

Температурно-криогенный режим гидроузла Вилуйской ГЭС-1, 2: геокриологический мониторинг

Чжан Р. В.¹, доктор техн. наук (ИМЗ СО РАН), Великин С. А., кандидат техн. наук (ВНИМС ИМЗ СО РАН), Шестернёв Д. М., доктор техн. наук (ИМЗ СО РАН)

Приводится динамика температурно-криогенного режима гидроузла, впервые построенного в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород. Рассмотрены особенности формирования температурно-влажностного режима гидроузла и роль каменной наброски в тепло- и массообменных (криогенных) процессах искусственно созданной сложной природно-технической системы. Установлено, что, несмотря на более чем 50-летний период эксплуатации, тепловой режим гидроузла находится в перманентном состоянии и далёк от стационарного режима. Происходит оттаивание береговых примыканий плотины и ложа водохранилища, отмечена цикличность термодриогенных процессов в низовой каменно-набросной упорной призме и в основании плотины. Показатели устойчивости гидроузла находятся в пределах норм, регламентированных законодательными документами России.

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

The temperature and cryogenic regime of the Vilyui Hydro-1,2: Geocryological monitoring

Zhang R. V., Dr. Eng (Melnikov Permafrost Institute SB RAS), Vilikin S. A., Cand. Eng (Vilyui Permafrost Research Station, Melnikov Permafrost Institute SB RAS),
Shesternev D. M., Dr. Eng. (Melnikov Permafrost Institute SB RAS)

This article presents the dynamics of the ground temperature regime at the first hydro project constructed in the continuous permafrost zone. The thermal and hydrologic regimes at the damsite, as well as the role of rockfill in heat and mass transfer in this complex geotechnical system are discussed. The study indicates that, after over 50 years in operation, the thermal regime of the hydro project remains unstable and is far from steady state. Thawing is observed at the dam abutments and in the reservoir floor, as well as cyclic thermo-cryogenic processes in the downstream toe and dam foundation. The stability criteria are within the standards set up by the Russian legislative documents.

Keywords: permafrost, hydro project, dam, temperature regime, geotechnical system, heat transfer, seepage, structural stability.

Сибирь и Дальний Восток России являются кладовой природных ресурсов, потребность в которых как на внутренних, так и на внешних рынках постоянно возрастает. Для их эффективного освоения в 60 – 70-е гг. прошлого столетия создана и продолжает развиваться современная социально-экономическая инфраструктура. В обеспечении ее функционирования ведущую роль играют гидро-энергетические комплексы, одним из которых является Вилуйский гидроузел мощностью 680 МВт, предназначенный для энергоснабжения Западного Якутского района Республики Саха (Якутия). Он расположен в верхнем течении р. Вилуй, на расстоянии 1348 км от устья, вблизи пос. Чернышевского Мирнинского района.

Строительство гидроузла Вилуйской ГЭС-1, 2 (ВГЭС-1, 2) по проекту Ленинградского отделения Ленгидропроекта им. С. Я. Жука было начато в

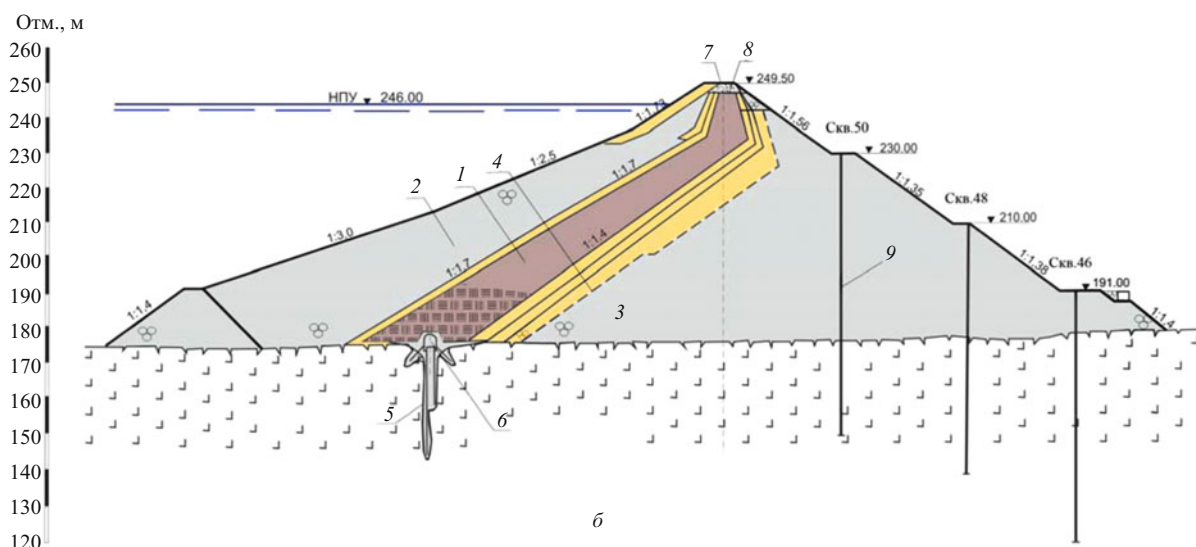
марте 1959 г., в 1967 г. был осуществлен пуск первого агрегата, в январе 1970 г. гидроузел начал эксплуатироваться.

Техническая надежность и экологическая безопасность гидроузла обеспечиваются не только конструктивными особенностями, но и умением обеспечить рациональное функционирование всех объектов инфраструктуры в сложных природно-климатических условиях. В связи с этим в период строительства гидроузла Всесоюзным научно-исследовательским институтом гидротехники им. Б. Е. Веденеева (ВНИИГ) была создана техническая сеть мониторинга, с использованием которой велись наблюдения за тепловым состоянием плотины с 1965 по 1974 г. С 1974 г. и по настоящее время научное сопровождение теплового состояния гидроузла осуществляет группа наблюдения КВГЭС-1, 2 совместно с Вилуйской научно-исследовательской мерзлотной станцией Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова Сибирского отделения

¹ rvzhang@mpi.ysn.ru



a



b

Рис. 1. ВГЭС-1, 2. Общий вид (a) и поперечное сечение (б) плотины в русловой части на ПК 2+80:

1 — экран из суглинка; 2 — пригрузка из каменной наброски; 3 — низовая упорная призма из каменной наброски; 4 — фильтры; 5 — цементационная завеса; 6 — цементационная галерея; 7 — фильтр; 8 — щебень, песчано-гравийная смесь; 9 — скважина, термометрическая

Российской академии наук (ВНИМС ИМЗ СО РАН).

За этот период сеть мониторинговых исследований существенно расширена. Постоянно совершенствуется техническая оснащенность мониторинга, поставленные задачи решаются с использованием специально разработанного геофизического измерительного комплекса, позволяющего прямыми и дистанционными методами осуществлять контроль и диагностику технического прессинга и влияние изменений природных условий на эксплуатацию гидроузла и его сооружений.

Природно-климатические условия

Природно-климатические условия района расположения гидроузла описаны в литературе [1 – 9] и др.

Строительство и эксплуатация гидроузла совпали с периодом глобального изменения климата, оказывающего существенное воздействие на компоненты природной среды. Отметим, что многолетняя среднегодовая температура воздуха за период эксплуатации повысилась на 1,7 °С и составила минус 6,2 °С, а количество осадков в среднем увеличилось на 43 мм и достигало примерно 380 мм. Можно сделать вывод, что произошли изменения наблюдаемых и расчетных климатических характеристик. Присутствует явный статистический тренд повышения температуры воздуха. В результате изменяются практически все типы физико-геологических процессов, связанных с изменением состава строения и свойств пород в слое годовых теплооборотов литосферы. В этих условиях большое значение приобретают мониторинговые исследования

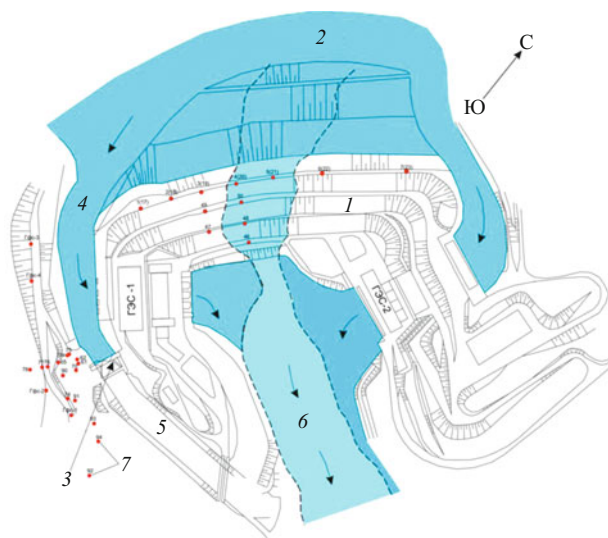


Рис. 2. ВГЭС-1,2. Схема расположения термометрических скважин на плотине и правобережном примыкании:

1 — плотина; 2 — водохранилище; 3 — затвор; 4 — водоподводящий канал; 5 — водосброс; 6 — контур русла р. Вилюй; 7 — скважина, термометрическая

(геокриологический мониторинг), которые призваны уточнять величины изменения природной среды и условия работы в ней гидротехнических сооружений.

Гидроузел ВГЭС-1, 2 расположен в восточной части Сибирской платформы, в области сочленения двух крупных разновозрастных структур — верхнепалеозойской Тунгусской синеклизы и мезозойской Вилюйской впадины. Створ гидроузла пришелся на территорию с развитием трех комплексов пород двух формаций (осадочных и магматических), перекрывающих друг друга: нижнепалеозойский (кембрий — ордовик), верхнепалеозойский (пермь — карбон) и мезозойский (триас — юра) [4]. Древние породы нижнего кембрия представлены известняками и доломитами, алевролитами и песчаниками чарской свиты. Верхний кембрий сложен глинисто-карбонатными загипсованными породами, известковыми и железистыми мергелями, песчанистыми известняками. Породы терригенной формации каменноугольного пермского возраста представлены песчаниками, песками, алевролитами, глинами и галечниками. Мезозойский период характеризуется породами туфогенного образования триаса — туфы, туфопесчаники, туфобрекчии, туффиты. Туфы имеют очень малую сопротивляемость к циклическому промерзанию-оттаиванию. За 10 циклов они полностью теряют цементные связи и разрушаются. Большинство пород относятся к скальным и полускальным. Створ характеризуется мощными интрузиями диабазов: на правом склоне в его верхней части — включающими ксенолиты пермских песчано-глинистых и известковых пород, на левом — туфогенными породами

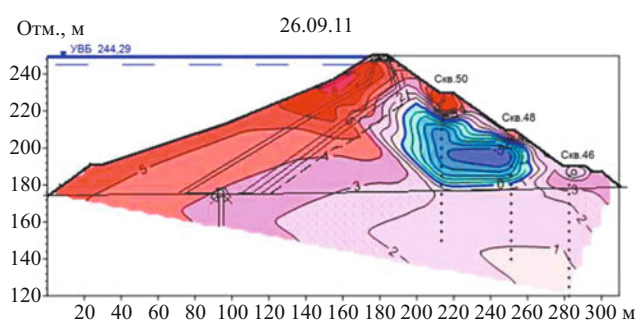
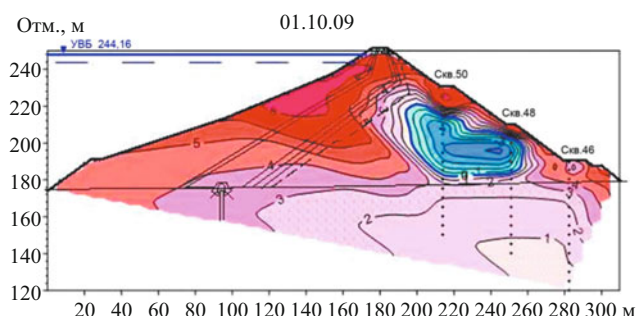
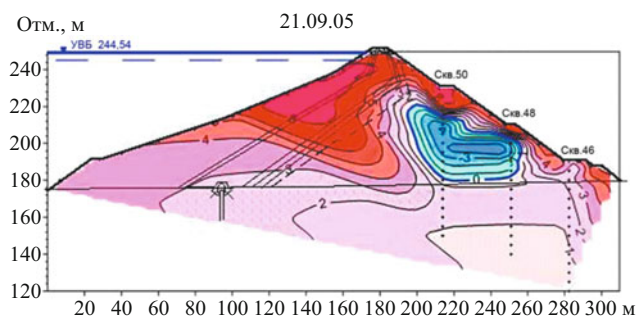


Рис. 3. ВГЭС-1,2. Температурно-криогенное поле плотины и основания на ПК 2+40 в разные периоды эксплуатации

триаса. Практически весь массив диабазов разбит системой трещин различной ориентации, образуя столбчатые, пластовые и плиточные отдельности. Первичные трещины образовались в результате остывания интрузии, вторичные — в результате выветривания, морозобойного растрескивания и др. По степени трещиноватости породы относятся к малотрещиноватым, с раскрытием от долей миллиметра до 1,5 см. В единичных случаях встречаются трещины шириной до 10 см. Коэффициенты фильтрации пород вне зоны выветривания изменяются от 1 до 3 м/сут, в зоне выветривания могут достигать 5 – 10 м/сут.

Четвертичные отложения представлены песчано-галечными аллювиальными породами, слагающими пойменные и надпойменные террасы, а также суглинистыми щебнистыми элювиальными, делювиальными и крупноглыбовыми коллювиальными отложениями. Мощность отложений колеблется от нескольких сантиметров на возвышенностях до 2 – 3 м у подножия склонов, но может достигать 7 – 10 м [4, 5].

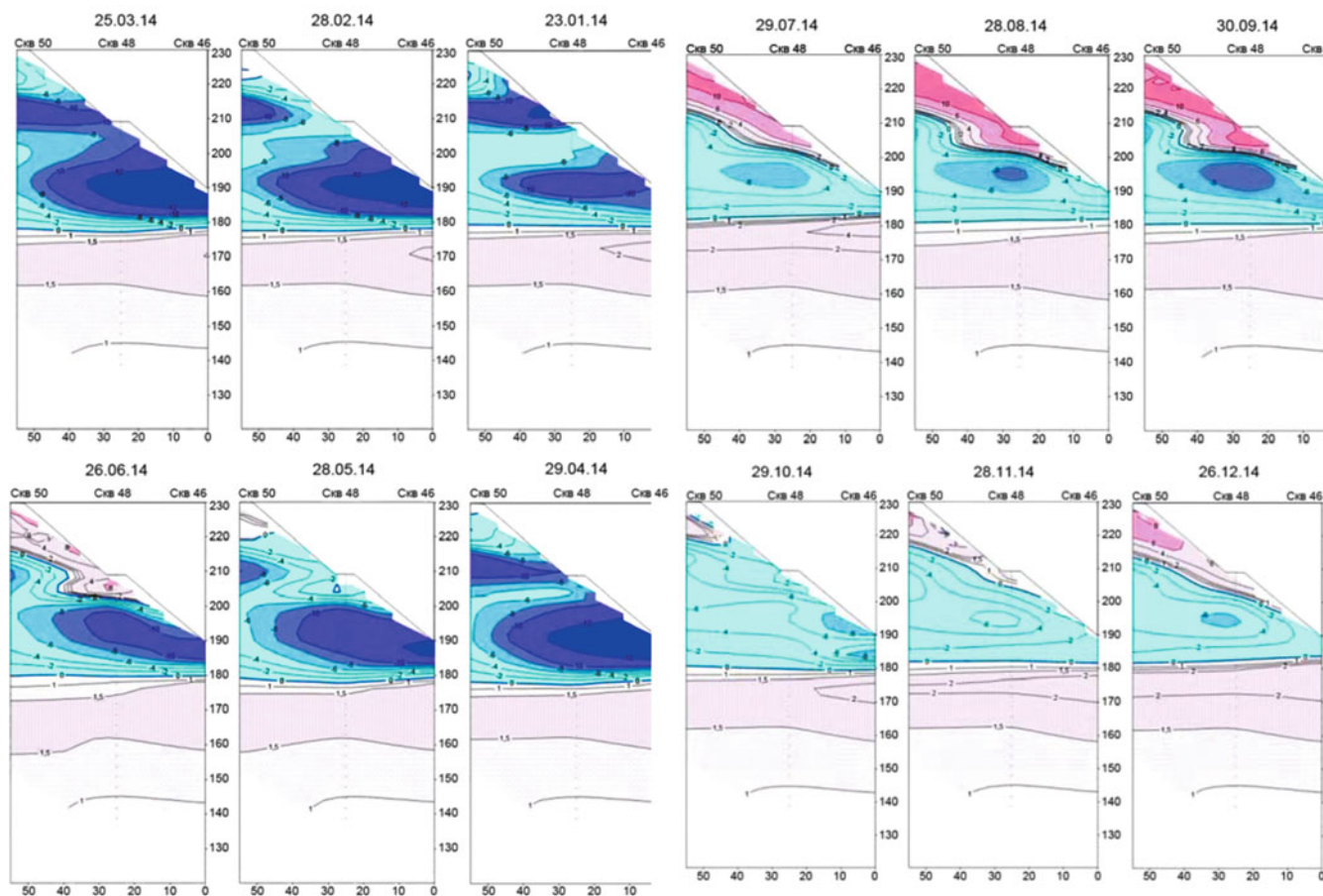


Рис. 4. ВГЭС-1,2. Температурно-криогенный поле упорной призмы и основания плотины со стороны нижнего бьефа с января по декабрь 2014 г.

Район расположения гидроузла относится к области сплошного распространения многолетней мерзлоты. Мощность слоя годовых колебаний температур составляет 15 – 25 м. Мощность многолетнемерзлых пород оценивается в 200 – 400 м, а мощность криолитозоны — в 900 м и более, где породы, содержащие соленые воды и рассолы, охлаждены до 0 °С и ниже [6]. Глубина сезонного протаивания на болотах в суглинках и оторфованных отложениях составляет 0,5 – 1,3 м, в сухих песках и супесях — 2,5 – 3 м, на участках выходов диабазовых останцов — до 4 – 5 м. Она корректируется также экспозицией, крутизной склонов, теплофизическими характеристиками почвенного покрова и др.

По криогенному строению пород четвертичного периода можно судить об истории их развития. Оно зависело от генезиса, литологического состава, условий промерзания и других факторов. Основной особенностью региона является своеобразное формирование температур пород вследствие инверсионного распределения приземного слоя воздушных масс и антициклонального переноса их зимой. Это создавало большие градиенты температур, вызывавшие сложные термонапряженные состояния массивов пород и, как следствие, их деформации. На пойме р. Виллой присутствует полигональ-

но-жильный рельеф со стороны полигонов от 15 до 30 м. Глубина проникновения повторно-жильных льдов составляет 2 – 3 м, ширина жил изменяется от 0,2 до 1,0 м. В коренных породах льдистость не превышала 1 – 3 %, в рыхлых четвертичных отложениях — 25 – 35 %, в озерно-болотистых — до 100 %. Из других форм криогенного проявления встречаются солифлюкция, бугры пучения, термокарст и наледи [7, 8].

Под руслом р. Виллой в районе створа талик пройден до глубины 90 м, контакт талых пород проходит почти вертикально. Коренные склоны на берегах значительно различаются по мерзлотным условиям. Температура многолетнемерзлых пород ниже слоя годовых колебаний температуры в пределах левого берега меняется от минус 2 до минус 3 °С, а на правом берегу — до минус 6 °С [5, 9].

Гидрогеологические условия определяются принадлежностью региона к Якутскому артезианскому бассейну. Подземные воды представлены надмерзлотным горизонтом сезонноталого слоя и подмерзлотным водоносным горизонтом, разгружающимся под руслом р. Виллой. Первые имеют характер верховодки, вторые являются напорными водами из нижнекембрийских отложений в интервале глубин 300 – 320-м. Это высоконапорные ми-



а



б

Рис. 5. ВГЭС-1,2. Тепловые отдушины на низовом откосе плотины (а) и возможные размеры выхода воздушного потока (б)

нерализованные воды хлоридно-натриевого состава насыщены сероводородом с минерализацией до 150 г/л. Пресные воды верховодки носят сезонный характер и имеют малый запас. Большими запасами обладают несквозные речные и подозерные талики. Кроме того, пресные подземные воды существуют в карбонатных породах нижнеордовикского возраста в долине р. Вилюй и его притоков. По составу вода гидрокарбонатная с минерализацией до 0,7 г/л, суммарный дебит этих источников доходит до 350 л/с [6].

Р. Вилюй берет начало в центральной части Средне-Сибирского плоскогорья на высоте 920 м и впадает в р. Лену, слева на 1103 км от ее устья. Длина реки — 2650 км, площадь водосбора — 45 4000 км². Площадь бассейна р. Вилюй, замыкаемая плотиной ВГЭС-1, 2, равна 13 600 км². Наибольший из максимальных расходов притока к водохранилищу Вилюйских ГЭС-1, 2 наблюдался в 1992 г. и составил 16 200 м³/с. Максимальный расход воды в створе гидростанции в период весенних паводков (1957 – 1959 гг.) достигал 13 000 м³/с, а минимальный в зимнее время — 4,3 м³/с. Среднегодовой расход р. Вилюй составляет 2300 м³/с. При проектиро-

вании гидротехнических сооружений гидроузла максимальный расход воды 1 %-ной обеспеченности был принят равным 12 300, 5 %-ной — 10 300 и 10 %-ной — 9830 м³/с [10].

Состав сооружений гидроузла

В состав гидроузла входят следующие гидротехнические сооружения: каменнонабросная плотина; здания ГЭС-1, 2 с подводящими и отводящими каналами, водоприемниками, напорными водоводами; водосброс; водосбросной канал; водохранилище. Ниже приведена краткая характеристика только тех сооружений, на которых проводится геокриологический мониторинг. Конструктивные особенности сооружений и производство работ приведены в работах [10, 11]. На рис. 1 показаны общий вид и поперечный профиль плотины ВГЭС-1, 2.

Каменнонабросная плотина талого типа с суглинистым экраном, переходящим в основании в бетонный зуб, а в верхней части — в ядро, прикрытое песчано-гравийной смесью. Высота плотины — 75 м, длина по гребню — 600 м.

По низовому откосу на отметках 191, 210 и 230 м устроены бермы. В период строительства они использовались в качестве временных дорог, после строительства берма на отметке 191 м стала постоянной автодорогой.

При возведении плотины выветрелые коренные породы и рыхлые четвертичные отложения были удалены, сопряжение экрана со скальным основанием осуществлено с помощью армированной плиты и потерны, из которой впоследствии произведена цементация основания.

Противофильтрационное устройство (экран) отсыпано из суглинисто-дресвяных грунтов по двойному обратному фильтру из дроблёного долерита. Плотность мелкозема экрана равна 1,6 – 1,65 г/см³, влажность — от 8,5 до 11,5 %. Экран прикрыт рядовой каменной наброской переменной толщины: в гребне — 5 м, в основании откоса — 30 – 35 м. Следует отметить, что на строительстве ВГЭС-1,2 впервые в мировой практике была разработана технология возведения противофильтрационного устройства из связных грунтов при температуре наружного воздуха до минус 40 °С [10, 11].

Низовая упорная призма из крупнообломочных пород (каменная наброска — долерит, диабаз) с наибольшим количеством мелкозема отсыпалась 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 и представляет собой однопро-

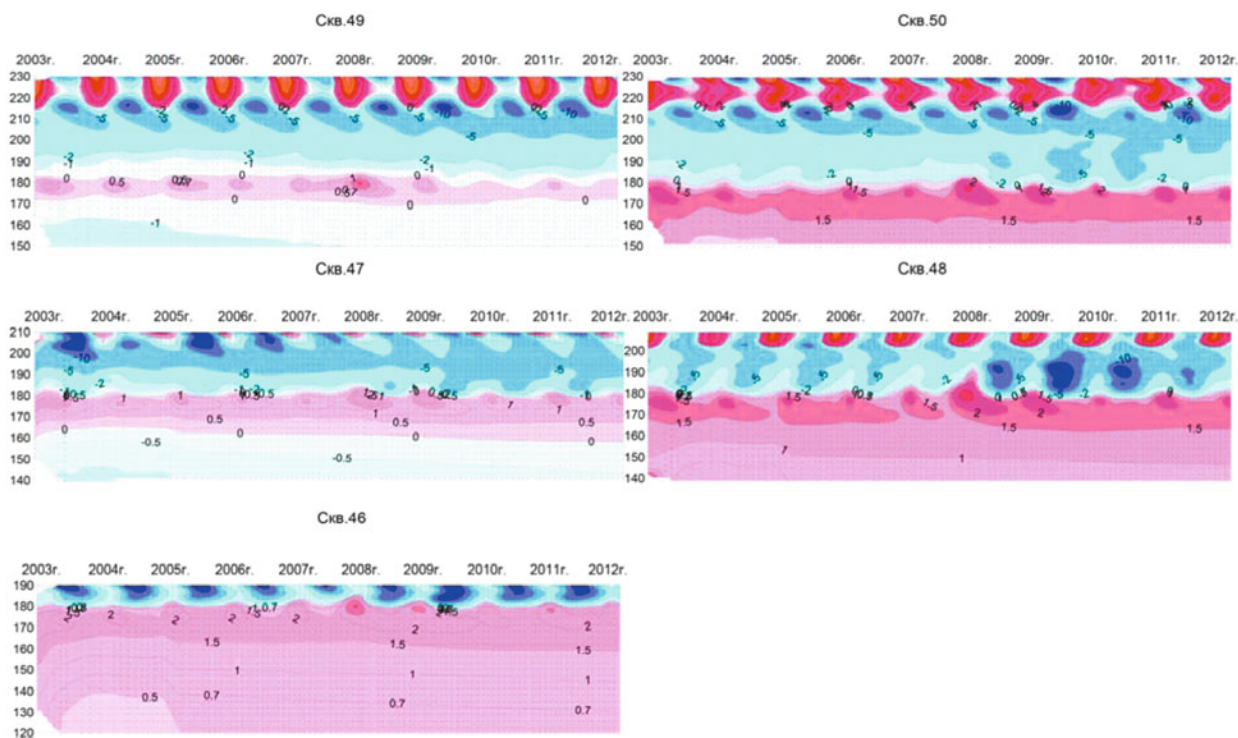


Рис. 6. ВГЭС-1,2. Динамика формирования температурно-криогенного поля тела и основания плотины на ПК 1+80 и ПК 2+40 с 2003 по 2014 г.

летное отверстие шириной 40 м с порогом на отм. 231,0 м, перекрываемое сегментным стальным затвором высотой 16,0 м. Расход при НПУ — 3900 м³/с, при ФПУ — 5200 м³/с.

Водохранилище многолетнего регулирования имеет сложное очертание в плане и представляет собой чередование озеровидных расширений и каньонообразных участков. 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 км³. Общая протяженность береговой линии составляет более 2500 км.

Содержание и методика мониторинга

Описание и обоснование методики начального периода мониторинга приведены в работах [9, 12 – 14]. В настоящее время, в связи с проблемой устойчивости правобережного примыкания плотины, Вилуйской НИМС в больших объемах проводятся геофизические исследования, включая геотермические, по оконтуриванию и определению параметров образовавшихся фильтрующих таликов — скорости фильтрации, расходов. Схема расположения термометрических скважин и геофизических профилей на гидроузле показана на рис. 2.

Температурно-криогенный режим гидроузла

Первые мониторинговые наблюдения на гидроузле показали, что формирование температурно-криогенного режима тела и основания плотины носит очень сложный характер. Механизм переноса тепла и вещества в различных частях поперечного сечения плотины при взаимодействии с окружающей средой весьма разнообразен и обусловлен свойствами рассматриваемой системы. Так, если в экране и основании плотины причиной конвективного переноса является фильтрация и миграция воды в промерзающих частях, то в низовой призме это происходит из-за плотностной стратификации воздуха в порах, когда вместе с теплом воздух переносит и водяной пар [19].

Тело и основание плотины. После возведения плотины и других сооружений, входящих в состав гидроузла, образовалась крупная природно-техническая система, которая вступила в тепловое и механическое взаимодействие с окружающей средой. Нарушились естественные условия теплообмена, и термический режим основания стал зависеть от искусственно возведенного сооружения.

Опасения проектировщиков и строителей по поводу промерзания противofильтрационного экрана подтвердились натурными наблюдениями на ПК 2+40 в интервале отметок 198,5 – 213,5 м [9, 12]. Более того, экран стал промерзать ещё во время строительства. В зону криогенного воздействия попал и оголовок противofильтрационного эк-

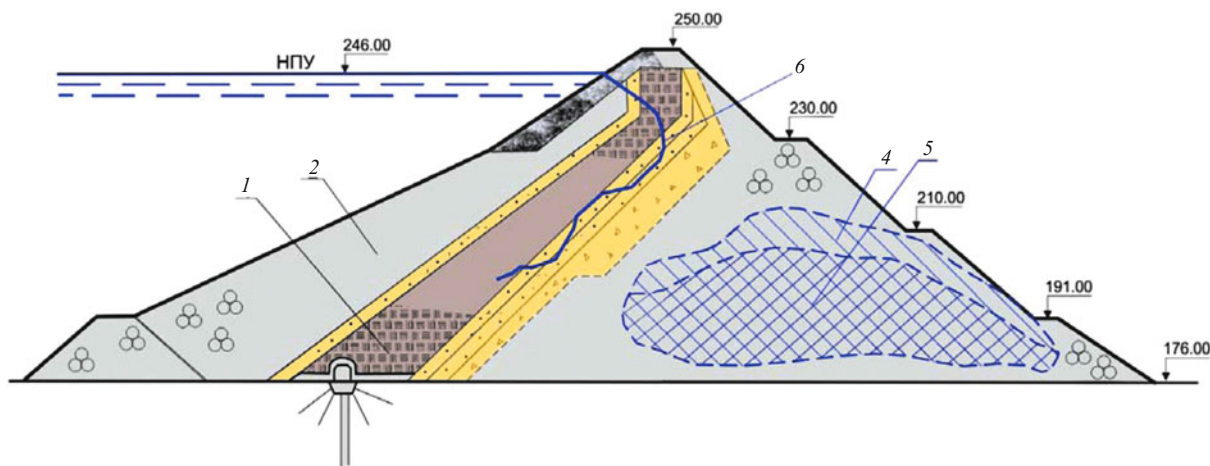


Рис. 7. ВГЭС-1,2. Криогенное состояние плотины по результатам георадиолокационных исследований 2013 г.:

1 — экран из суглинка; 2 — пригрузка из горной массы; 3 — низовая упорная призма из горной массы; 4 — зона мерзлой горной массы с частичным заполнением пор льдом; 5 — зона полного заполнения пор льдом; 6 — кривая депрессии

рана, выполненного в виде вертикального ядра из суглинка и прикрытого сверху 2,5-метровым слоем песчано-гравийной смеси.

По данным наблюдений с 1971 по 1980 г. максимальное проникновение нулевой изотермы наблюдалось в конце марта — начале апреля в русловой (ПК 2+20) и левобережной зонах плотины (ПК 5+80) на глубину от 2,9 до 10,0 м [19]. Было очевидным, что экран плотины нужно приводить в талое состояние, как это предусматривалось проектом.

Не останавливаясь на тонкостях теплообмена в различных частях тела и основания плотины (процессы подробно описаны в трудах [9, 12 – 14]), отметим общие тенденции формирования температурно-криогенного процесса.

После перекрытия р. Виллой 31 октября 1964 г. и вплоть до 1968 г. в результате конвективного теплообмена в каменной наброске низовой упорной призмы наблюдалась тенденция охлаждения тела и основания плотины — это I этап формирования температурно-криогенного режима гидросооружения. С лета 1968 г., когда произошло заполнение водохранилища (1968 – 1969 гг.), началось оттаивание тела и основания плотины — это II этап, который закончился в 1971 г.

Гидравлическая связь бьефов характеризовалась возрастающей интенсивностью фильтрационного потока за счет расширения талика, в результате оттаивания многолетнемерзлых пород бортов долины реки. В этой части основания и тела плотины развивались зоны с положительными температурами, которые способствовали оттаиванию грунта, промерзшего в период строительства и первых лет эксплуатации противофильтрационного экрана. Полное оттаивание экрана на отметках вышеука-

занного интервала (ПК 2+40) произошло в июне 1972 г. [9, 16].

Для сокращения скорости фильтрации в русловой части основания плотины, в конце декабря 1969 — начале января 1970 г. были закончены работы по созданию глубокой цементационной завесы, которые проводились из потерны (на глубину от 15 до 20 м по фронту около 100 м). Кроме того, на остальной пойменной части основания, а это ещё около 600-м, была сделана так называемая сопрягающая завеса на глубину до 4 м.

В этот период наблюдается следующая тепловая картина: на фоне повышения температуры грунтов в целом в 1971 – 1972 гг. отмечено интенсивное понижение температуры в низовой призме и промерзание под ней талика — это III этап. Было установлено, что подрусловой талик за этот период промерз более чем на 60 м [12]. Однако процесс формирования температурного режима был настолько динамичным и сложным, одновременно разнонаправленного действия как по длине, так и в поперечном разрезе плотины, что уже в начале 1976 г. на ПК 2+40 произошла смена его направления и началось оттаивание пород основания — это IV этап формирования термодриогенного режима сооружений.

Такая смена теплового состояния плотины вызвана особенностью теплообмена в приплотинной части водохранилища и в каменной наброске, что подробно описано в работах [9, 12 – 16]. Упорная призма приобрела совершенно иные физические и теплофизические свойства, так как уже является новым искусственно образованным материалом. В свою очередь, это новообразование в процессе эксплуатации постоянно меняет свои свойства, приводя к смене направлений теплового процесса.

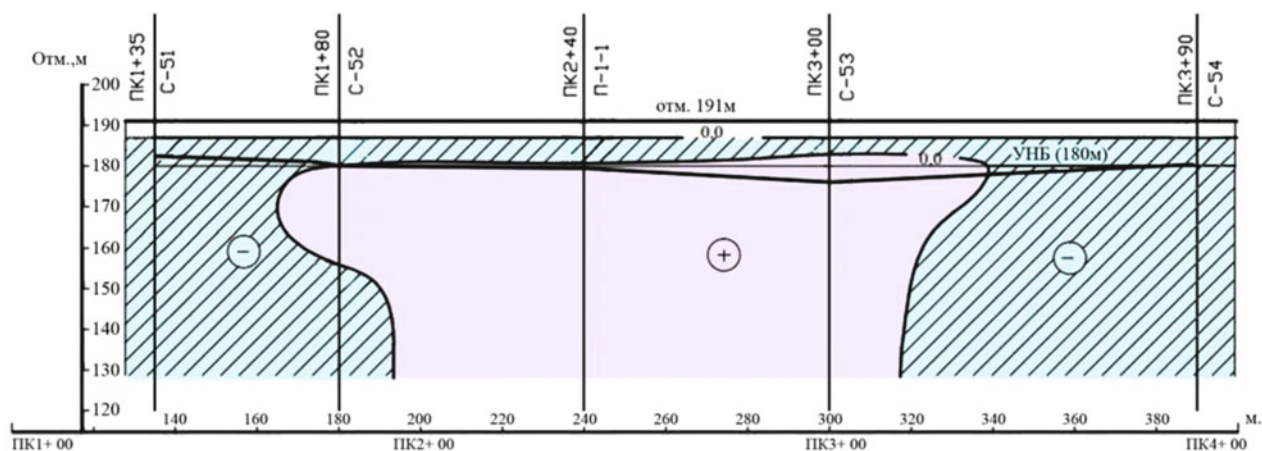


Рис. 8. ВГЭС-1,2. Продольный температурно-криогенный разрез по берме на отметке 191 м

Так выглядела картина формирования температурно-криогенного режима плотины в первое десятилетие эксплуатации гидроузла, характеризовавшаяся быстро меняющимся тепловым состоянием сооружения.

Анализ дальнейших многолетних температурных наблюдений в низовой призме плотины показывает следующую картину: с 2003 по 2008 г. происходит повышение температур, а в 2009 и 2010 гг. отмечена тенденция их понижения; однако с 2011 по 2012 г. температуры стали повышаться, а с начала 2013 г. вновь понижаться. Таким образом, в теле и основании плотины продолжают происходить разнонаправленные тепловые процессы. Температуры флуктуируют примерно через каждые два года. Так, в 2009 – 2011 гг. в диапазоне отметок 120 – 190 м в скважинах 48 и 50 температуры понижались от минус 8 до минус 12 °С, что в полтора раза ниже, чем в 2004 – 2008 гг., а в 2014 г. они повысились до значений температур 2008 г. То есть температурный режим сооружения находится в перманентном состоянии и далек от установившегося. Хотя, если сравнивать температурные поля внутри отдельных периодов, создается впечатление существования квазистационарного режима. В общем здесь можно говорить о квазиустановившемся тепловом балансе сооружения: «количество тепловой энергии, поступающей в сооружение летом и уходящей из него зимой, практически одинаково» [17]. На рис. 3 и 4 проиллюстрирована динамика температурно-криогенного режима тела и основания плотины на ПК 2+40 в характерные периоды эксплуатации, подтверждающая высказанное предположение. А на рис. 5 показан характер расположения выходов воздуха зимой в верхней части низового откоса плотины.

На рис. 6 представлена динамика формирования температурно-криогенного режима части низового клина и основания плотины со стороны нижнего бьефа с 2003 по 2014 г. Натурные данные свиде-

тельствуют о том, что промерзшее в первые годы эксплуатации основание начиная с 2000 г. пребывает в талом состоянии. В то же время хорошо видны флуктуации температуры в отрицательном диапазоне каменной наброски (скважина 47 – 50).

Выше отмечено, что в настоящий период для оперативного мониторинга сооружения используются адаптированные в условиях криолитозоны современные геофизические комплексы. На рис. 7 и 8 представлено температурно-криогенное состояние плотины по результатам георадиолокационных исследований 2013 г. в поперечном разрезе на ПК 2+40 и в продольном сечении.

Динамика температурного режима правобережного примыкания плотины. Результаты анализа многолетних режимных наблюдений за состоянием правобережного примыкания плотины свидетельствуют о том, что вплоть до августа 1996 г. его устойчивость обеспечивалась многолетнемерзлым состоянием пород. Причиной потери устойчивости массива явилось резкое повышение температуры пород до положительных значений. В течение короткого времени образовался фильтрационный поток с расходом до 1700 м³/сут.

В связи с этими обстоятельствами в 1997 г. к имеющейся стандартной системе КИА на гидроузле был организован дополнительный комплекс натурных наблюдений с привлечением геофизических исследований, проводимых ВНИМС ИМЗ СО РАН совместно с группой наблюдения дирекции ВГЭС-1,2. Кроме того, в 2005 г. ООО «АЛРОСА — Спецбурение» совместно с ВНИМС ИМЗ СО РАН был разработан проект инженерно-геологических изыскательских работ по уточнению криогидрогеологических условий на участке развития фильтрационных процессов в правобережном примыкании водосброса. А в 2011 г. ИМЗ СО РАН были выполнены дополнительные изыскания и исследования правобережного массива с целью многофакторного исследования физико-механических свойств пород

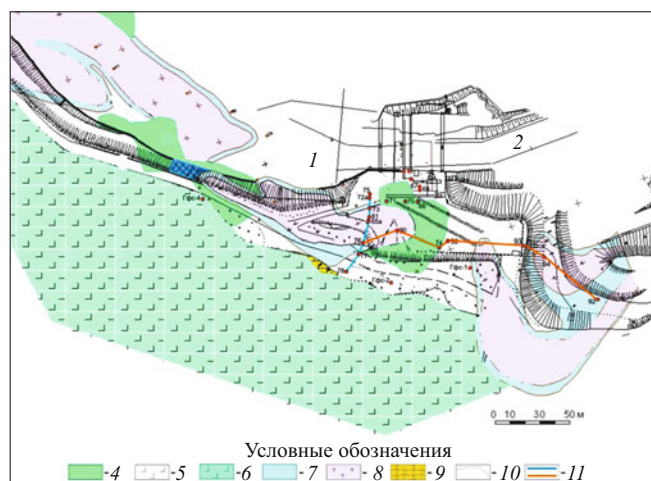


Рис. 9. ВГЭС-1,2. Правобережное примыкание плотины. Схема расположения геотермических наблюдательных скважин и геофизических профилей:

1 — водоподводящий канал; 2 — водосбросной канал; 3 — дорога; 4 — диабазы полнокристаллические (недифференцированные интрузии ранней фазы); 5 — диабазы полнокристаллические (дифференцированная интрузия второй фазы); 6 — палагонитовые диабазы меланократовые; 7 — диабазы зоны контактов (интрузии поздней фазы); 8 — гидротермально измененные песчано-глинистые породы; 9 — ксенолиты карбонатных пород; 10 — геологические границы; 11 — линии геофизических профилей

в теле и основании, включая правобережное примыкание гидроузла [18]. На рис. 9 представлена схема расположения выработок и геофизических профилей в правобережном примыкании ВГЭС-1, 2.

Этот комплекс работ позволил уточнить инженерно-геологическое, мерзлотное строение правобережного примыкания плотины. Массив представлен осадочными, магматическими породами и образованиями, в которых видны проявления тектонической деятельности.

Осадочный комплекс правобережного примыкания гидроузла характеризуется осадочными породами четырех резко различающихся по литологическому составу формаций: 1) отложения нижнего палеозоя, тонкослоистые терригенно-карбонатные породы нижнего ордовика (Olus); 2) отложения верхнего палеозоя, терригенные песчано-глинистые верхней перми (P2); 3) мезозойские отложения, туфогенные породы нижнего триаса (T1Kr); 4) четвертичные отложения (QIII-IV).

Исследования показали, что наиболее динамично тепловые и другие процессы развиваются в отложениях палеозоя (ксенолитах), которые развиты в пределах полосы 100 – 200 м вдоль правого борта водосбросного канала. Они группируются в пластообразные тела мощностью 10 – 40 м с неровными боковыми верхними и нижними границами. Отмечается падение этих пластообразных тел в сторону коренного склона в юго-западном направлении под углами до нескольких десятков градусов. В палеокриогидрологической обстановке ксенолиты

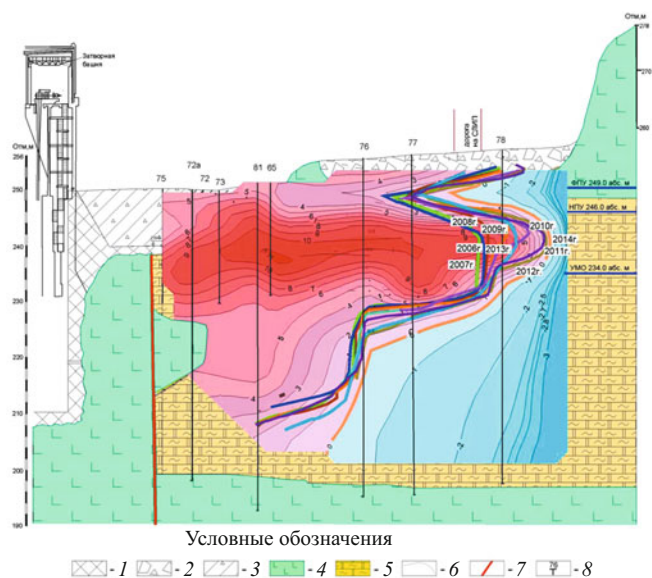


Рис. 10. ВГЭС-1, 2. Правобережное примыкание. Динамика талика по поперечному профилю скважин 75 – 78 за 2006 – 2014 гг.:

1 — бетон; 2 — глыбы, щебень, дресва с супесчаным заполнителем; 3 — дресвяный грунт с суглинистым заполнителем; 4 — диабазы полнокристаллические (недифференцированные интрузии ранней фазы); 5 — ксенолиты карбонатных пород; 6 — геологические границы; 7 — тектонические контакты осадочных пород и интрузии; 8 — скважина, термометрическая

явились основными коллекторами грунтовых вод. Породы ксенолитов представлены измененными аргиллитами, алевролитами, песчаниками, мергелями, известняками и доломитами. По физическим свойствам породы ксенолитов отнесены к группе слабых полускальных неводостойких разностей. Инженерно-геокриологические исследования показали, что ксенолиты, в основном, вмещают зоны интенсивной фильтрации воды из водохранилища в обход гидротехнических сооружений.

Тектонический комплекс, по данным, полученным при наблюдениях на ряде скважин, некоторые из которых были пройдены до глубины 90 м, представлен перемятыми слабыми осадочными породами и раздробленными долеритами. Эти зоны дробления вертикального контакта долеритов с осадочными породами проходят всего в 10 – 20 м от борта водосбросного канала и прослеживаются до их подошв на отметках 185 – 190 м, выклиниваясь в ложе водохранилища на отметках 225 – 226 м.

Таким образом, периметр контакта интрузии и ксенолитов представлен не только высокотемпературными метаморфозами плавления-замещения, цементирующими эти геологические тела, но и зоной механического дробления со слабыми перемятыми породами смешанного состава.

Мерзлотные условия. Дополнительно к ранее известным сведениям установлено, что криогенное преобразование русла р. Вилой происходило эпигенетически с унаследованием трещинных крио-

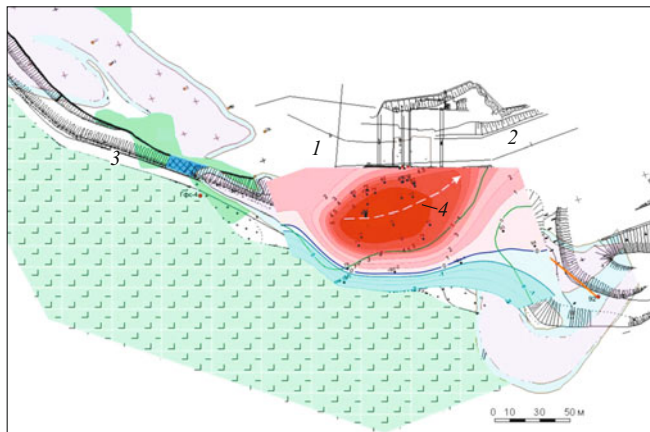


Рис. 11. ВГЭС-1,2. Развитие таликовой зоны (красный цвет) в правобережном примыкании плотины:

1 — водоподводящий канал; 2 — водосбросной канал; 3 — дорога; 4 — направление фильтрационного потока (условные обозначения приведены на рис. 9)

текстур соответственно, то есть их криогенное строение сильно различается для траппов и осадочных пород ксенолитов. До промерзания долины основная часть долеритов являлась относительным водоупором по сравнению с песчано-карбонатными породами ксенолитов и сопутствующими им сильно трещиноватыми афанитовыми долеритами, которые являлись коллекторами грунтовых вод. Это объясняет тот факт, что согласно описанию скважин лед в долеритах практически отсутствует, в то время как трещинная система ксенолитов и осадочных пород насыщена льдом до 10 – 15 %. При этом необходимо учитывать, что, в зависимости от палеогидрогеологических условий в период промерзания долины, наиболее льдонасыщенными скальными фрагментами оказались горизонты, обводненные к моменту промерзания.

По данным натурных наблюдений, с начала 1990-х гг. происходит непрерывное прогрессирующее растепление массива пород ксенолитов, являющихся основанием правобережного примыкания (рис. 10).

Учитывая сложность момента, ВНИМС СО РАН расширила объем геофизических исследований, позволивший охватить большие площади. Комплексные геофизические исследования, опирающиеся на данные, полученные по буровым скважинам, включали следующие виды: электро-разведочные исследования методами геоэлектрической томографии, переходных процессов, георадиолокации и дипольного индуктивного профилирования, сейсмику.

Анализ результатов мониторинга последних лет (2012 – 2014 гг.) с учетом ретроспективных исследований показал, что в пределах правобережного примыкания развилась мощная таликовая зона. Она фиксируется поперечным (скважины 75 – 78) и

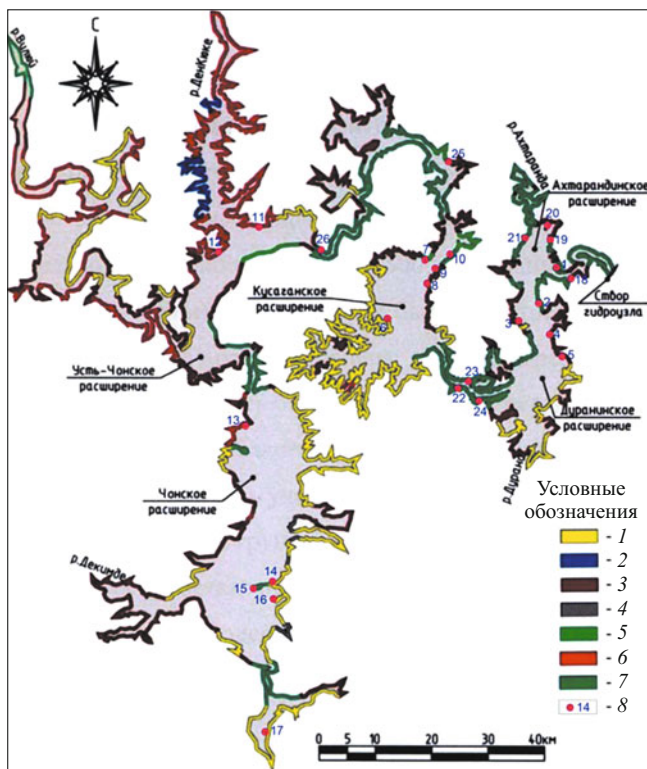


Рис. 12. Схема геологического строения берегов Вилюйского водохранилища и участки стационарных наблюдений за переформированием берегов:

1 — четвертичные аллювиальные отложения; 2 — юрские песчаные отложения; 3 — пермские песчаные отложения; 4 — каменноугольные песчаные отложения; 5 — ордовикские карбонатные отложения; 6 — триасовые туфогенные отложения; 7 — триасовые долеритовые отложения; 8 — участки наблюдений за переформированием берегов

продольным (скважины 77 – 92 и гфс-3-скважина 94) профилями. Данная зона целиком приурочена к ксенолитам карбонатных пород, которые являются основными путями фильтрации воды из водохранилища (рис. 11). Кроме того, зона активно развивается в направлении долеритовой стены, в вершине которой проходит трещина отпора шириной 0,5 – 1,0 м. Поскольку ксенолит сложен рыхлыми высокольдистыми карбонатными породами, развитие фильтрационных процессов происходит вследствие вытаивания порового и трещинного льда. Развитие суффозионных процессов может привести к термокарсту и проседанию (обрушению) участка поддолеритовой стены.

Таким образом, инженерно-геокриологические условия участка правобережного примыкания весьма сложны и разнообразны. Эти процессы должны быть под постоянным контролем, то есть правобережный массив, как и весь гидроузел, должен иметь надежную современную мониторинговую сеть, позволяющую заблаговременно сигнализировать о критическом состоянии этой природно-технической системы, что позволит разрабатывать ин-

женерные решения по обеспечению устойчивости гидроузла.

Термический режим многолетнемерзлых пород ложа водохранилища

Территория Вилюйского водохранилища приурочена к восточной окраине Вилюйского траппового плато и представляет собой расчленённую слабохолмистую поверхность с абсолютными отметками 350 – 400 м. Водохранилище многолетнего регулирования характеризуется очень сложной конфигурацией береговой линии, представляющей собой чередование озеровидных расширений и каньонообразных участков, присутствием многолетнемерзлых льдистых пород и сложной гидрогеологической обстановкой — наличием высокоминерализованных подземных вод. Водохранилище эксплуатируется в режиме внутригодового стока и графика сработки.

Аналогов строительства и эксплуатации подобного водохранилища в криолитозоне не было. Поэтому с самого начала эксплуатации была поставлена цель — изучить процессы теплового и механического взаимодействия при формировании ложа и берегов с водными массами и атмосферой, а также получить исходные краевые условия для разработки методов расчета морфологических параметров.

Известно, что крупные водохранилища гидроэлектростанций оказывают влияние на микроклимат прилегающей территории. Это хорошо изучено для водохранилищ европейской части России [19]. Что касается северо-востока страны, в частности районов криолитозоны, то натурных данных в настоящее время по этому вопросу крайне мало [20].

Первые исследования берегов Вилюйского водохранилища были проведены в период его заполнения летом 1968 г. [21]. Берега были систематизированы по геологическому строению, типизированы по размываемости (скальные, нейтральные) и морфологии (аккумулятивные, термоденудационные, термоабразионные, термокарстовые) [22 – 25].

На рис. 12 представлены схема геологического строения берегов Вилюйского водохранилища и участки стационарных наблюдений за переформированием берегов. В Ахтарандинском, Дуранинском, Кусаганском, Усть-Чонском и Чонском расширениях ВНИМС оборудовала 17 наблюдательных участков. Наблюдения за формированием берегов проводились выборочно по профилям на вышеуказанных участках в 1970 – 1974, 1978, 1982 – 1985 гг. Затем стационарные наблюдения были прекращены. И лишь осенью 2011 г. при организационной поддержке ВНИМС ИМЗ СО РАН экспедицией Нижегородского государственного ар-

хитектурно-строительного университета было проведено обследование берегов и выполнены инструментальные измерения восьми береговых профилей ранее выделенных генетических групп [26].

В 1967 г. ВНИМС ИМЗ СО РАН был заложен первый гидрогеотермический створ в верхнем бьефе, в 800 м от створа плотины. Гидротермический створ простирался от правого берега и охватывал акваторию в 500 м (пять скважин глубиной по 50 м).

Анализ результатов натурных наблюдений первых лет эксплуатации показал, что, хотя интенсивность теплового взаимодействия водных масс с ложем водохранилища довольно быстро снижается, процесс становления установившегося теплового режима будет происходить еще долгое время. Это позволило уже в те годы обосновать необходимость организации мониторинга по формированию теплового состояния берегов и ложа водохранилищ, а также их морфологии в криолитозоне.

Следует отметить, что аппроксимация первых натурных наблюдений глубины протаивания ложа водохранилища проводилась по одномерным зависимостям, которые дали хорошую сходимость с натурными данными [27]. Дальнейшее развитие методов геокриологического прогноза формирования ложа и берегов водохранилищ в России получили исследования, проводимые во ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, в Институте мерзлотоведения СО РАН и Нижегородском государственном архитектурно-строительном университете. Были разработаны и внедрены вычислительные комплексы в 2- и 3-мерных постановках, учитывающие сложную динамику термокриогенных процессов и природно-климатические условия криолитозоны [28].

Многолетние мониторинговые наблюдения и теоретические разработки показали особенности морфологии ложа и берегов водохранилищ в криолитозоне. Средние скорости разрушения термоабразионных берегов Вилюйского водохранилища за многолетний период эксплуатации (1970 – 2011 гг.) составили 0,35 – 1,41 м/год. Эти данные полностью подтвердили ранее сделанный вывод о том, что средние скорости разрушения термоабразионных берегов сопоставимы с одноименными скоростями разрушения абразионных берегов в европейской части России [29].

Морфологические исследования показали, что со временем вмещающий объём ложа водохранилищ в криолитозоне увеличивается. Это происходит в результате вытаивания присутствующего в породах льда и компрессионной осадки отложений. Для больших водохранилищ увеличение объёма в среднем составляет 6 – 8 %, для малых — 20 %. Что касается Вилюйского водохранилища, то за пе-

риод с 1967 по 1982 г. увеличение объёма оценивается всего величиной $0,05 \text{ км}^3$, или $0,14 \%$ [30].

Таким образом, более чем пятидесятилетний опыт наглядно показал необходимость мониторинга на инженерных объектах в криолитозоне в процессе эксплуатации, а полученные научные данные имеют большое теоретическое и прикладное значение.

Заключение

Российскими инженерами разработана технология круглогодичного возведения грунтовых плотин, учитывающая суровые климатические, сложные инженерно-геологические и мерзлотные условия обширных регионов распространения криолитозоны. Восхищаемся смелостью и оригинальностью инженерных решений, которые были впервые в мировой практике северного гидротехнического строительства воплощены на гидроузле Вилуйской ГЭС-1, 2 — первом в мире, построенном в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых грунтов. Гидроузел, по сути, явился натурной моделью, на которой 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.

Конструктивные особенности гидроузла обусловили динамику формирования его температурно-криогенного режима. 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.

Развитие таликовой зоны в правобережном примыкании плотины свидетельствует об активизации тепловых процессов в так называемых 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 принято решение (уже в третий раз) провести доисследование инженерно-геокриологических условий этого участка и разработать проект реконструкции правобережного

примыкания. На этом примере хорошо видна роль мониторинга с включением в него новейших геофизических измерительных комплексов.

Известно, что практически с момента возведения сооружение начинает стареть [31]. Процессы старения особенно интенсивны в суровых природно-климатических условиях криолитозоны. Главной причиной являются криогенные процессы, протекающие в высокоградиентных температурно-влажностных полях [32]. Наибольшей криогенной дезинтеграции грунтов на Вилуйской плотине подвержены суглинистый оголовок противофльтрационного устройства в гребне и каменнонабросная низовая упорная призма. Для обеспечения криогенной устойчивости оголовка противофльтрационного устройства была использована обсыпка его песчано-гравийной смесью мощностью до $3,0 \text{ м}$.

Разрушение материала каменной наброски происходит круглогодично с образованием мелкозема, закупоривающего поры наброски. Формируется новый материал с совершенно иными физико-механическими и теплофизическими свойствами, по сравнению с первоначальным состоянием. Следует отметить, что в настоящее время этот процесс происходит непрерывно и с довольно большой скоростью.

Сегодня на высоком научно-теоретическом уровне разработаны вычислительные прогностические комплексы в 2- и 3-мерной постановке расчетов теплового состояния гидроузлов [33, 34], включая морфологию водохранилищ [28]. Расчетные схемы учитывают конфигурацию сооружения и сложные условия теплообмена с окружающей средой, постоянно меняющиеся во времени и пространстве, а также особенности воздухообмена в каменной наброске.

Эти вычислительные комплексы были проверены на многих гидроузлах криолитозоны, в том числе и на Вилуйских ГЭС-1, 2. Результаты вполне удовлетворительны, но вычислительные комплексы должны совершенствоваться и быть составной частью системы мониторинга и автоматически, практически в режиме онлайн, корректировать краевые условия и выдавать результаты в наглядном графическом виде.

Исследования водохранилищ в криолитозоне показали наличие в основании ложа льдистых многолетнемерзлых пород, которые оттаивают в процессе эксплуатации и являются причиной увеличения их ёмкости. Для некоторых гидроузлов, например Курейской и Хантайской ГЭС, увеличение объёма привело к значительному падению уровня воды в верхнем бьефе и снижению выработки электроэнергии. Однако на Вилуйских ГЭС-1,2 увеличение объёма водохранилища произошло всего на де-

сятые доли процента от проектного, которое компенсируется весенними половодьями на р. Вилюй. В общем, процесс формирования морфологии ложа и берегов водохранилища близок к квазиустановившемуся.

Фильтрационная устойчивость плотины в целом обеспечивается, несмотря на отсутствие дренажа. Это достигается тем, что противофильтрационное устройство, выполненное в виде наклонного суглинистого экрана, расположено на значительном удалении от охлаждающей низовой призмы и постоянно находится в талом состоянии. Кроме того, основание плотины имеет естественный уклон к руслу реки, что способствует отводу профильтровавшейся через экран воды в подрусловой талик, не создавая условий для её скапливания и замерзания со стороны низовой призмы [17]. Это исключает образование дополнительного криогенного напора в теле плотины, который послужил причиной аварии на Колымской ГЭС [35].

В заключение констатируем, что многолетний мониторинг (свыше 50 лет), а также аналитические прогнозы температурно-криогенного состояния гидроузла Вилюйской ГЭС-1, 2 свидетельствует о том, что в настоящее время устойчивость его обеспечена и соответствует нормам безопасности, регламентированной директивными документами.

Список литературы

1. *Справочник по климату СССР*. — Л.: Гидрометеиздат, 1982. Вып. 24. Ч. I. — 554 с.
2. *Справочник по климату СССР*. — Л.: Гидрометеиздат, 1986. Вып. 24. Ч. II. — 398 с.
3. *СП 14.13330.2014*. Строительство в сейсмических районах: Актуализированная редакция СНиП II-7 – 81*. М., 2014.
4. *Ефимов А. И.* Гидрогеологические особенности района месторождения алмазов трубки «Мир» в Западной Якутии // Тр. II совещания по подземным водам и инженерной геологии Восточной Сибири. — Иркутск, 1959. Вып. II. С. 79 – 87.
5. *Геокриологические условия Лено-Вилюйского региона*. Условия формирования сезонно- и многолетнемерзлых пород / К. А. Кондратьева, В. П. Марахтанов, Т. А. Нистратова // Геокриология СССР. Средняя Сибирь / Под ред. Э. Д. Ершова. — М.: Недра, 1989. С. 227 – 249.
6. *Гидрогеология СССР*. Т. 20. Якутская АССР / Под ред. А. И. Ефимова, И. К. Зайцева. — М.: Недра, 1970. — 283 с.
7. *Гидрогеологические условия*. Восточно-Сибирская система артезианских бассейнов и гидрогеологических массивов. Геокриология СССР. Средняя Сибирь / Под ред. Э. Д. Ершова. — М.: Недра, 1989. С. 94 – 195.
8. *Климовский И. В., Готовцев С. П.* Криолитозона Якутской алмазоносной провинции. — Новосибирск: Наука, 1994. — 167 с.
9. *Каменский Р. М.* Термический режим плотины и водохранилища Вилюйской ГЭС. — Якутск: Изд-во ИМЗ СО АН СССР, 1977. — 100 с.
10. *Биянов Г. Ф.* Плотины на вечной мерзлоте. — М.: Энергия, 1975. — 184 с.

11. *Зимняя укладка связных грунтов на Крайнем Севере* / Е. Н. Батенчук, Г. Ф. Биянов, Л. Н. Торопов, Ю. Н. Мызников. — М.: Энергия, 1968. С. 8 – 13.
12. *Оловин Б. А., Медведев Б. А.* Динамика температурного поля плотины Вилюйской ГЭС. — Новосибирск: Наука, 1980. — 48 с.
13. *Смирнов Е. А.* Натурные исследования температурного режима плотины Вилюйской ГЭС // Температурно-влажностный режим плотин из местных материалов в суровых климатических условиях Восточной Сибири и Крайнего Севера: Тезисы докладов. Л., 1969. С. 92 – 94.
14. *Натурные* наблюдения за деформациями и криогенными процессами в теле плотины Вилюйской ГЭС при ее эксплуатации / Я. А. Кроник, А. Н. Гаврилов, М. Г. Мнушкин, Б. И. Абрамов // Инженерное мерзлотоведение в гидротехническом строительстве: Тр. конференций и совещаний по гидротехнике. — Л.: Энергоатомиздат ЛО, 1984. С. 198 – 202.
15. *Мухетдинов Н. А.* Основные факторы, определяющие тепло-влажностный режим низовой призмы каменно-набросной плотины // Опыт проектирования и строительства плотин из местных материалов на Крайнем Севере: Тр. координационных совещаний по гидротехнике. Л., 1974. Вып. 89. С. 11 – 15.
16. *Демидов А. И., Смирнов Е. А.* Температурный режим Вилюйской плотины в первые годы эксплуатации // Тр. координац. совещаний по гидротехнике. Л., 1972. Вып. 72. С. 52 – 57.
17. *Панов С. И., Николаев Ю. М.* Особенности состояния каменно-земляной плотины Вилюйской ГЭС после 40 лет эксплуатации // Изв. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. — СПб.: Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», 2008. Т. 252. С. 3 – 13.
18. *Кузьмин Г. П.* Многофакторное исследование физико-механических свойств пород в основаниях и примыканиях ГТС каскада Вилюйских ГЭС. Раздел. Определение физико-механических свойств мерзлых и талых дисперсных грунтов плотины и правобережного примыкания Вилюйской ГЭС-1 // Фонды ИМЗ СО РАН. Якутск, 2011. — 205 с.
19. *Водохранилища и их воздействие на окружающую среду* / Под ред. Г. В. Воропаева и А. Б. Авекяна. — М.: Наука, 1986. — 368 с.
20. *Оловин Б. А.* Некоторые особенности микроклимата в приплотинной части Вилюйского водохранилища // Техногенные ландшафты севера и их рекультивация. — Новосибирск: Наука, 1979. С. 124 – 128.
21. *Широков В. М.* Формирование берегов при создании Вилюйского водохранилища. — Новосибирск: Зап.-Сиб. кн. изд-во, 1979. — 92 с.
22. *Финаров Д. П.* Динамика берегов и котловин водохранилищ гидроэлектростанций СССР. — Л.: Энергия, 1974. — 244 с.
23. *Ермолаев А. И.* Классификация термоабразийных берегов водохранилищ и прогнозирование их переработки // Береговые процессы в криолитозоне. Новосибирск, 1984. — С. 85 – 92.
24. *Константинов И. П.* Динамика берегов водохранилища Вилюйской ГЭС в период наполнения и начальной эксплуатации // Береговые процессы в криолитозоне. — Новосибирск: Наука, 1984. С. 38 – 50.
25. *Бурлаков В. М.* Районирование Вилюйского водохранилища. Типизация и классификация его берегов // Влияние ГЭС на окружающую среду: Сб. науч. тр. / Акад. наук СССР, Сиб. отд-ние, Якут. фил. Якутск, 1987. — С. 34 – 42.
26. *Великин С. А.* Результаты инструментальных наблюдений и адаптивного прогноза термоабразии берегов Вилюйского водохранилища / С. А. Великин, И. С. Соболев, С. В. Со-

- боль, Д. Н. Хохлов // Гидротехническое строительство. 2013. № 6. С. 2 – 8.
27. Балобаев В. Т. Расчет протаивания сильнольдистых горных пород под дном водоемов с учетом осадки при оттаивании // Береговые процессы в криолитозоне. — Новосибирск: Наука, 1984. С. 93 – 100.
28. Соболев И. С. Программа расчета и графической интерпретации пространственных стационарных температурных полей в основании водоемов криолитозоны // Проблемы геофизики при проектировании, строительстве и эксплуатации объектов энергетик: Сб. материалов Проскуряковских чтений. — СПб.: ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 2001. С. 53 – 55.
29. Арэ Ф. Э. Разрушение берегов арктических приморских низменностей. — Новосибирск: Гео, 2012. — 289 с.
30. Кудояров Л. И., Оникиенко Т. С. Влияние изменений мерзлотных условий в чаше водохранилищ на функционирование северных ГЭС // Гидротехническое строительство. 1990. № 2. С. 8 – 11.
31. Мицхулава Ц. Е. Подходы к оценке меры старения длительно эксплуатируемых плотин // Гидротехническое строительство. 2008. № 6. С. 41 – 49.
32. Чжан Р. В. Температурный режим и устойчивость низконапорных гидроузлов и грунтовых каналов в криолитозоне. — Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2002. — 208 с.
33. Горохов Е. Н. Виртуальная 3D-модель температурно-криогенного режима грунтовых плотин в криолитозоне // Приволжский научный журнал. 2012. № 3. С. 188 – 193.
34. Особенности температурно-влажностного режима каменно-земляных плотин в условиях Средней Сибири // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 2013. Т. 270. С. 36 – 48.
35. Пехтин В. А. О безопасности плотин в Северной строительной-климатической зоне // Гидротехническое строительство. 2004. № 10. С. 6 – 10.