ:</i> ядро с зубом из смеси супеси и щебня. <i>Основание:</i> коренные породы представлены мерзлыми высокольдистыми глинистыми сланцами, перекрыты сверху аллювиальными и делювиальными отложениями</p>	23	840	Мерзлый	[<i>Отчет НИР..., 1992</i>]	Работает. Оборудована воздушной ЗС

ЗС – замораживающая система.

насоса. Все установки в плане были расположены таким образом, что исключалось их взаимное влияние. Эксперимент проводился с октября 1991 по июль 1994 г. Насосы в СОУ с принудительным движением хладагента включались при температуре воздуха ниже $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, СОУ с естественной конвекцией включались автоматически. Эксперимент показал, что по эффективности СОУ расположились в следующей последовательности: 1) жидкостные с принудительной конвекцией теплоносителя; 2) парожидкостные; 3) жидкостные с естественной конвекцией; 4) воздушные [Панов и др., 2002]. Результаты эксперимента по замораживанию таликов с использованием жидкостных СОУ с принудительной циркуляцией теплоносителя успешно применялись и применяются в настоящее время на гидроузлах ОАО «АЛРОСа» в Западной Якутии. В некоторых случаях после промораживания тела и основания плотин СОУ переводились на работу с естественной циркуляцией с последующим отключением их на длительный период.

Тем не менее замораживающие системы не всегда бывают эффективными. Например, ряд гидротехнических сооружений в Якутии и Магаданской области, для поддержания которых в мерзлом состоянии требуются большие ежегодные капитальные вложения. Так, специалисты института «Якутнипроалмаз» и Айхальского ГОКа на гидроузле (р. Марха) для промораживания талика, тела и основания плотины предложили так называемый метод холодного штампа. Суть его заключается в том, что на низовой откос плотины при температуре наружного воздуха ниже $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ отсыпаются комья мерзлого грунта. Мерзлый грунт, отсыпанный зимой, в течение летнего периода оказывает охлаждающее влияние на тело и основание плотины со стороны нижнего бьефа. Этот способ реализовывался при температуре наружного воздуха $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ и температуре ММП $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Отсыпка велась одним слоем, достигавшим 11 м в русловой части при ширине около 50 м. В результате этого за один зимний период был стабилизирован талик – его размеры уменьшились по глубине с 6 до 3 м, по ширине – с 20 до 10 м, температура пород понизилась с 4 до $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, а выход фильтрационного потока в нижний бьеф был остановлен. За вторую зиму противотрационная ядра плотины было охлаждено до $-6\text{...}-8\text{ }^{\circ}\text{C}$, а также был полностью проморожен талик. Следует отметить, что это – результат совместной работы замораживающей системы и каменной наброски. Таким образом, был сделан вывод о высокой эффективности данного метода и его широком использовании в практике [Дюкарев и др., 2001].

Примером послыжного намораживания грунта может служить плотина высотой около 7 м на

р. Наледной в районе Норильска зимой 1950/51 г. (см. таблицу, п. 4) [Борисов, Шамшура, 1959; Цветкова, 1960]. Грунт в данном случае отсыпался в тело плотины слоями по 0.2 м и заливался водой. Следующий слой отсыпался только после промораживания предыдущего. Промораживание одного слоя грунта при температуре $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ происходило за сутки.

На плотине на р. Долгой был проверен способ охлаждения грунтов с помощью навеса на низовом откосе. Сделан он был для устранения отепляющего влияния мощных снежных отложений, систематически накапливавшихся в нижнем бьефе плотины. Навес, выполненный по типу ледников системы М.М. Крылова [1946], в зимнее время вентилировался, летом продухи закрывались, и под навесом сохранялись близкие к нулю температуры. Под влиянием навеса охлаждение грунтов через низовой откос происходило настолько интенсивно, что вскоре замораживающие воздушные колонки оказались не нужны, и их отключили. Следует отметить, что плотина на р. Долгой до сих пор работает с большой тепловой нагрузкой, так как озеро используется как пруд-охладитель для ТЭЦ.

Аналогичный прием охлаждения грунтов тела плотины применен на плотине (высотой 7 м) в пос. Амдерме на руч. Портовом, построенной в 1942–1945 гг. для водоснабжения поселка (см. таблицу, п. 7) [Гришин и др., 1966; Биянов и др., 1989]. В теле плотины после возведения навеса удерживается температура от -3 до $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Плотина работает исправно и в наши дни [Борткевич и др., 2001].

Как отмечено выше, образование ледопородного водонепроницаемого ядра в теле и основании плотины может происходить естественным путем. Это возможно в тех случаях, когда фильтрация через плотину и ее основание незначительна или отсутствует, что подтверждено математическим моделированием [Чжан, 1983]. Примером плотин, промерзших естественным путем в период эксплуатации, может служить ряд гидроузлов водохозяйственного и мелиоративного назначения не только в Арктической зоне (две плотины на руч. Кумах в Верхоянском улусе, плотина Депутатского ГОКа на руч. Поисковом [Богословский, 1958; Кузнецов, Ушакова, 1966; Цытович и др., 1972]), но и на других территориях криолитозоны: на Европейском Севере, в Забайкалье и Магаданской области [Цветкова, 1960; Биянов и др., 1989; Чжан, 2002]. Положительным моментом при переходе грунтовых плотин из талого состояния в мерзлое является повышение их статической и противотрационной устойчивости. Однако формирование этого состояния плотин сопровождается и рядом негативных явлений. Так,

промерзание грунтовых противofильтрационных устройств (экрана, ядра) приводит к их растрескиванию, промерзание дренажных – к повышению вероятности возникновения суффозии из-за поднятия напора. Гребень и откосы подвержены пучению, а при протаивании – осадкам, солифлюкции, термоэрозии и другим криогенным процессам.

Опасным с точки зрения статической и фильтрационной устойчивости плотин является переход их из мерзлого состояния в талое. В зависимости от инженерно-геокриологических условий интенсивность этого процесса может достигать очень больших скоростей, особенно в коренных трещиноватых породах, трещины которых заполнены льдом, а также в льдонасыщенных породах в зонах тектонического дробления. Особенно активизировались эти процессы в конце XX – начале XXI вв. в связи с потеплением климата на планете [Всероссийская конференция..., 2005].

Сложные геокриологические процессы происходят при промерзании плотин, выполненных из крупнообломочного грунта – каменной наброски. Характерной особенностью формирования теплового режима в подобных плотинах является то, что в первые годы их эксплуатации превалирует конвективный теплообмен с атмосферой. Так, на плотине Вилюйской ГЭС-1, 2 охлаждение низовой призмы плотины в первые годы ее эксплуатации было настолько интенсивным, что произошло промораживание подруслового талика р. Вилюй. Это позволило в тот период отказаться от цементации основания. В то же время в таких материалах в летний период за счет конденсации влаги образуются ледопородные массивы, которые практически останавливают конвективный теплообмен, и процесс формирования теплового режима сооружения меняет направление, т. е. начинается растепление [Каменский, 1977; Буряков и др., 2013].

В условиях Арктики и Субарктики часто сооружают и “талые” плотины. К этому типу относятся плотина на руч. Квадратном в районе Норильска и несколько плотин в бассейне р. Колымы и др. (см. таблицу). По талому, а точнее, таломерзлomu принципу работают плотины, имеющие значительную высоту (60–130 м и более). Это плотины энергетического назначения: Вилюйская ГЭС-1, 2, 3; Колымская ГЭС, Курейская и Хантайская ГЭС. Несмотря на большие напоры, они оказались более надежными в работе по сравнению с плотинами низко- и средненапорных гидроузлов. Это обусловлено в первую очередь тем, что данные сооружения, как правило, повышенной классности и имеют высокую степень проработки проектно-изыскательских работ. Тем не менее при их эксплуатации возникают проблемы естественного характера, связанные с формированием температурно-влажностного режима в теле и основании

этих сооружений и, как следствие, с активизацией криогенных процессов и явлений. Отечественными инженерами был предложен так называемый противопучинистый оголовок, представляющий собой прикрытие оголовка ядра плотины крупнодисперсными грунтами. Однако эта конструкция в силу повышенной фильтрационной способности не в полной мере обеспечивает противofильтрационную и суффозионную безопасность плотины.

Для борьбы с пучением оголовков противofильтрационных устройств на каскаде Вилюйских ГЭС применялись способы химической обработки и электропрогрева грунтов. Заслуживает внимания способ тепловой завесы, описанный В.А. Пехтиным [2004]. Суть его заключается в создании в обратном фильтре ядра плотины, со стороны нижнего бьефа, тепловой завесы по типу замораживающей системы, только вместо замораживающих колонок здесь скважины оборудованы нагревателями. В качестве обогревающих устройств могут быть использованы электроннагреватели омического типа, применявшиеся для оттаивания грунтов оснований сооружений на глубину до 40–60 м на Колымской ГЭС и Вилюйской ГЭС-3. В Канаде способ тепловой завесы успешно прошел испытания на гидроузле Уайтсхорс Рапидс, на дамбе высотой 15 м, где противofильтрационное устройство было выполнено из илистого грунта. Тепловая завеса была устроена из системы горизонтальных асбестоцементных труб, заглубленных в ядро плотины на 1.52 и 2.44 м. В качестве теплоносителя в трубах здесь использовалась смесь воды с этиленгликолем температурой от 25 до 55 °С [Пехтин, 2004].

Нередко угрозой устойчивости гидроузлов служит образование так называемого арочного эффекта в теле плотины при промерзании грунтов со стороны гребня и откосов. Суть эффекта заключается в том, что промерзшие сверху грунты плотины образуют прочную мерзлую арку определенной толщины. При гравитационном уплотнении талых грунтов плотины в процессе ее эксплуатации происходит отрыв их от мерзлой арки. В результате в теле плотины возникают продольные полости. Примером такого эффекта может служить плотина Аркагалинского гидроузла на р. Мянунджа [Гуль, 2007].

Определенный интерес в практике плотиностроения в Арктике представляют попытки построения оттаивания грунтов основания, содержащих крупные ледяные включения. Одна из таких попыток была предпринята при возведении плотины на р. Казачка (см. таблицу, п. 17). Льдистые галечно-гравийные отложения после устройства в них котлована под зуб подвергались естественному протаиванию в течение двух летних сезонов.

Второй случай предпостроечного оттаивания грунтов основания под плотину применили на руч. Мелком. Основанием плотины здесь служило погребенное промерзшее озеро, заполненное льдом с прослойками торфа. Борта долины ручья были сложены повторно-жильными льдами (см. таблицу, п. 18). С целью обеспечить устойчивость плотины в столь сложных геокриологических условиях при возможном оттаивании грунтов основания были осуществлены сложные мероприятия – частичная замена грунта, значительное (до 6 м) заглубление висячего зуба, цементация трещин в коренных породах и др.

Как уже отмечалось, специфика возведения гидроузлов в криолитозоне заключается в том, что многолетнемерзлые грунты резко меняют свои физико-механические свойства при переходе в талое состояние. Это осложняет производство работ в летний период, когда все пространство вокруг плотины затоплено и заболочено. Наиболее благоприятным периодом возведения гидроузлов, как это ни парадоксально, является зима. Российскими инженерами была разработана технология круглогодичного возведения грунтовых плотин, учитывающая суровые климатические, инженерно-геологические и мерзлотные условия обширных регионов распространения криолитозоны.

Суть так называемого сухого метода (так назвали его строители Вилюйской ГЭС-1, 2) заключается в том, что мелкодисперсные грунты карьеров разрабатывались летом по мере их оттаивания и укладывались в бурты хранения. Для сохранения грунтов в талом состоянии, чтобы температура при их укладке в экран зимой была не ниже 4 °С, проводились специальные мероприятия: засоление, электропрогрев. Поддержание грунтов в талом состоянии на всем технологическом пути (бурт–транспортировка–укладка в противофильтрационное устройство плотины) потребовало разработки способов защиты грунтов от замерзания. Были использованы химические реагенты и электропрогрев кузовов транспортных средств. Этот метод получил дальнейшее развитие на Усть-Хантайской, Курейской, Колымской и Усть-Среднеканской ГЭС [Торопов, 2001]. Работы велись при температурах наружного воздуха до –50 °С, в то время как в Канаде и Швеции отсыпка даже каменной наброски разрешается только до –30 °С, а для укладки мелкозернистых грунтов в противофильтрационные устройства – не ниже –5...–10 °С. Это явилось настоящим прорывом в области строительства плотин талого типа в криолитозоне.

Сложные инженерно-геокриологические, гидрогеологические и гидрологические условия криолитозоны привели к тому, что при проектировании и строительстве гидроузлов в арктических районах больше стали уделять внимания изыска-

ниям и исследованиям оснований в значительной удаленности от створа плотин [Чжан, 2000]. Практика эксплуатации гидротехнических сооружений показала, что при отепляющем влиянии водохранилища происходит деградация ММП в основании и массивах береговых примыканий гидросооружений. Бывали случаи, когда обходная фильтрация обнаруживалась за несколько километров от створа плотины [Шестернев и др., 2012]. Исследования свидетельствуют, что гидроузлы работают в сложном термонапряженном гидродинамическом поле. Сохранение квазистабильного состояния, обеспечивающего устойчивость сооружения в целом, представляет сложную инженерную задачу. Нередко гидроузлы переходят из одного теплового состояния в другое – талые в мерзлые и мерзлые в талые [Чжан, 2002, 2014].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассматривая гидроузлы как природно-технические системы, в общем случае следует отметить, что даже в периоды относительно стабильного климата они находятся в сложных термонапряженных гидрогеокриологических полях. Возникновение этих полей обусловлено воздействием следующих основных факторов:

- климатических, гидрологических, гидрогеологических, геокриологических;
- гидродинамических (наполнение и сработка водохранилища);
- тепловых (сбросы воды промышленного производства; замораживающие и охлаждающие устройства).

Глобальное изменение климата, которое наиболее сильно коснулось арктических и субарктических территорий криолитозоны, существенно повлияло на процесс стабилизации состояния гидротехнических сооружений. В этой связи необходима организация мониторинговой системы на гидроузлах [Zhang, 2014]. При этом должен выполняться постулат К. Шеннона [1963]: “система управления не должна быть проще управляемого объекта”, т. е. мониторинговая система должна отвечать современному уровню развития науки и техники и финансироваться в необходимом объеме. Особое значение в настоящий период приобретает и создание новых конструкций гидротехнических сооружений на основе новейших достижений научной и инженерной мысли с использованием современных конструктивных материалов и технологий.

Литература

- Бадера А.Д., Жигодский В.А., Сидов М.П.** Строительство земляной плотины Билибинской АТЭС // Энергетическое стр-во, 1978, № 2, с. 41–43.
- Биянов Г.Ф.** Плотины на вечной мерзлоте / Г.Ф. Биянов. М., Энергоиздат, 1983, 176 с.

- Биянов Г.Ф.** Грунтовые плотины на вечной мерзлоте // Г.Ф. Биянов, О.А. Когодовский, В.Н. Макаров. Якутск, ИМЗ СО АН СССР, 1989, 152 с.
- Близняк Е.В.** О проектировании и строительстве плотин в условиях вечной мерзлоты // Гидротехн. стр-во, 1937, № 9, с. 14–16.
- Богословский П.А.** О строительстве земляных плотин в районах распространения многолетнемерзлых грунтов // Тр. Горьковского инж.-строит. ин-та им. В.П. Чкалова, 1958, вып. 29, с. 3–34.
- Борисов Г.А., Шамшура Г.Я.** Опыт проектирования, строительства и эксплуатации земляных плотин в Норильске // VII Междувед. совещ. по мерзлотоведению: Материалы по инж. мерзлотоведению. М., Изд-во АН СССР, 1959, с. 110–119.
- Борткевич С.В., Красильников Н.А., Олимпиев Д.Н., Иванников В.Н.** Защита грунтовых плотин от солнечной радиации как средство повышения их надежности в северной строительной климатической зоне // Гидротехн. стр-во, 2001, № 4, с. 12–17.
- Буряков О.А., Панов С.И., Буряков О.А., Светличный А.А.** Особенности температурно-влажностного режима каменно-земляных плотин в условиях Средней Сибири // Изв. ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2013, т. 270, с. 36–48.
- Всероссийская конференция** “Изменение климата в XXI веке: современные тенденции, прогностические сценарии и оценка последствий”. СПб., ИНЕНКО, 2005, 47 с.
- Геокриология СССР.** Европейская территория СССР / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Недра, 1988, 258 с.
- Геокриология СССР.** Западная Сибирь / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Недра, 1989а, 454 с.
- Геокриология СССР.** Средняя Сибирь / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Недра, 1989б, 414 с.
- Геокриология СССР.** Восточная Сибирь и Дальний Восток / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Недра, 1989в, 515 с.
- Гришин П.А., Дюков А.Е., Новиков Ю.А.** Строительство плотин мерзлого типа в районах арктического побережья // Тр. IV совещ.-семинара по обмену опытом строительства в суровых климатических условиях (Воркута, 1966). Красноярск, ПромстройНИИпроект, 1966, т. X, с. 2–7.
- Гулый С.А.** Исследование причин изменения физико-механических свойств грунтов в теле плотины Аркагаалинской ГРЭС // Гидротехн. стр-во, 2007, № 12, с. 2–7.
- Дахно Г.Д., Овчаренко Л.Н.** Выбор оптимального способа уплотнения грунтов в теле плотин гидроузла Норильской ГЭС-2 // Тр. совещ.-семинара по строительству (Тюмень, 1968). Красноярск, ПромстройНИИпроект, 1968, т. VIII, вып. 1, с. 12–18.
- Демченко Т.В., Кривоногова Н.Ф., Кривошеков В.С., Щербаносов В.Н.** Гидроузлы Чукотки: инженерно-геокриологические условия // Тр. ЧФ СВКНИИ ДВО РАН. Магадан, 2005, вып. 9, 112 с.
- Дюкарев В.П., Сергиевский В.В., Сухно А.М.** Опыт ликвидации фильтрующего талика плотины в условиях Крайнего Севера // Гидротехн. стр-во, 2001, № 12, с. 14–16.
- Инструкция** по проектированию гидротехнических сооружений в районах распространения вечномерзлых грунтов. ВСН 30-83. Л., Минэнерго СССР, 1983, 100 с.
- Калабин А.И.** Примеры устройства плотин и водоемов на вечной мерзлоте // Кольма, 1946, № 4–5, с. 31–41.
- Каменский Р.М.** Термический режим плотины и водохранилища Вилюйской ГЭС / Р.М. Каменский. Якутск, ИМЗ СО АН СССР, 1977, 100 с.
- Кизим А.Г.** Опыт строительства и эксплуатации ледозащитной дамбы в Заполярье // Материалы конференций и совещаний по гидротехнике. Л., Энергия, 1982, с. 154–158.
- Крылов М.М.** Замороженные плотины // Мерзлотоведение. М., Изд-во АН СССР, 1946, т. 1, вып. 1, с. 61–64.
- Кузнецов Г.И., Ушакова В.К.** О влиянии сосредоточенной фильтрации и оттаивания льдонасыщенных грунтов оснований на устойчивость плотин // Тр. IV совещ.-семинара по обмену опытом строительства в суровых климатических условиях (Воркута, 1966). Красноярск, ПромстройНИИпроект, 1966, т. X, с. 1–59.
- Кузьмин Г.П., Чжан Р.В.** К вопросу обеспечения надежности и оценки охлаждающей способности воздушных термосифонов // Криосфера Земли, 2004, т. VIII, № 1, с. 74–77.
- Отчет НИР** по теме: Контроль за термическим состоянием плотины хвостохранилища Сарылахской фабрики ГОКа “Индибирзолото” / Р.В. Чжан // Фонды ИМ СО АН СССР. Якутск, 1992, 48 с.
- Панов С.И., Максимов И.А., Цвик А.М., Толошинов А.В.** Экспериментальные исследования работоспособности глубоких сезоннодействующих охлаждающих устройств на опытном полигоне Вилюйской ГЭС-3 // Гидротехн. стр-во, 2002, № 12, с. 30–33.
- Пехтин В.А.** О безопасности плотин в Северной строительной климатической зоне // Гидротехн. стр-во, 2004, № 10, с. 6–10.
- Середа В.А.** Опыт проектирования гидротехнических сооружений с долговременным замораживанием грунта // Материалы VII Междувед. совещ. по мерзлотоведению. М., Изд-во АН СССР, 1959, с. 120–128.
- СНиП 2.06.05-84*.** Плотины из грунтовых материалов. М., Госстрой СССР, 1991, 56 с.
- Строительная климатология.** Актуализир. редакция СНиП 23-01-99*. М., АПП ЦИТП, 2012, 109 с.
- СП 39.13330.2012.** Плотины из грунтовых материалов. Актуализир. редакция СНиП 2.06.05-84*. М., АПП ЦИТП, 2012, 74 с.
- Солодкин С.Н.** Вопросы водоснабжения жилых поселков и промышленных предприятий в Магаданской области // Совещ.-семинар по обмену опытом строительства на вечномерзлых грунтах (Магадан, 1964). Красноярск, ПромстройНИИпроект, 1966, вып. 1, т. VII, с. 144–156.
- Тимофейчук В.С.** Классификация гидросооружений в районе вечной мерзлоты и принципы строительства // Изв. вузов. Стр-во и архитектура, 1977, № 10, с. 99–103.
- Торопов Л.Н.** Гидроэнергетика в суровых условиях Крайнего Севера // Гидротехн. стр-во, 2001, № 12, с. 11–13.
- Трупаков Н.Г.** Строительство земляных плотин на вечномерзлых грунтах // Гидротехн. стр-во, 1970, № 9, с. 8–11.
- Устройство** для охлаждения вечномерзлых грунтов: Патент на полезную модель № 120111 / Г.П. Кузьмин, Р.В. Чжан, А.В. Яковлев. Заявка № 2011146997, приоритет от 18.10.2011 г., зарегистрировано в Госреестре полезных моделей РФ 10.2012.
- Цветкова С.Г.** Опыт строительства плотин в районах распространения многолетнемерзлых грунтов // Материалы к основам учения о мерзлых зонах земной коры. М., Изд-во АН СССР, 1960, вып. VI, с. 87–110.
- Цвик А.А.** К вопросу о сооружении земляных плотин с замораживанием искусственным холодом // Изв. Восточного фил. АН СССР. Владивосток, 1957, № 3, с. 88–93.

Цытович Н.А. Прогноз температурной устойчивости плотин из местных материалов на вечномёрзлых основаниях // Н.А. Цытович, С.Б. Ухов, Н.В. Ухова. Л., Изд-во лит. по строительству, 1972, 143 с.

Чжан Р.В. Прогноз температурного режима низко- и средненапорных грунтовых плотин в Якутии // Р.В. Чжан. Якутск, ИМЗ СО РАН, 1983, 42 с.

Чжан Р.В. Проектирование, строительство и эксплуатация гидротехнических сооружений низкого напора в криолитозоне // Р.В. Чжан. Якутск, ИМЗ СО РАН, 2000, 160 с.

Чжан Р.В. Температурный режим и устойчивость низконапорных гидроузлов и грунтовых каналов в криолитозоне // Р.В. Чжан. Якутск, ИМЗ СО РАН, 2002, 207 с.

Чжан Р.В. Геокриологические принципы работы грунтовых плотин в криолитозоне в условиях меняющегося климата // Фундамент. исслед., 2014, № 9 (ч. 2), с. 288–296.

Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике // К. Шеннон. М., Изд-во иностр. лит., 1963, 830 с.

Шестернев Д.М., Великин С.А., Радостева А.В. Проблемы безопасной эксплуатации гидротехнических систем Западной Якутии на примере Сытыканского гидроузла // Подземная гидросфера: Материалы Всерос. совещ. по подземным водам Востока России (XX совещ. по подземным водам Сибири и Дальнего Востока). Иркутск, 2012, с. 413–418.

Zhang R.V. Monitoring of small and medium embankment dams on permafrost in a changing climate // Sci. Cold and Arid Regions, 2014, vol. 6, No. 4, p. 0348–0355.

<http://арктика-сегодня.рф/images/map/GeographMap-Arctica.jpg>

*Поступила в редакцию
17 февраля 2015 г.*