

УДК 550.8, 551.340

ОТРАЖЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ СТРОЕНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ В МАТЕРИАЛАХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАЙОНА СВЕТЛИНСКОЙ ГЭС НА Р. ВИЛЮЙ

С.А. Великин¹, В.Б. Спектор¹

¹ Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН. 677010, Россия, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36; e-mail: velikin2000@mail.ru

Аннотация. В статье рассматриваются особенности геолого-геофизического строения основания и левобережного примыкания Светлинской ГЭС. Показано, что геологическая среда гидротехнического сооружения сохраняет высокую активность и в настоящее время. Предлагается динамическая модель геологической среды района сооружения, которая отличается от разработанных при проектировании и строительстве Светлинской ГЭС. Для своевременного предотвращения опасных ситуаций на гидротехническом сооружении предлагается усилить систему мониторинга и расширить круг наблюдений в существующей системе мониторинга ГТС.

Ключевые слова. Гидротехнические сооружения, многолетнемерзлые породы, криогенные структуры, геодинамическая модель, береговое примыкание, насыпные грунты, растепление, фильтрационные процессы, термометрия, пьезометрические уровни, геофизический мониторинг, электротомография.

GEOPHYSICAL EXPRESSION OF THE SUBSURFACE STRUCTURE IN THE SVETLINSKAYA HYDROELECTRIC POWER STATION AREA ON THE VILYUY RIVER

S.A. Velikin¹, V.B. Spektor¹

¹ Melnikov Permafrost Institute Siberian Branch RAS. Merzlotnaya St., 36, Yakutsk 677010, Russia; e-mail: velikin2000@mail.ru

Abstract. This article discusses characteristic features of the geological and geophysical structure of the foundation and left-bank abutment of the Svetlinskaya Hydroelectric Power Station. It is shown that the geological environment in the station area remains highly active at present. A dynamic model of the subsurface is proposed which differs from those developed during the design and construction stages. To prevent dangerous situations in a timely manner, it is proposed to strengthen the monitoring system by expanding the scope of existing observation programs.

Key words. Dam, permafrost, cryogenic structures, geodynamic model, abutment, earthfill, thawing, seepage processes, thermometry, piezometric levels, geophysical monitoring, electrotomography.

ВВЕДЕНИЕ. Целью предлагаемой статьи является уточнение особенностей геологического строения основания Светлинской ГЭС (Вилуйской ГЭС 3), что позволит расширить систему мониторинга, уточнить положение зон боковой и донной фильтрации, направление интенсивность смещений основания, приводящих к нарушению прочности сооружений плотины.

Светлинская ГЭС, построена на р. Вилуй у пос. Светлого (Республика Саха – Якутия) и была введена в эксплуатацию в 2008 г.

ГЭС расположена в области распространения сплошной многолетней мерзлоты (ММП) мощностью 120–250 м (по некоторым данным до 600 м) с преобладающими среднегодовыми температурами мерзлых пород от –1 до –3 °С (Долгих и др. 2018). Среднегодовая годовая температура приземного слоя воздуха составляет –8,2 °С, средняя месячная температура января –32,3 °С, июля +16,8 °С.

Особенностью инженерно-геологических условий сооружений Светлинской ГЭС (Рис 1) является наличие в их основании (дно долины р. Вилуй) талых и охлажденных засоленных и загипсованных слабопрочных (трещиноватых, участками переломленных, осложненных складками нагнетания) мергелисто-глинистых пород верхолонской свиты

верхнего кембрия. Боковые примыкания плотины сложены породами верхолонской и илгинской свит верхнего кембрия, которые характеризуются, в общем, мерзлым, но на отдельных участках, насыщенным криопэггами, охлажденным состоянием. Выше лежащие усть-кутская свита нижнего ордовика и перекрывающие ее позднепалеозойские отложения, а так же породы трапповой формации слагают приводораздельные участки. Для них характерно полого-наклонное блоковое строение. В боковых примыканиях плотины породы осложнены оползнями.

Для объяснения явлений деформаций и дробления коренных пород изыскателями района строительства (Декларация..., 2004, Исследования..., 2004) была выдвинута *оползневая геодинамическая модель*. Данная модель в первом приближении удовлетворительно объясняет особенности строения верхней части геологической среды участка головных сооружений, и в частности боковые примыкания гидротехнического сооружения (ГТС). Однако, эта модель не объясняет интенсивные дислокации пород основания плотны, различия в форме и интенсивности деформации горных пород в основании и боковых примыканиях ГТС. В то же время в ГТС отмечаются нарушения: протяженные фронтальные трещины (Долгих и др., 2018), которые находятся на гребне плотины,

появление в середине основания зон повышенной фильтрации, которые и не могут быть объяснены воздействием береговых оползней, в настоящее время находящихся в малоактивном состоянии.

Резкие различия в строении основания и бокового примыкания плотины, вероятно, вызваны разными геологическими процессами, происходившими (и происходящими) в нижней части вскрытого разреза и его более высокой части, слагающей верхнюю часть склонов долины р. Виллой. Представляется более целесообразным рассмотреть различные деформации в боковых примыканиях и основания плотины в рамках двухъярусной геодинамической модели. Нижняя часть вскрытого разреза (верхоленская свита) относится к *нижнему динамическому ярусу* геологической среды. Главным вектором напряжений является всестороннее сжатие, которое вызывает подъем пластичных пород *нижнего динамического яруса* вдоль прямолинейного отрезка долины р. Виллой в наиболее ее глубокой части. Сжатие приводит к дроблению и деформации пород, возрастанию их пластичности, следствием чего является валлообразное поднятие пластичной толщи, к формированию в толще складок нагнетания, наиболее крупные из которых приурочены к приосевой зоне долины. В верхнем динамическом ярусе происходит антиклинальный подъем, особенно интенсивный над участком нагнетания, осложненный сбросами. В породах бокового примыкания плотины, которые можно отнести к верхнему динамическому ярусу, главным вектором напряжений является горизонтальное растяжение, направленное поперек долины, в сторону прилегающих водоразделов. Эти напряжения обуславливают развитие сбросов на участках удаленных от склона долины и оползней вблизи склона. Граница между верхним и нижним динамическими ярусами представлена поверхностью скольжения, приуроченной к границе пород, находящейся в твердом состоянии (верхний динамический ярус), и пластично-мерзлыми и маловязкими охлажденными и насыщенными криопэгами породами верхоленской свиты (нижний динамический ярус). Важно подчеркнуть, что характеризующие поля напряжений активно проявились в конце новейшего этапа, в процессе формирования наблюдаемых морфоструктур современного рельефа.

Указанные особенности строения геологической среды указывают на необходимость расширения круга наблюдений в существующей системе мониторинга ГТС.

Геологическое строение района Светлинской ГЭС

В тектоническом отношении рассматриваемый район относится к восточной части Тунгусской синеклизы. На поверхность выходят отложения: верхоленской и илгинской свит верхнего кембрия, усть-кутской свиты нижнего ордовика, терригенные отложения карбона и перми и, в приводораздельных участках, интрузивные образования траппового комплекса триаса. На склонах долины отмечаются маломощные (первые метры) покровы делювиаль-

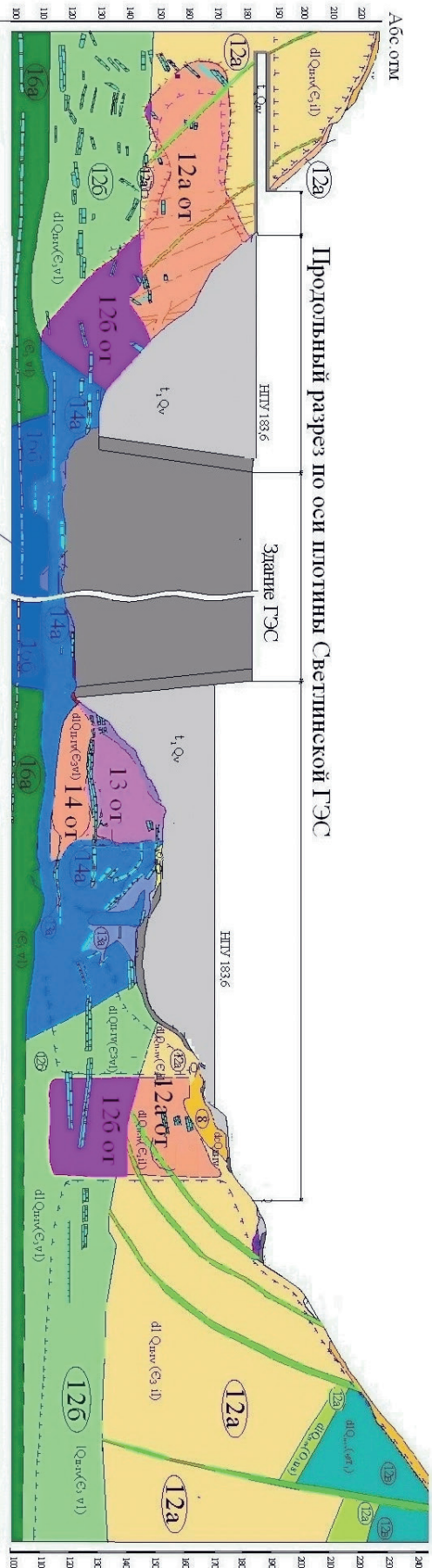
ных отложений. На дне долины р. Виллой развиты отложения поймы и первой надпойменной террасы.

Отложения верхоленской свиты слагают основание видимого разреза. Представлены толщей пестро окрашенных, мергелей, глинистых доломитов с прослоями глин, аргиллитов, гипсов. Мощность свиты в рассматриваемом районе до 200 м (Геология..., 1981), вскрытая мощность около 50 м. Илгинская свита (50–100 м), сложена пестроцветными мергелями с прослоями известковистых алевролитов, песчаников, доломитов, известняков, аргиллитов. Усть-кутская свита (80–120 м) сложена серыми и желтовато-серыми доломитами с прослоями мелкозернистых кварцевых песчаников, мергелей и алевролитов. Терригенные отложения карбона и перми общей мощностью до 100 м с перерывом залегают на подстилающих карбонатных отложениях ордовика и представлены мелкозернистыми полимиктовыми песчаниками с прослоями алевролитов, линзами глин, углей и мелкогалечных конгломератов. На водоразделах осадочная толща венчается несогласно залегающими телами траппов триасового возраста мощностью десятки метров.

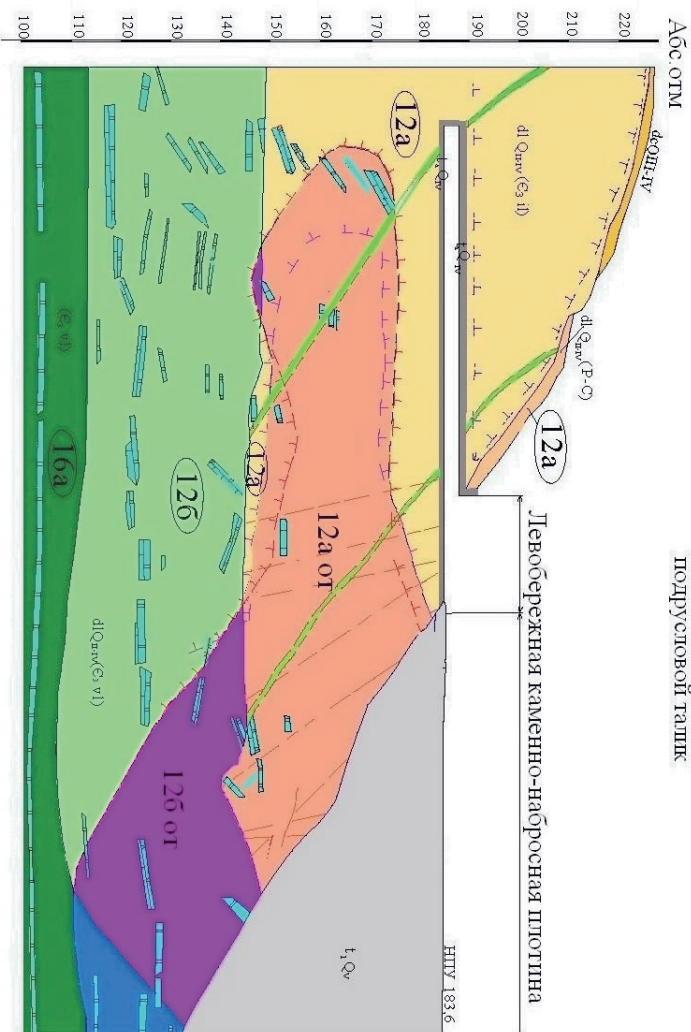
Деформации охарактеризованной выше осадочной колонны распределены по разрезу неравномерно, что позволяет выделить в колонне два динамических яруса: нижний ярус, где развиты интенсивные складчатые деформации, и расположенный выше по разрезу ярус развития полого-складчатых изгибов и блоковых деформаций.

Динамический ярус складчатых деформаций включает исключительно отложения верхоленской свиты. В нем, по данным исследователей (Декларация безопасности, 2004; *Отчет* по договору №4-535/НИ, 2004), выделяются участки в различной степени деформированных пород. К ним относятся участки верхоленской свиты, выделенные как инженерно-геологические элементы – ИГЭ (ИГЭ 126, рис. 1), сложенные аргиллитами, мергелями с прослоями алевролитов, известняков и доломитов, слоистыми, сильно трещиноватыми, перемятыми и разрушенными до щебня и суглинка с отдельными сохранными блоками. Породы засолены (0,5–7%) и загипсованы (1–2%), мерзлые с криопэгами. Криогенная текстура трещинно-пластовая и массивная.

Визуальная льдистость до 5%. Структурно-динамическими «фациями» деформированных пород являются грунты (ИГЭ 14 и 13), которые тяготеют к замку крупной складки нагнетания, приуроченной к руслу р. Виллой. Это (ИГЭ 14) – мергели, алевролиты, аргиллиты щебнистые и дресвяные с суглинистым заполнителем (5–20 до 45%), загипсованные (1–2%). Грунты мерзлые с льдистостью 5–15 до 40%. Другая их разновидность (ИГЭ 13) – суглинки известковистые и доломитистые со щебнем до 25% малопрочных мергелей и доломитов, тугопластичные. Породы засолены (0,2–6%) и загипсованы (до 1%). Грунты мерзлые. Визуальная льдистость 5–10%, реже 10–20%. Под руслом – талые. Мощность до 40 м. В нижней части вскрытого разреза яруса на отдельных участках вскрываются (ИГЭ 16 а) алевролиты глинистые, карбонатные с прослоя-



подрусловой тапик



Условные обозначения

Неустойчивые грунты

породы с криптегами

Засоленные и переходящие в засоленные породы (содержание водорастворимых солей - в среднем 0,2-2,8%, затопленность - от 1-2 до 10%).

Примечание: слои 13а и 14а также отпечатаются высокой водопроницаемостью.

грунты оттаявшие электростаткой

простой пьезометров и доломитов

зоны скольжения и дробления

предполагаемые трещины отрыва

Границы грунтов с положительными и отрицательными температурами

2002 г. 2003 г.

Рис. 1

Инженерно-геологическое строение участка головных сооружений Светлинской ГЭС-3 вдоль оси плотины (по материалам Ленгидропроекта разрез плотины ВГЭС-3 на 8.06.2005 г.)

ми мергелей, известняков, доломитов, реже аргиллитов. Породы слоистые с горизонтальным залеганием, сильно трещиноватые, средней прочности и малопрочные; характерна плитчатая отдельность. Породы практически не затронуты складчатыми деформациями. По плоскостям напластования и трещинам отдельности отмечаются скопления гипса мощностью 0,3–2 см. Загипсованность пород 1–5, до 10%. Отложения имеют отрицательную температуру и содержат криопэги. Под руслом р. Виллой породы талые (16 б). Вскрытая мощность около 10 м.

Динамический ярус блоковых деформаций охватывает породы илгинской свиты и вышележащие толщи. Породы этого яруса расчленены на отдельные крутонаклонные блоки. Границы блоков представлены трещинами, заполненными дресвяно-щебнистыми суглинками и инфильтрационным льдом. Ширина трещин от 0,2 до 1 мм, местами отмечаются зияющие трещины или частично заполненные сублимационным льдом, их ширина достигает 0,1÷0,3 м. Эти трещины квалифицируются как трещины отрыва. На приводораздельных участках границы блоков представляют собой сбросы. Вблизи склонов долины сбросы усложняются проходящим по ним оползнями. Предшествующими исследователями оползни отнесены к «ангарскому типу». Оползневые явления, по мнению исследователей, сопровождаются процессами «выдавливания и скольжения, а в русловой части – складками нагнетания» (Декларация безопасности, с. 69). Блоки массивов наклонены на левом борту по аз. 330–340° (падение плоскостей сместителей по аз. 150–160°, под углами 60–70°), а на правом по аз. 50–70° (падение плоско-стей сместителей 230–240° под углами 70–90°).

Ширина блоков изменяется: увеличивается в сторону водоразделов до первых км и уменьшается в сторону склонов долины до первых сотен метров и менее. В пределах блоков пласты характеризуются наклонным залеганием с падением под углами около 10° в стороны от осевой линии долины. Таким образом, над осевой зоной долины сформирована антиклинальная валообразная складка с пологими крыльями, осложненными сбросами (верхний динамический ярус) и сложно складчатым ядром представляющим собой комплекс складок нагнетания.

Характеристика рельефа и связь с ним геологической структуры

Связь геологической структуры с рельефом является путем дешифрирования дистанционных материалов, анализа рельефа и тектонического строения территории. Анализ тектонически обусловленных форм рельефа, позволяет реконструировать поля напряжений, существующие в верхней части земной коры, и тем самым получить дополнительный материал для разработки динамической модели территории.

Рассматриваемая территория в геоморфологическом отношении принадлежит к Виллюйскому плато, для которого характерно субгоризонтальное залегание пластов коренных пород. Дешифрирование космических снимков (Googl) позволяет

увидеть, что рассматриваемая территория осложнена локальными пологими структурными формами (рис. 2). Выделяются локальные антиклинальные изгибы деформированной поверхности нижнепалеозойских отложений, своды которых осложнены небольшими гребневидными складками, вероятно, представляющими собой складки нагнетания. В осях локальных и гребневидных антиклиналей, отмечаются разрывные нарушения конформные их осевым направлениям, протяженностью несколько сот метров. Распространены разрывные нарушения двух основных направлений – северо-восточного (аз. 60–70°) и северо-западного (аз. 290–300°). Кинематика их – сдвиги и сбросо-сдвиги. Амплитуда – первые десятки метров.

Вдоль прямолинейного отрезка долины р. Виллой, на котором расположено напорное сооружение, выделяются разрывы протяженностью до 500 м, скорее всего сбросы. Кроме того, в пределах территории распространены протяженные (первые километры) разнонаправленные разрывы предположительно сбросовой кинематики. Сгущение этих разрывов отмечается в периклиналях антиклиналей.

Примечательно, что осевые зоны локальных антиклиналей приурочены к пониженным формам рельефа и как правило, совпадают с долинами крупных рек. Мульды локальных пологих синклиналей приурочены к водоразделам. Таким образом, на территории развит обращенный рельеф. Ускоренная денудация на антиклиналях объясняется более интенсивным раздроблением пород. Крылья антиклиналей характеризуются развитием горизонтально ориентированных растягивающих напряжений, которые порождают сдвиги и сбросы. Формирование гребневидных складок связано с нагнетанием пластичных масс (ИГЭ126) из более глубоких горизонтов в присводовые части антиклиналей.

Можно, предположительно, на правом и левом борту долины р. Виллой выделить несколько оползней. В вершинах оползней отмечаются циркообразные уступы (вершины оползней). Длина оползней около 100 м, а мощность вовлеченных в смещение пород около 10 м.

Таким образом, дистанционные материалы подтверждает предлагаемую складчато-блоковую динамическую модель территории: отчетливо дешифрируются два динамических яруса толщи коренных пород, (слоя). Нижний динамический ярус, представленный породами нижней части изученного разреза образует пологие сводообразные структуры, которые осложнены мелкими гребневидными складками. Вдоль этих складок или радиально к ним располагаются сдвиговые и сбросовые разрывные нарушения. В верхнем ярусе преимущественное распространение имеет пологое наклонное залегание слоев, осложненные сдвигами и сбросами.

Геокриологическая характеристика района ГЭС

Криолитозона в пределах вскрытого разреза имеет *двухъярусное строение*. Верхний ярус совпадает с верхним динамическим ярусом представленной в

районе осадочной толщи. Этот ярус характеризуется массивной криогенной текстурой, а в местах развития разрывных нарушений трещинно-пластовой, трещинно-жильной, корковой и базальной.

Нижний ярус охватывает всю нижнюю часть изученного разреза (ИГЭ 126 и его динамические фации), а также ИГЭ 16а. Здесь широким распространением пользуются криопэги. Наличие их повышает пластичность пород и облегчает их способность к горизонтальным перемещениям и формированию складок. Визуальная льдистость до 5%, что значительно ниже льдистость пород верхнего яруса (до 50% в жилах по вертикальным трещинам и сбросам).

Таким образом, геокриологическая составляющая также стратифицирована. Верхний ярус криолитозоны характеризуется развитием преимущественно твердо-мерзлых грунтов, что способствуют здесь широкому распространению хрупких деформаций. Нижний ярус криолитозоны, в котором, наряду с мерзлыми грунтами, зафиксированы участки засоления и криопэги, характеризуется преобладанием пластично-мерзлых и даже маловязких низкотемпературных грунтов. Такие свойства грунтов способствуют широкому развитию в данном ярусе складчатых деформаций.

Мощность верхнего яруса криолитозоны изменяется в зависимости от геоморфологического положения. На пойме она составляет 30 м, у тылового шва первой надпойменной террасы – 80 м, под склонами – до 180 м. Температура многолетнемерзлых пород, на подошве слоя нулевых годовых колебаний, составляет: на левобережном склоне $-1 \div -3$ °С, на правобережном $-4 \div -7$ °С. Криогенная текстура грунтов – трещинно-пластовая, трещинно-жильная, корковая, массивная. Визуальная льдистость в массиве 5%.

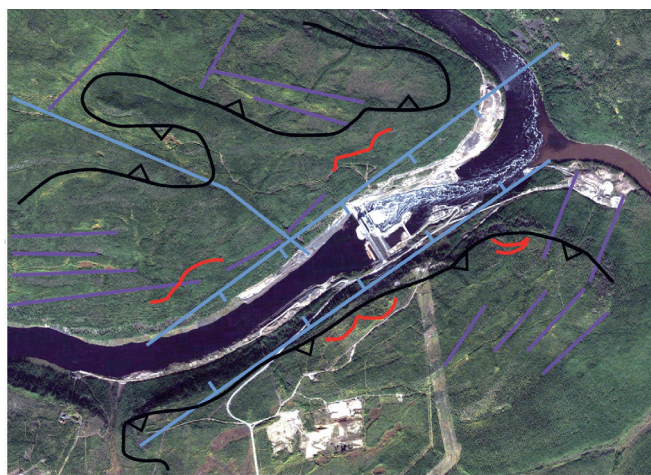


Рис. 2

Дешифрирование крупномасштабного космического снимка прилегающего к плотине.

- 1 – падение пластов на бортах локальных синклиналей,
- 2 – зоны разрывных нарушений (берг штрихи направлены в сторону падения смесителей),
- 3 – отдельные разрывные нарушения,
- 4 – предполагаемые оползни

Ниже залегают грунты нижнего яруса криолитозоны, насыщенные соленой водой (криопэгами). Граница между ярусами совпадает, примерно с границей верхоленской и илгинской свит. Криогенные текстуры грунтов – трещинно-пластовые и массивные. Визуальная льдистость до 5%.

Взаимодействие напорных сооружений с геологической средой в свете слоисто-блоковой модели

Плотина Вилуйской ГЭСИ занимает вполне определенное положение по отношению к системе напряжений, развивающихся в предлагаемой геодинамической модели (рис. 2). Плотина расположена на границе двух динамических ярусов, верхнего (ИГЭ12А), испытывающего растяжение и нижнего (ИГЭ126), испытывающего сжатие.

В верхнем ярусе тело плотины вдоль оси испытывает горизонтальное растяжение (σ_2), поскольку плотина жестко связана с верхним динамическим ярусом (ИГЭ 12 а) находящимся в состоянии растяжения (силы G) в связи с действием вертикальных сжимающих тектонических сил (M).

В нижнем тело плотины выталкивается пластичным слоем вверх (ИГЭ 126) и испытывает вертикальные сжимающие напряжения (σ_1^1). В связи с этим возникают дополнительные растягивающие напряжения вдоль продольной и поперечной осей плотины (σ_2^1, σ_3^1). Напряжения σ_2 и σ_2^1 могут взаимно усиливать друга, образуя положительную обратную связь.

Таким образом, положение плотины – на границе верхнего и нижнего динамических слоев геологической среды, обуславливает взаимное действие существующих напряжений и может вызвать деформации тела плотины. Можно предполагать, что эти деформации будут ориентированы поперек тела плотины и будут представлены трещинами растяжения. При неблагоприятном стечении обстоятельств эти деформации могут привести значительным утечкам из водохранилища и к разрушению тела плотины. Проведенные авторами каротажные и наземные электроразведочные исследования косвенно подтверждают ранее выдвинутую гипотезу.

Исходя из многолетней практики работ в пределах Мирнинского района геолого-разведочных и нефтепоисковых экспедиций для расчленения и корреляции разрезов терригенно-карбонатных, карбонатных отложений нижнего палеозоя наиболее эффективным является применение гамма каротажа. Это основано на выдержанности разреза карбонатной толщи по литологической однородности отдельных пластов, отсутствии резких фациальных переходов и, как следствие, повторении рисунка кривой гамма-каротажа (ГК) от скважины к скважине для одних и тех же пластов. Искажение рисунка ГК для определенного пласта указывает на наличие здесь разрывного нарушения либо на присутствие инородных пород.

По материалам каротажа построены схемы корреляции кривых ГК (рис. 4). Как показывают данные ГК в отложениях илгинской свиты (пласты 0,

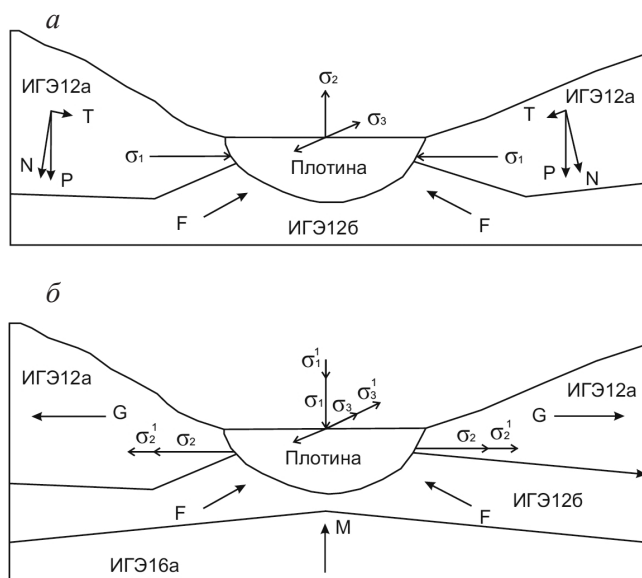


Рис. 3

Существующая (а) и предлагаемая (б) динамические модели района Вилуйской ГЭС-III.

А – оползневая модель. Действующие силы в сползающем блоке (ИГЭ-12а): Р – сила тяжести сползающего блока, N – сила прижимающая блок к поверхности скольжения, Т – сила, сдвигающая блок.

Действующие силы под поверхностью скольжения (ИГЭ126): F – силы давления пластических толщ.

Б – слоисто-блоковая модель.

М – тектонические силы поднятия территории;

Действующие силы в приповерхностном слое (ИГЭ-12а):

G – силы растяжения, связанные с увеличением размеров поверхности. Силы, действующие в пластическом слое (ИГЭ126):

F – силы давления пластических толщ. $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots$ и др. – напряжения в теле плотины (пояснения в тексте). ИГЭ-12а, ИГЭ126, ИГЭ 16а – инженерно-геологические элементы (пояснения в тексте)

1, 2, 3.4), документированной геологами как разрушенные породы, отмечаются блоки сохранных пород, где по рисунку ГК определяются пласты определенного номера. Чем большая мощность сохранных блоков илгинских отложений вскрывается скважиной, тем выше степень точности расчленения по данным гамма-каротажа. Определение номера пласта илгинских отложений осуществляется путем

сопоставления диаграммы ГК поисковой скважины с опорной скважиной (в данном случае – структурной скважиной 26). При отсутствии корреляции на определенном интервале диаграмма ГК перемещается вверх или вниз по разрезу опорной скважины и снова сопоставляется. Таким образом было проведено расчленение по всем скважинам участка и установлено различие в геологическом строении левого и правого берегов р. Вилуй (данный вывод не является бесспорным из-за ограниченного количества скважин, исследованных каротажом). Во многих скважинах левого берега наблюдается перепад мощностей пластов илгинских отложений, что совершенно не характерно для этой толщи в районе. Часто вскрывается не весь пласт, а только его часть, причем в близлежащей скважине видна недостающая половина. В некоторых скважинах нарушается порядок чередования пластов, например на «0» пласте залегает «2» или «3» пласт.

Все это указывает, очевидно, на наличие здесь блоковой тектоники как следствия оползневых процессов. Вероятно, ослабленным зонам (участкам сгущения трещин), развивались и оползневые процессы. Причем скольжение блоков происходит по плоскостям скольжения, где отсутствуют зоны низких значений радиоактивности. Геологами отмечаются различные углы падения трещин в керне одной скважины – от 20 до 80 градусов, что также согласуется с блоковой теорией: разные блоки располагаются под разными углами относительно друг друга. В толще отложений верхоленской свиты, как правило, угол напластования составляет 10–20° градусов, что указывает на почти горизонтальное залегание.

На рисунке 5, с помощью полученной для этого участка по каротажу скважинной схемы корреляции пластов горных пород, выявлены субвертикальные линии смещения пластов относительно друг друга. Это предположение подтверждается близким по характеру строением геоэлектрического разреза рядом расположенного на левобережном склоне электро-разведочного профиля параллельного оси плотины представленного на рисунке 5.

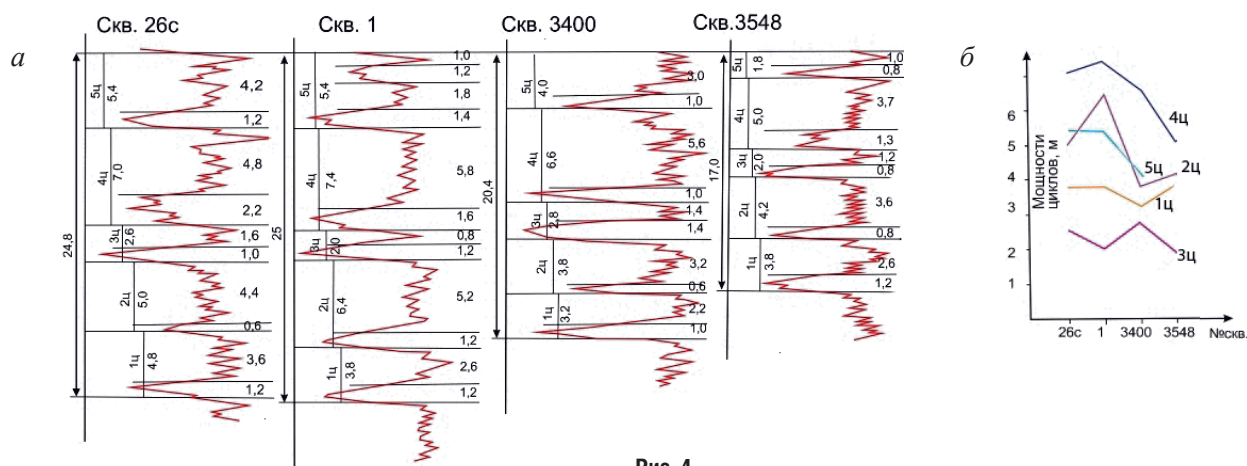


Рис. 4

Пример составления корреляционных схем:

а – расчленения пласта на единичные циклы относительно опорной структурной скважины для изучаемого района;
б – распределение мощностей единичных циклов внутри «1» пласта ϵ_{II} на участке ВГЭС-3

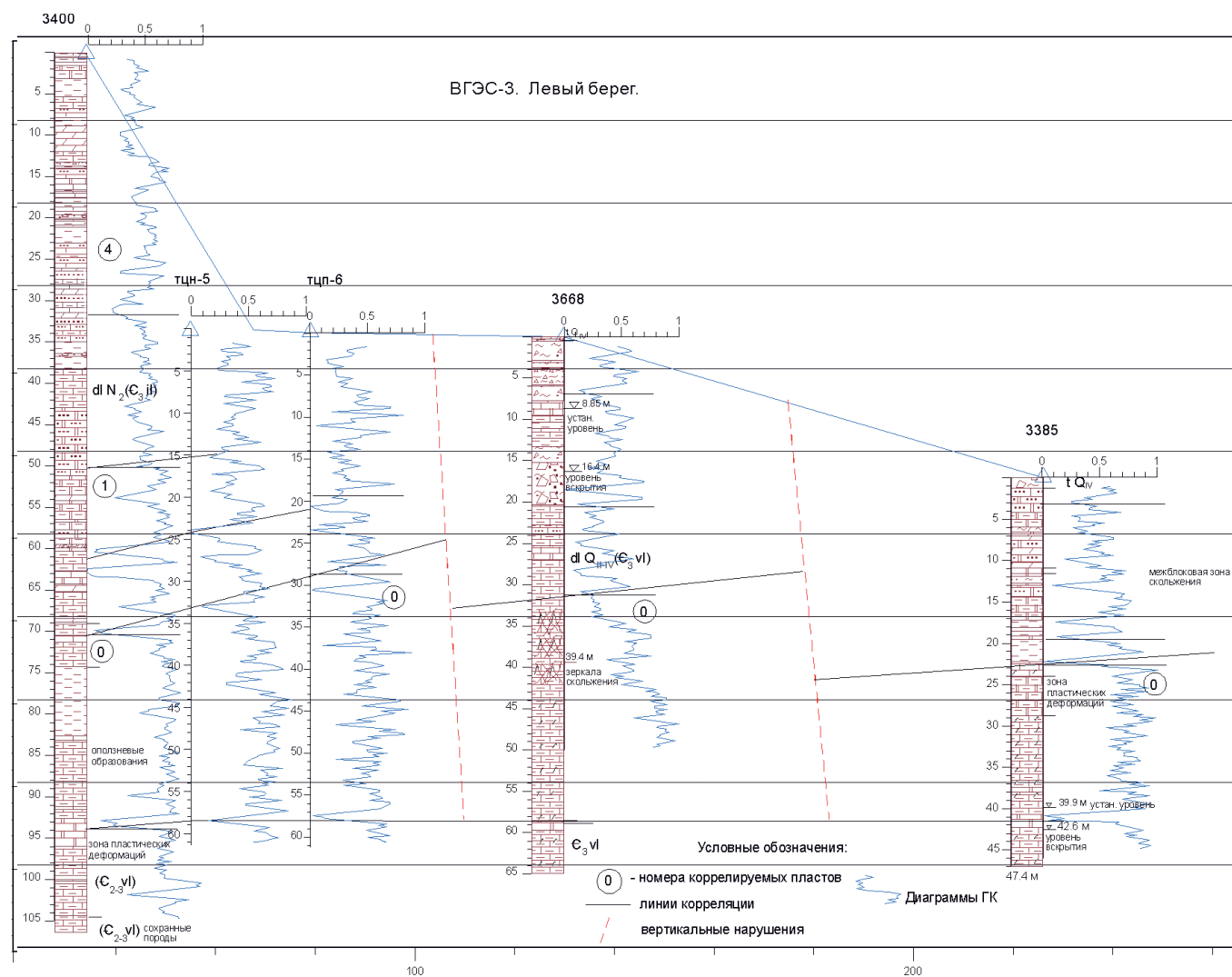


Рис. 5
Геолого-геофизический разрез левобережного примыкания по оси плотины по данным каротажных исследований

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Построенная новая геодинамическая модель района показывает, что на напорное сооружение действуют растягивающие усилия, которые могут привести к потере его прочности. По сравнению с существующей оползневой геодинамической моделью, данная модель указывает на значительно большие напряжения, развивающиеся по наиболее опасным направлениям в теле плотины. На данном этапе актуально проследить известные местоположения и направления участков фильтрации в теле плотины в свете изложенной двуслойной динамической модели.

Резюмируя вышеприведенные сведения и доводы можно сказать, что деформированные породы на склонах долины р. Виллой, примыкающие к напорному сооружению, представляют собой аномальное явление, которое требует геологического и физического объяснения и прогноза. Без этого возникает большой риск неожиданного проявления активных деформационных процессов, которые могут представлять опасность для инженерных сооружений. Это обстоятельство заставляет сосредоточить внимание на поиске причин, вызвавших установленные деформации. В результате исследования, в идеале, должна быть построена непротиворечивая геодина-

мическая модель района сооружения, на базе которой могут быть разработаны мероприятия, обеспечивающие надежную безопасность сооружений.

Предложения по мониторингу. Прежде всего, необходимо уделить внимание вертикальным деформациям на поверхности и в теле плотины. Кроме того, рекомендуется увеличить частоту датчиков на уровне 140–150 н.у.м., к которым приурочена поверхность, разделяющая нижний и верхний ярусы. На этой поверхности необходимо выявить устойчивые зоны проницаемости, по которым высокоминерализованные растворы под давлением могут проникать из нижнего геодинамического яруса в верхний. Необходимо также установить участки наиболее активных горизонтальных смещений в основании, которые могут представлять опасность для опорных сооружений плотины. Предшествующие исследования основания плотины концентрировали внимание на оползневых процессах и, проницаемых и засоленных участках основания плотины в рамках одноярусной геодинамической модели (Декларация безопасности, 2004; Отчет по договору №4-535/НИ, 2004). Круг ведущихся наблюдений следует расширить. В частности провести каротаж всех действующих скважин, уточнить блоковое строение участка,

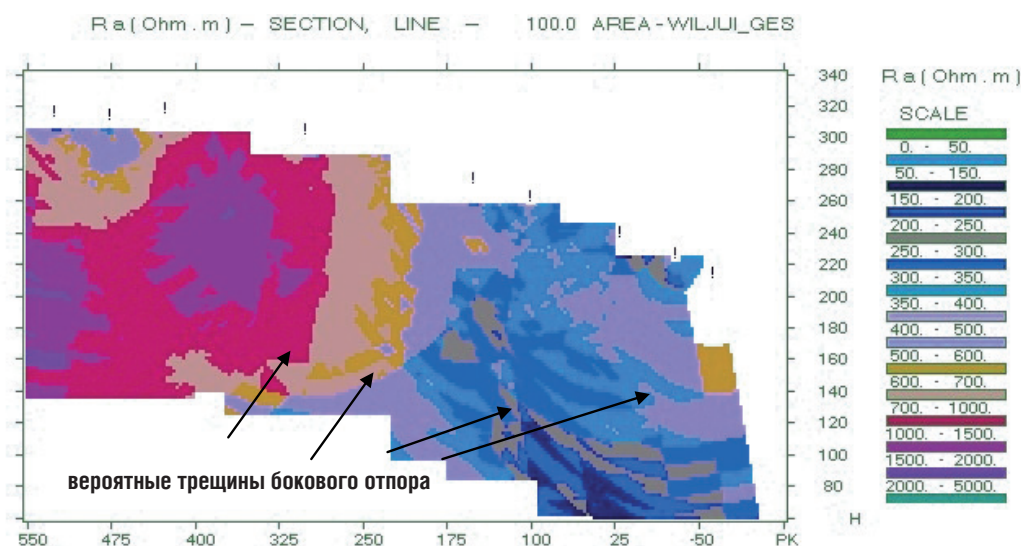


Рис. 6

ГЭС-3 Результаты электрозондирования методом удаленной точки по левобережному примыканию (склону вдоль оси плотины)

используя наработанные схемы корреляции и выявить зоны засоленных и водонасыщенных пород с помощью геоэлектротомографии. В дальнейшем целесообразно усилить систему мониторинга, установив датчики внутримассивных смещений (высоко-

точные акселерометры) в области предполагаемой границы двух динамических ярусов и отслеживать положение талых и засоленных интервалов с помощью наземной геоэлектротомографии и резистивиметрии по пьезометрическим скважинам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Геологическая карта Якутии. Ботубинский блок. Масштаб 1:500000. Якутск, 1992.
2. Долгих Г.М., Окунев С.Н., Скорбилин Н.А. Стабилизация мерзлых пород // Гидротехника. 2018. № 4.
3. Ломтадзе В.Д. Инженерная геология. Инженерная геодинамика. Л.: Недра, 1977. 479 с.
4. Мельников В.П. Криогенные геосистемы: проблемы исследования и моделирования. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2010. 390 с.
5. Ярошевский В. Тектоника разрывов и складок. М.: Недра, 1981. 245 с.
6. Декларация безопасности гидротехнических сооружений Вилуйской ГЭС-3 ОАО «Вилуйская ГЭС-3». Чернышевский, 2004.

REFERENCES

1. The Geological Map of Yakutia. Botuoba Block. 1:500,000 scale. Yakutsk, 1992.
2. Dolgikh GM, Okunev SN, Skorbilin NA. Stabilization of frozen ground. Gidrotekhnika. 2018. № 4.
3. Lomtadze VD. Engineering Geology. Engineering Geodynamics. Leningrad: Nedra, 1977. 479 pp.
4. Melnikov VP. Cryogenic Geosystems: Research and Modeling Problems. Novosibirsk: Academic Publishing House «Geo», 2010. 390 pp.
5. Yaroshevskii V. Fault and Fold Tectonics. Moscow: Nedra, 1981. 245 pp.
6. Safety Declaration of the Vilyuy HPS-3 Hydraulic Facilities. OAO «Vilyuyskaya GES-3». Chernyshevsky, 2004.

Положительная рецензия

ОБ АВТОРАХ



ВЕЛИКИН
Сергей Александрович

Окончил Московский геологоразведочный институт им. Серго Орджоникидзе, 1975 г., нач. Вилуйской научно-исследовательской станции института Мерзлотоведения СО РАН к.т.н., заслуженный деятель науки Республики Саха(Якутия), Сфера интересов: инженерная геофизика, мерзлотоведение, экология. автор и соавтор более 75 научных публикаций.



СПЕКТОР
Владимир Борисович

Окончил Московский институт нефтехимической и газовой промышленности им. И.М. Губкина (1959), доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, заслуженный деятель науки Республики Саха(Якутия). Сфера интересов: геология, тектоника, стратиграфия, геоморфология, геодинамика; геофизиология. Автор и соавтор более 100 научных публикаций.