

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Мирзоджонов Солим Саидназарович

**Анализ и оценка инженерно-геологических процессов трассы
автомобильной дороги Рушан-Хорог**

Выпускная квалификационная работа магистра

Магистерская диссертация

«К ЗАЩИТЕ»

Научный руководитель:

к.т.н. Кудашов Е.С.

Заведующий кафедрой:

к.г.-м.н. Бурлуцкий С.Б.

Рецензент:

к.т.н. Павловская С.С.

Санкт-Петербург
2024

Содержание

Введение	3
ГЛАВА 1. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ОЧЕРК РУШАНСКОГО РАЙОНА.....	4
1.1. Географическое положение и рельеф	4
1.2. Климат	5
2. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РУШАНСКОГО РАЙОНА.....	8
2.1. Стратиграфия.....	8
2.2. Тектонические условия Рушанского района	12
2.3. Гидрогеологические условия Рушанского района.....	14
2.4. Геоморфологические условия Рушанского района	16
2.5. Современные геологические процессы на участке строительства трассы автомобильной дороги Рушан - Хорог.....	19
ГЛАВА 3. МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ И РАЙОНИРОВАНИЯ УЧАСТКОВ РАЗЛИЧНОЙ СЛОЖНОСТИ.....	24
3.1. Принцип районирования участков различной сложности	24
3.2. Количественная оценка устойчивости склонов	26
3.3. Качественная оценка потенциально-опасных участков.....	31
4. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ.....	36
Глава 4.1. Районирование трассы автодороги Рушан-Хорог по сложности инженерно-геологических условий	36
4.2. Количественная оценка устойчивости склона Шипад	43
4.3. Качественная оценка устойчивости потенциально-опасных участков.....	49
Заключение	52
Список литературы.....	54

Введение

Автомобильные дороги Памира относятся к числу сложнейших трасс мира. Сложные природные условия, особенно геоморфология Памира, большой объем инженерных сооружений требуют индивидуальных проектов строительства земляного полотна. Земляное полотно может подвергаться воздействию разнообразных как эндогенных (сейсмических), экзогенных геологических процессов: эрозионному размыву, разрушению оползнями, обвалами, осыпями, селями. Учитывая все эти факторы, изучение опасных геологических и инженерно-геологических процессов с целью смягчения последствий или предотвращения разрушения дорожного полотна посредством принятия необходимых защитных мер и разработки соответствующих рекомендаций для изученной территории являются весьма актуальными в Республике Таджикистан.

Трасса Душанбе-Хорог была построена во времена СССР и является одной из ключевых магистралей, соединяющих столицу Таджикистана, Душанбе, с городом Хорог, расположенным в Горном Бадахшане на границе с Афганистаном. Со времён Советского Союза значительных ремонтных работ на дороге не проводилось. Это привело к тому, что в течение десятилетий она подвергалась естественному износу, а также воздействию природных явлений, таких как лавины, обвалы и дожди, что сделало её состояние крайне плохим и непригодным для безопасного движения.

Цель написания магистерской работы – изучение инженерно-геологических процессов трассы реконструируемой автомобильной дороги Рушан-Хорог в Горно-Бадахшанской автономной области и характеристика восьми участков дороги по сложности условий.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Подробное описание геологического строения, тектоники, гидрогеологических условий, геоморфологических условий, современных опасных геологических процессов и характеристика сложности инженерно-геологических условий трассы автодороги Рушан-Хорог.
2. Оценка рисков возникновения инженерно-геологических процессов вдоль трассы.
3. Анализ инженерно-геологических процессов трассы автодороги Рушан-Хорог.
4. Районирование участков трассы автодороги Рушан-Хорог по сложности инженерно-геологических условий (по СП 47.13330.2016 Приложение Г (“Категории сложности инженерно-геологических условий”)).

ГЛАВА 1. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ОЧЕРК РУШАНСКОГО РАЙОНА

1.1. Географическое положение и рельеф

Памир представляет собой типичную горную местность, где наблюдаются разнообразные и значительные явления современных экзогенных геологических процессов, часто имеющих катастрофический и опасный характер. Рушан является административным районом, расположенным в юго-западной части Памира. Он граничит с Ванджским районом на северо-западе, Мургабским районом на северо-востоке, Шугнанским районом Таджикистана на юго-востоке и Шугнанским районом Афганистана на юге.

Территория Рушанского района расположена в горах и долинах юго-западного Памира, Горно-Бадахшанской автономной области (рис. 1). С юга её граница проходит вдоль реки Пяндж, которая служит государственной границей с Афганистаном. Река Бартанг, правый приток Пянджа, играет важную роль в гидросистеме района, течёт с севера на юг, образуя широкую и глубокую долину, по которой пролегает трасса Рушан-Хорог. Эта область характеризуется повышенной сейсмической активностью. Часть территории района включает в себя часть бассейна Сарезкого озера, образовавшегося в результате землетрясения в 1911 году. Представленный участок Памира отличается сложной географической структурой, значительными различиями высот некоторых горных хребтов над долинами рек (до 3000-4000 м), а также протяженными хребтами с острыми вершинами и каньоноподобными ущельями (Хушнуд Назришоев, 2011).



Рис.1. Горно-Бадахшанская автономная область (ГБАО), Республики Таджикистан.
Красной линией отмечен Рушанский район (Хушнуд Назришоев, 2011).

1.2. Климат

Долины рек, пересекающие Памир с востока на запад, оказали значительное влияние на формирование уникальных климатических характеристик Западного Памира. Горный рельеф играет ключевую роль в формировании климатических условий на исследуемой территории.

Характерными чертами климата этого района являются: продолжительность солнечной радиации и интенсивность солнечной радиации; большие суточные и сезонные колебания температур; сухость воздуха; малая облачность и количество атмосферных осадков.

Общий климат исследуемой территории можно охарактеризовать как континентальный, однако микроклимат в районе разнообразен и зависит от высотной зональности. Продолжительность лета составляет 120-140 дней со средней температурой июля около $+23^{\circ}\text{C}$, а зимы длительность – 110-120 дней, с январскими температурами от -5°C до -14°C .

Характерными являются большие амплитуды колебаний температуры как внутри суток, так и в течение года. Эти колебания особенно выражены в горных долинах, замкнутых котловинах и на высоких плато, окруженных хребтами. На высоте 1000-1500 м июльские температуры могут достигать $+30^{\circ}\text{C}$, в то время как зимой они могут опускаться ниже 0°C . На высоте до 4500 м средняя температура в июле составляет около $+10^{\circ}\text{C}$, и зима на этой высоте продолжительная и холодная. Резкие перепады температур способствуют интенсивному развитию процессов физического выветривания.

Осадки на исследуемой территории распределены неравномерно как по времени, так и по пространству. Основными факторами, влияющими на распределение осадков, являются абсолютная высота и экспозиция склонов хребтов относительно влажных воздушных масс. Наибольшее количество осадков выпадает на склонах хребтов, обращенных к влажным западным воздушным массам. Преобладающие суммы осадков на хребтах составляют от 800 до 1500 мм в год, а наиболее высокие места могут получать от 2000 до 2500 мм осадков. Внутренние районы получают значительно меньше осадков в год, обычно от 70 до 120 мм.

Движение влажных воздушных масс в верхних слоях атмосферы способствует образованию снега и ледников в высокогорьях. Доля твердых осадков до высоты 2000 м составляет менее половины от общего количества осадков, на высотах 3000 м она

составляет около 70%, а на высотах свыше 4250 м – 100%. Эти различия в осадках оказывают влияние на положение снеговой границы и на объем современных ледников на территории, общая площадь которых превышает 7500 км² (Хушнуд Назришоев, 2011).

1.3. Гидрография

Река Пяндж является основной водной артерией региона, берущей начало от слияния рек Памир и Вахандарья. Ее длина с момента слияния с рекой Памир составляет 1038 км. Площадь водосбора до гидропоста Шидз составляет 57100 кв. км. Среднегодовой расход воды составляет 438 м³/с. Многолетние амплитуды колебаний уровня воды в реке Пяндж варьируются от 165 см (наименьшая) до 221 см (наибольшая), со средней амплитудой в 185,5 см (данные с гидропоста Рушан, Ватар).

По химическому составу вода в реке варьирует от сульфатно-гидрокарбонатной магниевой-кальциевой со значением минерализации от 140 до 260 мг/дм³ в период половодья до 230-300 мг/дм³ в период межени. В период межени вода становится сульфатно-гидрокарбонатной кальциевой. Жесткость воды соответственно изменяется от 1,7 до 3,2 до 2,6-3,5 моль/м³.

Развитию сильно разветвленной гидрографической сети (рис.2) способствует большая площадь современного оледенения на хребтах. Важную роль в распределении ледников и снежников играет экспозиция склонов. Ледники и снежники с северной экспозицией обычно имеют более крупные размеры, чем те, что расположены на склонах с южной экспозицией.

Ледники и снежники, будучи основным источником питания рек, сильно влияют на их расход. Расход воды в реке Пяндж может достигать значений от 100 м³/с до 1960 м³/с. Уровень воды в реках весьма изменчив не только в течение года, но и в течение суток. Наибольшие уровни приходятся на паводковый период, обычно в июле. В это время реки выходят из берегов, затапливают пойменные участки, разрушают мосты, тропы и пешеходные переходы. В осенне-зимний период расход воды в реках резко уменьшается, а мелкие речки и часть нисходящих родников пересыхают (Кашф, 2019).

Уровень воды в реке Пяндж варьирует в течение года с амплитудой колебаний от 165 до 221 см (данные с гидропоста Рушан). Наивысший уровень обычно наблюдается в конце июля - начале августа, а наименьший - в конце февраля - начале марта (Кашф, 2019).

2. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РУШАНСКОГО РАЙОНА

2.1. Стратиграфия

Исследуемый район в основном состоит из интрузивных образований мел-палеогенового возраста Роушарвского массива, а также небольших выходов метаморфических пород верхнего протерозоя. Метаморфические породы пронизаны гранитоидами Роушарвского массива и разделены на барнаваджскую и джамакскую свиты верхнего протерозоя.

Барнаваджская свита (RR3?br) представлена кварцитами, кристаллическими сланцами с некоторыми горизонтами мрамора. В этой свите широко встречаются биотит-роговообманковые, кварц-пироксен-роговообманковые и эпидот-пироксеновые гнейсы. Все участки свиты пронизаны гранитами, гнейсо-гранитами и аплитовидными гранитами, что привело к интенсивному контактному метаморфизму в окружающих породах.

Джамакская свита (RR3?dž) представлена массивными кварцитовидными песчаниками различных оттенков серого, темно-серого, белого и розоватого цвета, а также различными сланцами. Метаморфизированные песчаники и кварциты этой свиты состоят главным образом из кварца и полевых шпатов с небольшим количеством слюды, а также кальцита и рудных минералов. Среди сланцев выделяются кварц-сланцевые, биотит-кварцевые и хлорит-кварцевые разновидности. В области экзоконтактов с интрузивами породы джамакской свиты подвергаются сильному метаморфизму и превращаются в биотитовые и андалузитовые сланцы и гнейсы.

Метаморфические породы протерозойского возраста выходят на поверхность в верховьях реки Роушарвдара и Шидздара, за пределами исследуемого района, образуя сложную антиклинальную структуру. В пределах данной площади эти породы имеют сложные взаимоотношения с магматическими образованиями.

Наиболее значительное место в геологических разрезах исследуемой площади занимают черные биотитовые сланцы и серые слюдяные гнейсы. Распределение обеих пород обычно не имеет определенной закономерности. Вблизи магматических пород биотитовые сланцы встречаются в слюдяных гнейсах в виде редких небольших пачек, в то время как на удалении от интрузивных тел слюдяные гнейсы становятся преобладающими над биотитовыми сланцами. Темные биотитовые сланцы обнажаются в верховьях рек Вознавдара и Шидздара, а затем образуют главный водораздел между долинами рек Роушарвдара и Пяндж, простираясь далеко за пределы исследуемого района.

Из-за интенсивного метаморфизма различить породы по литологическим признакам становится затруднительно, поэтому на геологических картах они представлены одним цветом (рис.3) (Буданов, 1976).

Отложения четвертичного периода в исследуемом районе имеют ограниченное распространение и встречаются в основном в речных долинах и сухих мелких оврагах. Они представлены разнообразными рыхлыми образованиями и делятся на следующие группы в зависимости от условий образования:

- ✓ Отложения древних обвалов;
- ✓ Коллювиальные отложения;
- ✓ Делювиальные отложения;
- ✓ Пролювиально-делювиальные отложения;
- ✓ Пролювиальные отложения;
- ✓ Аллювиальные отложения.

Каждая из этих групп имеет свои характеристики и формируется в результате различных процессов, связанных с динамикой речных систем и изменениями в окружающей среде в четвертичный период.

Отложения древних обвалов (dQIII) в районе террасированных рек Пяндж вниз по течению от селения Шидз характеризуются значительной мощностью, превышающей 200 метров. Они состоят из глыб и крупных обломков различных пород, таких как граниты, ортогнейсы и кристаллические сланцы. Заполнители включают в себя щебень, галечник, гравий и песок. Некоторые глыбы имеют огромные размеры, достигая многих десятков и даже сотен кубометров.

Коллювиальные образования (cQIV) на территории исследуемой площади встречаются редко. Они обычно обнаруживаются на склонах близ выходов коренных пород. Эти образования обычно представляют собой результат разрушения коренных пород на месте под воздействием физико-механических процессов. В составе коллювиальных образований могут содержаться глыбы, неокатанные обломки гранитов, гранито-гнейсов и сланцев различного размера.

Делювиальные образования (dQIV) представлены небольшими островками, которые располагаются на пологих участках крутых склонов и вдоль берегов реки Пяндж. Эти образования в основном состоят из глинисто-щебнистых материалов, часто покрытых тонким растительным слоем. Иногда встречаются также глыбы.

Пролювиально-делювиальные отложения (d-pQIV) развиты в виде конусов выноса. Образовались они в результате разрушения коренных пород под воздействием физико-механических процессов. Отложения представлены слабо и не окатанными обломками горных пород, имеющими разнообразный петрографический состав. Заполнителями

являются щебень, супесь, гравий, дресва, песок, галечники. Мощность конусов выноса до нескольких метров.

Проллювиальные отложения (pQIV) представляют собой конусы выноса, образованные процессами сноса водных потоков. Они обычно развиваются в сухих русловинах и временных речных притоках. Эти отложения состоят из неокатанных или полукатанных обломков гранитов, ортогнейсов и сланцев различного размера. Между обломками связывающими материалами служат щебень, супесь, песок и гравий.

Аллювиальные отложения (aQIV) имеют наибольшее развитие в долине реки Пяндж. На участке между селениями Шидз и Калот они представлены материалом, состоящим из валунов, щебня, песка и глины. Этот материал формирует многочисленные островки и береговые отмели в широкой пойме реки. В нижнем течении реки Пяндж, ниже селения Шидз, аллювий состоит из хорошо окатанных валунов и галечников, которые образуют узкую прирусловую часть глубоких эрозионных ущелий. Мощность этих наносов незначительна (Кашф, 2019).

Интрузивные образования

На территории проектируемой площади выделяются две фазы-комплекса Роушарвского массива палеогенового возраста:

- Фаза лейкократовых гранитов, гранодиоритов и гнейсо-гранитов (γ_1 (К-Р));
- Фаза аплитовидных гранитов и гнейсо-гранитов (γ - $\gamma\delta$ (К-Р)).

Лейкократовые граниты, гранодиориты и гнейсо-граниты Роушарвского массива состоят главным образом из плагиоклазов (25-50%), калиевого полевого шпата (до 10%), кварца (20-30%), биотита (1-15%), амфибола (до 7%). Среди акцессорных минералов встречаются апатит, циркон, сфен, ортит, а среди вторичных минералов - эпидот, цюзит, серицит, хлорит и карбонаты. Жильные образования, включая жилы аплита, пегматита и кварца, пространственно связаны с этим комплексом гранитоидов. Большинство из них находится в самих гранитах, а в меньшей степени - в их экзоконтакте.

Аплитовидные граниты и гнейсо-граниты с редкими порфиroidными вкрапленниками, образующие отдельные самостоятельные участки довольно значительных размеров в породах Роушарвского массива, в основном, по составу мало отличаются от гранитоидов описанного ранее комплекса. Их состав включает плагиоклаз (45-60%), калиевый полевой шпат (10-15%), кварц (20-45%), биотит (1-10%). Среди акцессорных минералов встречаются роговая обманка, ортит, сфен, апатит, циркон, а среди вторичных - серицит, мусковит, хлорит и карбонат. Контакты с гранитоидными

2.2. Тектонические условия Рушанского района

Рушанская подзона находится в бассейнах левых притоков р. Бартанг – в юго-западной части территории листа между Рушанско-Пшартским и Штамскими разломами. В результате слияния этих разломов данная подзона выклинивается. Она сложена карбонатно-терригенными, в меньшей степени вулканогенными, образованиями раумидской, шувдаринской, бардаринской и мезанчудской свит, образующими один каменноугольный(?) – триасовый(?) структурный ярус. Складки и разрывы здесь устанавливаются с трудом из-за значительного однообразия пород. Спортивной является трактовка общей структуры Рушанской подзоны: по Б.П. Бархатову (1963) она является антиклинорной, по данным авторов и В.И. Дронова (1963) – синклинорной. Наиболее заметной среди складок второго порядка является Рушанская синклиналь, сильно усложненная, в свою очередь, мелкими складками и разрывными нарушениями. Данная структура представлена лишь северо-западным своим крылом: юго-восточное крыло ее срезано Штамским разломом, ввиду чего создается впечатление общего моноклиального падения пород в юго-восточном направлении. Ядро складки сложена мазанчудской свитой, на северо-западном крыле обнажаются последовательно более древние раумидская и шувдаринская свиты. В западной части синклинали породы имеют пологое юго-восточное падение под углом около $20-30^\circ$, на востоке – они становятся более крутыми и падают под углом порядка $50-70^\circ$.

Разрывные нарушения в пределах Рушанской подзоны сравнительно ограниченно распространены и представлены, в большинстве случаев, сбросами и взбросами, последние местами переходят надвиги. Простираются их северо-восточное и широтное с падением на юг и юго-восток под различными углами. Штамский разлом ограничивающий подзону с юга-востока, представляет собою взброс с крутыми ($70-80^\circ$) падением на юго-восток.

Возраст тектонических структур Рушанской подзоны неясен. По-видимому, он является доюрским (аналогично возрасту структур других подзон Юго-Восточного Памира, сложенных каменноугольными – триасовыми образованиями), но не исключено, что структуры Рушанской подзоны были усложнены при проявлении более молодых движений (Туляганов и Ходжибаева, 1978).

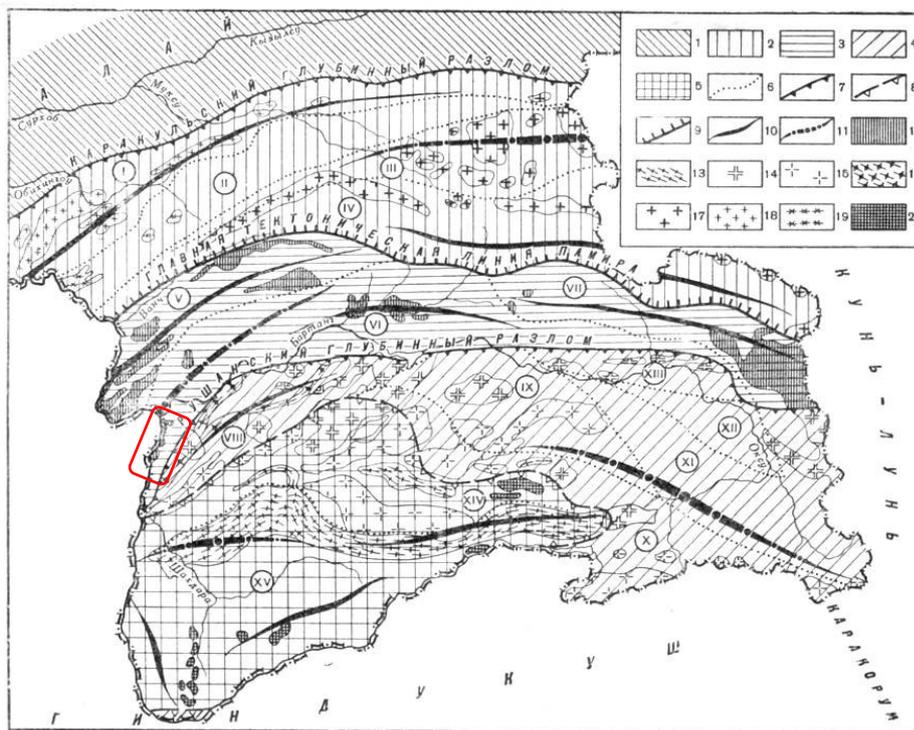


Рис.4. Тектоническая схема Горно-Бадахшанской автономной области. Красным прямоугольником показан район исследования (по Б.П. Бархатову) (Геология СССР, Серия Памирская, 1970).

1 - Памиро-Кунь-Луньский передовой прогиб; 2- зона Северного Памира с подзонами: I - Калай-Хумб-Сауксайской, II - Курговатской, III - Каракульской, IV - Дарваз-Сарыкольской; 3- зона Центрального Памира с подзонами: V - Ванч-Язгулемской; VI - Сарезско-Пшартской; VII - Музкол-Рангульской; 4 - зона Юго-Восточного Памира с подзонами: VIII - Рушанской; IX - Базардаринской; X - Гурумдинской; XI - Истыкской; XII - Тохтамышской; XIII - Пшартской и Мургабской; 5 - зона Юго-Западного Памира с подзонами: XIV - Гунтской и XV - Ваханской; 6 - границы подзон; 7 - границы зон; 8 - условная граница зоны Юго-Западного Памира; 9 - граница сооружений Кунь-Луны и Каракорума; 10 - антиклинали; 11 - синклинали. Гранитоиды: 12 - К2 - Р; 13 - I3 - К1 (памирско-шугнганский тип); 14 - I3 - К1 (башгумбезский тип); 15 - I3- К1 (аличурский тип); 16 - II?; 17 - P2 - Т; 18 - C2; 19 - Pr2?; 20 - αС(?).

2.3. Гидрогеологические условия Рушанского района

Большинство источников подземных вод, расположенных на описываемой территории, питается за счет таяния снежников и ледников. Вместе с тем широкое развитие водонепроницаемых пород и большая крутизна склонов долин значительно затрудняют накопление подземных вод. Сравнительно небольшое количество осадков (в среднем 200-300 мм в год), сильная расчлененность рельефа, широкое распространение коренных пород, обладающих слабой влагоемкостью и местами почти полностью водонепроницаемостью, и некоторые другие природные особенности района, значительно сильно сокращают возможности широкого развития подземных вод, которые могут концентрироваться лишь на участках повышенной трещиноватости в коренных породах и в рыхлых отложениях, обычно глубоко дренирующихся поверхностными водотоками.

Условия питания подземных вод в пределах описываемой территории ещё недостаточно изучены, однако уже сейчас можно сказать, что основная роль здесь принадлежит инфильтрации атмосферных осадков, причем гораздо большее значение имеют осадки, выпадающие в твердом состоянии, так как дождевые воды из-за большой крутизны склонов долин и горных хребтов быстро уносятся в реки, а воды, образующиеся при таянии снега, фирна и льда, постепенно просачиваются в подстилающие их породы, пополняя запасы подземных вод в течение достаточно долгого промежутка времени, определяемого количеством и интенсивностью таяния снегов. Следовательно, в пределах описываемой территории нельзя ожидать накопления значительных постоянных запасов подземных вод. По условиям залегания и циркуляции в районе выделяются два типа подземных вод: трещинные (воды пород дочетвертичного возраста) и поровые грунтовые (воды рыхлых четвертичных отложений).

Источники трещинного типа встречены главным образом - на реке Бартанг и в бассейнах Сарезкого озера. Химический состав воды определен как гидрокарбонатно-сульфатным-кальциево-магниевым, реже – к гидрокарбонатно-сульфатным магниевым.

Для большинства дочетвертичных пород района характерно проявление трещиноватости, развивающийся хотя и не повсеместно, но достаточно широко для того, чтобы обеспечить относительно быструю инфильтрацию атмосферных осадков и пополнить запасы подземных вод, непрерывно истощающиеся из-за дренирующего характера склонов. По дебиту последних можно судить о водообильности тех или иных пород. Меньше всего подземных вод содержится в трещинах изверженных пород, глубоко метаморфизованных песчаников и кварцитов – расходы вытекающих из них источников не превышают 0,5-0,6 л/сек, а обычно гораздо ниже. Весьма пёстрыми по водообильности

являются широко распространенные на площади листа различные метаморфические сланцы. Родники которых обладают дебитом, изменяющимся в пределах от 0,4-0,8 до 8-12 л/сек. Наиболее трещиноватыми, являются известняки и другие карбонатные породы района, обладающие наибольшими запасами подземных вод. Приуроченные к ним источники характеризуются повышенным средним дебитом, достигающим 4-5 л/сек. Родники, вытекающие на поверхность из зон тектонических нарушений, отличаются обычно повышенными расходами, а сами зоны в силу своей интенсивной трещиноватости обладают значительными запасами подземных вод.

Поровые грунтовые воды приурочены к мощным конусам выносов, осыпям, ледниковым и речным отложениям. Запасы вод них большей в большей степени зависят от гранулометрического состава и условий залегания рыхлых отложений. Чем глубже дренируются современными водотоками, тем быстрее иссякают запасы вод. Аллювиальные отложения речных долин и их крупных притоков являются прекрасными коллекторами подземных вод, однако запасы их быстро иссякают, так как эти отложения, как правило, глубоко дренируются современными водотоками. В исследуемой территории и в некоторых других местах от нашей трассы подземные воды в аллювиальных отложениях фиксируются по наличию заболоченных участков пойм. Поверхностные водотоки местами полностью в них скрываются, а затем выходят на поверхность в виде мощных источников с дебитом, достигающим 40 л/сек и более. Такие источники встречаются и в других местах. Обычно дебит родников, приуроченных к аллювиальными отложениям, не превышает 10-12 л/сек.

Проллювиально-делювиальные отложения склонов горных хребтов, несмотря на свою хорошую водопроницаемость, обладают весьма небольшими запасами подземных вод, так как из-за большого угла наклона основания (обычно это массивные коренные породы) для них характерен повышенный сток и быстрая отдача накопившихся водных ресурсов. Невелики запасы подземных вод и в толщах ледниковых отложений. Объясняется этот факт тем, что флювиогляциальные и моренные образования в силу специфичности условий залегания и повышенной пористости быстро отдают просачивающиеся в них талые ледниковые воды и являются не аккумуляторами, а лишь проводниками подземных вод на пути из области питания у конца ледников до выхода на поверхность в области разгрузки в различных по размерам источников с дебитами от единиц до нескольких десятков литров в секунду.

подавляющее большинство источников на описываемой территории имеют воду хорошего качества, вполне пригодную для питья. При близости их к населённым пунктам

иногда они используются местными жителями. Но большинстве случаев источником бытового водоснабжения являются поверхностные воды (Туляганов и Ходжибаева, 1978).

2.4. Геоморфологические условия Рушанского района

Геоморфология имеет большое значение для дорожного строительства и для целого ряда других вопросов. Условия дорожного строительства на Памире исключительно трудны и своеобразны. Для исследуемой территории тип рельефа характерны островершинные хребты и глубоко врезуемые крутосклонные и вместе с тем террасированные долины. Переход от одного типа рельефа к другому происходит постепенно в полосе. Долины исследуемой территории располагаются на западно-памирской части, этот тип рельефа моложе долин восточно-памирского типа и врезуемы в последние, причем врезувание это происходило постепенно в направлении с запада на восток. Продолжается оно и в настоящее время.

На рассматриваемой территории развит денудационный и аккумулятивный рельеф. К первому из них относятся элементы, обязанные своим происхождением плоскостной денудации, глубинной эрозии, экзарации; ко второму – моренный, аллювиальный, коллювиальный-делювиальный, пролювиальный и гравитационный рельеф (Туляганов и Ходжибаева, 1978).

Денудационный рельеф

Собственно денудационный рельеф представлен фрагментами денудационных поверхностей, наблюдающихся в самых высоких водораздельных частях хребтов и являющихся, по их геоморфологическому положению, наиболее древними. На описываемой территории они распространены довольно незначительно. Характеризуются сравнительно пологими холмистыми поверхностями, сохранившимися на абсолютных высотах в среднем выше 4500 м. В период формирования этого рельефа описываемая область, по-видимому, представляла собою холмистую страну, имеющую ряд не глубоких, но весьма широких, долинообразных понижений унаследованных, возможно, от палеогеновых тектонических впадин. Возраст рассматриваемого рельефа является вероятно, олигоценным или миоценовым, так как его остатки обнаружены на меловых и палеогеновых отложениях.

Глубоко расчлененный эрозионный рельеф в исследованном районе является наиболее широко распространенным, занимающим обширные площади в центральной и западной частях территории листа, где он прослеживается в нижних частях склонов горных хребтов, начиная от тальвегов долин до абсолютных высот 4300-4500 м.

Создавался он, вероятно, в два этапа. От первого этапа сохранились остатки довольно широких плоскодонных долин, прослеживающихся в долинах нашей реки Пяндж и на высотах около 3000 м над уровнем моря. Во второй этап образовались узкие современные долины, причем глубина эрозионного вреза этого этапа в долине нашей реки Пяндж достигает 2500 м, а в районе Сарезкого озера – 800 м. В результате проявления двух указанных этапов эрозионной деятельности, происходивших, вероятно в длительный отрезок времени от миоцена до современной эпохи, был образован наблюдающийся сейчас сильно расчлененный рельеф, характерный наличием пилообразных вершин и глубоких V-образных ущелий с крутыми склонами, свойственный западно-памирскому типу (Туляганов и Ходжибаева, 1978).

Экзарационный рельеф

В верховьях современных долин на всей территории развиты элементы молодого позднечетвертичного и современного экзарационного рельефа. Они располагаются на самых различных абсолютных высотах, в бассейнах нашей реки на высоте от 3500 м. Наряду с наличием трогеобразных долин здесь мы часто встречаем и другие типичные формы – бараньи лбы, ригели, ледниковые цирки, кары, ледопады и фирновые поля (Туляганов и Ходжибаева, 1978).

Аккумулятивный рельеф

Моренный рельеф имеет различную морфологию в зависимости от возраста. В районах развития ниже-, средне-, и верхнечетвертичных морен, имеющих по правым притокам нашей реки Пяндж, обнаруживаются пологоволнистые поверхности, которые часто бывают перекрыты более молодыми пролювиально-делювиальными и ледниковыми отложениями. Встречаются здесь и отдельные гряды морен, имеющие обычно дугообразную форму, обращенную выпуклостью в сторону устья долины. Современные морены создают нагромождение мелко- и крупнообломочного материала, часто с характерными уступами, указывающими на стадии отступления ледников.

Аллювиальный рельеф прослеживается узкой полосой вдоль днищ долин основных рек района и развит на поймах и надпойменных террасах. Высота террас уменьшается с запада на восток. Всего насчитывается три комплекса. Террасы первого (условно верхнечетвертичного) комплекса по долинам реки Пяндж располагаются на высоте от 5-10 до 40 м над уровнем реки. Второй комплекс среднечетвертичных террас по Пянджу имеет высоту 150-200 до 450 м над уровнем реки. Третий комплекс нижнечетвертичных террас в виде разрозненных выходов сохранился по левому борту реки Пяндж. Последние два комплекса террас располагаются, главным образом, в останцах древних долин,

поэтому они всюду сильно размыты и перекрыты более молодыми четвертичными образованиями (Туляганов и Ходжибаева, 1978).

Коллювиально-делювиальный и пролювиальный рельеф широко развит по нижним частям склонов речных долин и устьям мелких притоков и саев. Он создан шлейфами осыпей, конусами выносов (Туляганов и Ходжибаева, 1978).

Краткая история формирования рельефа района

Формирование современного рельефа на описываемой территории началось, вероятно, с олигоцена, когда весь Памир испытал первые значительные поднятия, охватившие его целиком. В это время, по-видимому, намечаются широкие долинообразные понижения, унаследовавшие конфигурацию киммерийских и альпийских тектонических структур. Господствовавшими процессами денудации были дооформлены пологие сглаженные формы рельефа. С конца миоцена происходит, вероятно, резкое нарастание скорости поднятия всей горной области, сопровождавшееся интенсивной глубинной, и меньшей степени боковой эрозией. Тогда же, по всей вероятности, были заложены главнейшие современные долины исследованного района и наметились линии основных существующих ныне водоразделов. Поднятие завершилось в раннечетвертичное время мощным полупокровным оледенением, следы деятельности которого хорошо сохранились. Синхронными этому оледенению являются остатки нижнечетвертичных ледниковых и аллювиальных отложений, располагающихся по левому борту реки Бартанг. После оледенения наступила эпоха межледникового развития, в которую происходит эрозионная деятельность, особенно интенсивно проявившаяся в западной части района.

В среднечетвертичное время Памир вновь подвергается оледенению, однако по масштабам значительно уступавшему раннечетвертичному и приуроченному уже к долинам, которые пересекли раннечетвертичные долины. В результате экзарационных процессов эти долины принимают трогаобразную форму, сохраняющуюся до настоящего времени. С конца среднечетвертичного времени по настоящее время площадь указанного оледенения постепенно сокращается. Вместе с тем, не прекращающееся поднятие горной области обусловило значительную глубинную эрозию, интенсивно проявляющуюся и в наше время (Туляганов и Ходжибаева, 1978).

2.5. Современные геологические процессы на участке строительства трассы автомобильной дороги Рушан - Хорог

На рассматриваемых участках трассы распространены разнообразные склоновые и эрозионные процессы: сели, обвалы, осыпи, оползни, а также криогенные процессы.

Камнепады и осыпи вдоль изучаемого участка встречаются повсеместно (рис.5). Мощные щебневые наносы, покрывающие склоны, являются наиболее распространёнными образованиями среди четвертичных отложений. Талые воды ледников и снежников интенсивно пропитывают рыхлые отложения склона и способствуют смешению щебнистых масс, а иногда и образованию разрушительных селей.



Рис. 5. Камнепады и осыпи между участками Дехрушан исследуемой территории (GoogleEarth)

Сели. На рассматриваемой территории сели развиты очень широко и характеризуются большой частотой повторяемости. В основном они грязекаменные. Большая часть селей проявляется в июле – августе и сентябре, т.е. в самые тёплые месяцы года, когда происходит интенсивное таяние снежников и ледников. Источником твёрдой составляющей селей является моренный материал и шлейфы обвально-осыпных отложений, развивающиеся в нижних частях склонов (Хушнуд Назриев, 2011).

Оползни и обвалы повсеместно распространены на этой территории. Интенсивная глубинная эрозия рек территории сформировала резко расчленённый рельеф V-образными и каньонообразными долинами характеризующимися предельными углами откосов и перепадами 1,5 – 2,0 км. В скальных породах метаморфической толщи докембрия и палеозоя нередко углы склонов достигают 80 – 90 градусов. В этих условиях оползни и обвалы играют существенную роль в процессе формирования рельефа, проявляясь в значительных размерах как в коренных породах, так и в четвертичных покровных образованиях.

На этих территориях встречаются как древние оползневые и обвальные структуры, так и современные. По структуре смещения выделяются: обвалы и вывалы, оползне-обвалы и оползни. Ширина зон, охваченных оползнями и обвалами часто измеряется километрами.

Оползне-обвальные процессы этой территории представляют серьезную угрозу населённым пунктам, автодорогам и прочим коммуникациям. Всего на Памире обследовано 207 оползней, из них 64% в покровных четвертичных образованиях, остальные 36% в скальных породах.

На рассматриваемой территории развиты разнообразные геологические процессы, характерные для высокогорных областей, но катастрофический характер имеют в основном оползне-обвальные процессы, так как они перегораживают русло реки и образуют запрудные озера, что нарушает движение транспорта и может повредить дорожное полотно. Кроме того, они являются причиной возникновения прорывных селей. Развитие современных геологических процессов в бассейне реки Пяндж определяется совокупностью геолого-геоморфологических, неотектонических и климатических условий, к ним относятся: состав и свойства горных пород; характер рельефа; существенная дифференцированность современных тектонических движений; высокая сейсмичность территории с частим проявлением землетрясений; высотная климатическая зональность; резкое колебание суточных и сезонных температур, что обуславливает интенсивное физическое выветривание горных пород.

При этом природные условия подготавливают геологическую среду к гравитационным перемещениям, а землетрясение (причина) оказывают силовое воздействие на массивы горных пород, изменяющее их свойства и нарушающее устойчивость склонов. Сейсмичность рассматриваемой территории составляет 9 баллов и более.

Геологические процессы высокогорья, характерные для исследуемой территории формируются обычно за счет активного разрушения коренных пород в ходе физического

выветривания, экзарационного дробления пород и разрушения горных массивов землетрясениями. Многообразие и сложность геолого-структурного строения, территории, различный минеральный состав, структура и текстура горных пород, слагающих склоны, обусловили не только различия в характере их выветривания, образования трещиноватости, размываемости, но и в проявлениях геологических процессов (Хушнуд Назриев, 2011).

Анализ условий и причин геологических процессов позволяет сформировать следующие положения (Золотарев, 1983):

1. Интенсивное выветривание горных пород способствуют формированию на склонах осыпей и курумов;
2. Подмыв склоновых частей долин реками и абразия берегов озер вызывает на осыпных склонах образование оползней-осовов;
3. Особые зимние условия и крутые склоны способствуют частому и повсеместному проявлению лавин на склонах и в склоновых ложбинах;
4. Наличие ледников и снежников определяет ежегодное сезонное проявление паводков и селей практически по каждому водотоку и врезу;
5. Масштабное распространение рыхлообломочных моренных и осыпных отложений в верховьях всех эрозионных долин и на склонах контролирует интенсивность и опасность селей и паводков по долинам;
6. Землетрясения являются главной причиной образования крупных обвалов и оползней, в долинах реки Пяндж запруды (естественные плотины), которые являются потенциальными очагами селеобразования.

В пользу почти исключительно сейсмического характера оползней и обвалов на Западном Памире и в долинах реки Пяндж свидетельствует целый ряд специальных инженерно-геологических исследований, направленных на изучение оползней и обвалов Памира (Туляганов и Ходжибаева, 1978).

Специалистами Таджикглавгеология установлено, что все оползни и обвали этого региона, образовались в основном при известных (зафиксированных) землетрясениях или в зонах крупных разломов при обилии разрывных сейсмодислокации.

Прямое влияние на формирование оползней-обвалов оказывают крутизна склонов и морфологическое строение долины. По приуроченности оползней к склонам разной крутизны отмечены следующие закономерности: оползни скольжения и течения развиваются на склонах крутизной 25-50°; оползни-обвалы активны на склонах крутизной 65-80°; обвалы развиваются практически на вертикальных склонах крутизной 80-90°.

Характерной особенностью сейсмогенных оползней является то, что на крутых участках склонов они переходят в обвалы, оползни-обвалы. Склоновая денудация, вызванная сейсмогенными оползнями и обвалами, настолько огромна на территории Памира, что она может быть, соизмерима с процессами эрозии или ледниковой экзарации.

Устойчивость рыхлого чехла склонов, оконтуривающих долины реки Пяндж, вносит эрозия. Подрезаемые береговые склоны у основания лишаются упора и тем самым создаются необходимые условия усиления обвально-оползневых процессов.

Другим важнейшим условием формирования огромных, грандиозных оползней и обвалов является сейсмичность территории. Оползне-обвальные процессы тесно связаны с разрывными сейсмо-дислокациями всех типов, что подтверждается их прямой связью практически со всеми участками сейсмически разбитых склонов. Наиболее интересными среди сейсмогенных оползней являются оползни незавершенной стадией развития, так называемые «подошвенные» или «оползни незавершенного сдвига и отрыва» с предполагаемым объемом оползневых тел в несколько десятков и сотен миллионов кубометров.

На территории долины реки Пяндж оползни-обвалы распространены меньше, чем обвалы, но их характеризуют большие площади поражения огромные объемы смешанных пород. В четверичное время каждый этап врезания долины реки Пяндж сопровождался проявлением достаточно крупных по размеру оползней-обвалов, приводящих к подпруживанию долин.

Основными факторами формирования оползней скольжения являются снижение прочности пород вызванной тектонической трещиноватостью, раздробленностью и обводнением пород. Высокая степень трещиноватости карбонатных и других пород, способствующая аккумуляция большого количества подземных пород, являются одним из определяющих факторов формирования оползней этого типа (Туляганов и Ходжибаева, 1978).

Обвалы, развиваются на высоких и крутых склонах, сложенных очень трещиноватыми прочными породами. Обвалы различаются по объему и возрасту (Золотарев, 1983).

Современные обвалы, объемами в несколько десятков тыс. кубометров, зафиксирован в долине реки Пяндж, в которой обрушился крупный блок юрских карбонатных пород объемом около 100тыс.м³. Обвальная масса состоит из валунов и глыб; размеры обвалившихся блоков метаморфизованных известняков достигают 8-10 м в поперечнике. Малые обвалы, объемом в несколько десятков и сотен кубометров тоже зафиксированы в ряде пунктов долин реки Пяндж (рис.6) (Хушнуд Назриев, 2011).



Рис.6. Обвал на автодороге Рушан-Хорог (фото от местного жителя)

Блокировка дорог приводит к задержкам в перевозке грузов и пассажиров, что может негативно сказаться на экономике регионов, зависящих от этих транспортных путей. Камни и обломки могут полностью перекрыть дорогу, делая её непроходимой для транспорта до тех пор, пока не будут проведены работы по её расчистке. Непредсказуемые камнепады создают опасность для водителей и пассажиров, увеличивая риск аварий и травм.

Сейсмичность является важным фактором активизации современных геологических процессов, с которой связаны их катастрофические проявления. В пределах описываемой территории, как правило, сильные землетрясения инициировали образование грандиозных оползней, обвалов, камнепадов, селевых потоков и снежных лавин.

Эти процессы представляют серьезную угрозу для инфраструктуры и безопасности населения. Важно учитывать сейсмическую активность при проектировании и строительстве дорог, а также при планировании мер по защите и ликвидации последствий стихийных бедствий.

ГЛАВА 3. МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ И РАЙОНИРОВАНИЯ УЧАСТКОВ РАЗЛИЧНОЙ СЛОЖНОСТИ

3.1. Принцип районирования участков различной сложности

Категории сложности инженерно-геологических условий следует устанавливать по совокупности факторов, указанных в нормативных документах. Если какой-либо отдельный фактор относится к более высокой категории сложности и является определяющим при принятии основных проектных решений, то категорию сложности инженерно-геологических условий следует устанавливать по этому фактору. В этом случае должны быть увеличены объемы или дополнительно предусмотрены только те виды работ, которые необходимы для обеспечения выяснения влияния на проектируемые здания и сооружения именно данного фактора.

Категории сложности инженерно-геологических условий определяются в соответствии с СП 47.13330.2016 Приложения Г (“Категории сложности инженерно-геологических условий”).

Инженерно-геологические условия делятся на три категории сложности: I (простая), II (средней сложности) и III (сложная). Категории сложности инженерно-геологических условий следует устанавливать по совокупности факторов. Факторы определяющие производства изысканий, подразделяются на: геоморфологические, геологические, гидрогеологические, геологические и инженерно-геологические процессы, специфические грунты в основании сооружения и техногенные воздействия изменения освоенных территорий.

Геоморфологические. I (простая): Площадка (участок) в пределах одного геоморфологического элемента. Поверхность горизонтальная, нерасчлененная. II (средней сложности): Площадка (участок) в пределах нескольких геоморфологических элементов одного генезиса. Поверхность наклонная, слабо расчлененная. III (сложная): Площадка (участок) в пределах нескольких геоморфологических элементов разного генезиса. Поверхность сильно расчлененная.

Геологические. I (простая): не более двух различных по литологии слоев, залегающих горизонтально или слабо наклонно (уклон не более 0,1). Мощность выдержана по простиранию. Незначительная степень неоднородности слоев по показателям свойств грунтов, закономерно изменяющихся в плане и по глубине. Скальные грунты залегают с поверхности или перекрыты маломощным слоем нескальных грунтов. II (средней сложности): не более четырех различных по литологии слоев, залегающих наклонно или с выклиниванием. Мощность изменяется закономерно. Существенное изменение характеристик свойств грунтов в плане или по глубине.

Скальные грунты имеют неровную кровлю и перекрыты не скальными грунтами. III (сложная): более четырех различных по литологии слоев. Мощность резко изменяется. Линзовидное залегание слоев. Значительная степень неоднородности по показателям свойств грунтов, изменяющихся в плане или по глубине. Скальные грунты имеют сильно расчлененную кровлю и перекрыты не скальными грунтами. Имеются разломы разного порядка.

Гидрогеологические. I (простая): Подземные воды отсутствуют или имеется один выдержанный горизонт подземных вод с однородным химическим составом. II (средней сложности): Два и более выдержанных горизонтов подземных вод, местами с неоднородным химическим составом или обладающих напором и содержащих загрязнение. III (сложная): Горизонты подземных вод не выдержаны по простиранию и мощности, с неоднородным химическим составом или разнообразным загрязнением. Местами сложное чередование водоносных и водоупорных пород. Напоры подземных пород и их гидравлическая связь изменяются по простиранию.

Геологические и инженерно-геологические процессы. I (простая): отсутствует. II (средней сложности): имеют ограниченное распространение и (или) не оказывают существенного влияния на выбор проектных решений, строительство и эксплуатацию объектов. III (сложная): имеют широкое распространение и (или) оказывают решающее влияние на выбор проектных решений, строительство и эксплуатацию объектов.

Специфические грунты в основании сооружения. I (простая): отсутствует. II (средней сложности): имеют ограниченное распространение и (или) не оказывают существенного влияния на выбор проектных решений, строительство и эксплуатацию объектов. III (сложная): имеют широкое распространение и (или) оказывают решающее влияние на выбор проектных решений, строительство и эксплуатацию объектов.

Техногенные воздействия и изменения освоенных территорий. I (простая): Незначительные и могут не учитываться при инженерно-геологических изысканиях и проектировании. II (средней сложности): не оказывают существенного влияния на выбор проектных решений и проведение инженерно-геологических изысканий. III (сложная): оказывают существенное влияние на выбор проектных решений и осложняют производство инженерно-геологических изысканий в части увеличения их состава и объемов работ.

3.2. Количественная оценка устойчивости склонов

Для анализа и оценки инженерно-геологических процессов согласно СП 11-105-97 (Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть II. Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов) и ОДМ 218.2.030-2013 (Методические рекомендации по оценке оползневой опасности на автомобильных дорогах), была проведена качественная и количественная (расчётная) оценка устойчивости склонов.

Качественная оценка устойчивости склонов, в том числе прогноз устойчивости, осуществлена с учетом генетического типа склоновых процессов, характера рельефа, возраста и стадии формирования склонов и их морфологических элементов. В качестве аналога был использован другой склон вдоль автодороги, сходный по инженерно-геологическим условиям.

Наиболее распространённые в инженерной практике методы расчёта устойчивости склона делятся на три основных группы:

- Методы предельного (пластического) равновесия
- Методы конечных элементов
- Комбинированные методы

Степень устойчивости склона (откоса) оценивается величиной коэффициента устойчивости (запаса устойчивости, безопасности).

Склон, откос или его морфологический элемент считается устойчивым, если его коэффициент устойчивости выше единицы ($K > 1$). Величина коэффициента устойчивости склона (откоса) приблизительно равная единице ($K \sim 1$) соответствует состоянию предельного равновесия, наблюдающемуся в моменты начала и завершения смещения.

С учетом теоретических допусков применяемых методов расчёта и практических погрешностей получение исходных данных посредством инженерно-геологических, инженерно-геофизических и инженерно-геодезических изысканий, расчетные величины коэффициентов устойчивости и задаваемых коэффициентов запаса устойчивости откосов и склонов должны отвечать условию:

$$K_{y(з)} \geq [K_{y(з)}]$$

где

$K_{y(з)}$ – расчетный коэффициент устойчивости (запаса устойчивости);

$K_{y(3)}$ – нормативный (минимально требуемый) коэффициент устойчивости (запаса устойчивости).

Оценка устойчивости откосов и склонов заключается, как правило, в решении плоской задачи: рассматриваются условия равновесия массива горных пород шириной 1 м (с вертикальными, боковыми гранями), условно «вырезанного» из массива склона по направлению ожидаемого смещения (силы, действующие по боковым граням, при этом не учитываются).

Расчеты устойчивости в трехмерной постановке следует осуществлять, как правило, в сложных инженерно-геологических условиях при высокой степени их изученности, достоверном определении положения поверхности скольжения для инженерных защиты наиболее ответственных объектов (ОДМ, 2013).

Метод конечных элементов

Метод конечных элементов рассматривает напряженно-деформированное состояние грунтового массива с учетом упругого и упругопластического поведения грунтов и наличия строительных сооружений и конструкций в массиве горных пород.

Количественным показателем степени устойчивости откосов и склонов в методе конечных элементов является коэффициент безопасности (надежности):

$$K = \frac{c_{исх}}{c_{крит}} = \frac{\text{tg}\varphi_{исх}}{\text{tg}\varphi_{крит}},$$

где

$c_{исх}$, $\varphi_{исх}$ – исходные прочностные характеристики;

$c_{крит}$, $\varphi_{крит}$ – критические прочностные характеристики, соответствующие пластическому течению грунта в рассматриваемой области.

Оценку устойчивости откосов и склонов методом конечных элементов рекомендуется выполнять в следующей последовательности:

1. Выбор расчетного створа (ов), см
2. Составление расчетной схемы, см
3. Генерализация расчетной схемы, см
4. Определение внешних дополнительных нагрузок, см
5. Расчет давлений подземных вод;
6. Расчет начальных бытовых напряжений в грунте;
7. Вычисление коэффициента безопасности методом «снижения c и φ ».

Расчет давлений подземных вод, как правило, производится на основании уровня грунтовых вод (или пьезометрического уровня подземных вод) с учетом гидростатического распределения давлений по глубине.

Расчет начальных бытовых напряжений в грунте может производиться с помощью процедуры K_0 или процедуры гравитационного нагружения. Процедуру K_0 , как правило, следует использовать только в задачах с горизонтальной поверхностью земли и параллельными ей слоями грунтов и уровнями подземных вод. Во всех остальных случаях должна использоваться процедура гравитационного нагружения.

Процедура K_0 заключается в определении вертикальных и горизонтальных эффективных напряжений в грунтовом массиве, связанных коэффициентом бокового давления K_0 :

$$\sigma_{h0} = K_0 \sigma_{v0}$$

Вертикальные эффективные напряжения определяются весом перекрывающих сверху грунтов:

$$\sigma_{v0} = \sum \gamma_i \cdot h_i - u_0$$

где

γ_i – удельный вес отдельного слоя грунта, кН/м³

h_i – мощность отдельного слоя грунта, м;

u_0 – начальное поровое давление в рассматриваемой точке, кПа;

Величина коэффициента бокового давления должна приниматься таким образом, чтобы в каждой точке модели не нарушалось условие прочности грунта Кулона-Мора. Для несвязного грунта во избежание пластичности грунта значение K_0 должно быть ограничено соотношением:

$$\frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} < K_0 < \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$$

Для нормально уплотненных грунтов величина коэффициента бокового давления K_0 определяется соотношением:

$$K_0 = 1 - \sin \varphi$$

В переуплотненных грунтах величина коэффициента бокового давления может достигать 2 и более.

Процедура гравитационного нагружения заключается в последовательном увеличении веса первоначально невесомого грунтового массива с использованием

итеративной процедуры уравнивания напряженного состояния конечно-элементной модели.

Соотношение вертикальных и горизонтальных составляющих эффективных напряжений при этом в значительной степени определяются принятыми величинами коэффициента Пуассона ν . Необходимо выбирать такие значения коэффициента Пуассона ν , которые не приведут к образованию значительных зон пластических деформаций. В частности, для несвязных грунтов должно выполняться условие:

$$\frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} < \frac{\nu}{1 - \nu};$$

где ν – коэффициент Пуассона.

Определение величины коэффициента безопасности K в рамках метода конечных элементов осуществляется из соотношения исходных и критических прочностных характеристик грунтов, получаемых в результате применения процедуры «снижения c и φ ».

Процедура «снижения c и φ » заключается в последовательном снижении исходных прочностных показателей грунта до критических величин, соответствующих моменту образования областей пластического течения и разрушения грунта.

Значения исходных прочностных характеристик грунтов соответствуют показателям, задаваемым перед началом процедуры «снижения c и φ » (ОДМ, 2013).

Программа Plaxis

Программа Plaxis, основанная на методе конечных элементов, предназначена для расчета деформаций, фильтрации и устойчивости в различных инженерных и геотехнических проектах. Простые графические интерфейсы для ввода данных позволяют быстро создавать сложные конечно-элементные модели, а расширенные инструменты вывода обеспечивают детальное представление результатов вычислений.

Одним из ключевых результатов является карта безопасных коэффициентов, показывающая зоны возможного разрушения. Визуализация результатов помогает инженерам понять поведение склона и принять обоснованные решения по его укреплению или другим мерам по обеспечению устойчивости.

Области высокого коэффициента безопасности: Зеленые или синие области на карте указывают на высокую степень устойчивости. В этих областях риск обрушения или деформации конструкции минимален.

Области низкого коэффициента безопасности: Желтые, оранжевые или красные области представляют области с низким коэффициентом безопасности. В этих областях риск обрушения или деформации конструкции значительно выше, что требует дополнительных мер по укреплению или улучшению устойчивости.

Вспомогательные данные для расчета устойчивости склона для программы:

- Инженерно-геологический разрез;
- Название инженерно-геологического элемента в соответствии с геологическими изысканиями;
- Название грунта;
- Удельный вес грунта в естественном состоянии (или плотность грунта в естественном состоянии);
- Удельный вес грунта при полном водонасыщении (или плотность грунта при полном водонасыщении);
- Удельное сцепление;
- Угол внутреннего трения;
- Уровень грунтовых вод.

3.3. Качественная оценка потенциально-опасных участков

Качественная оценка осыпной опасности и риска производится на основании экспертного анализа всей совокупности факторов, определяющих вероятность наступления оползневой события и его возможные последствия. Получаемая в результате оценки информация должна обеспечивать основу для разделения данных факторов на качественные характеристики осыпного риска («высокий», «средний», «низкий» и т.д.).

Для каждого конкретного объекта исследований на подготовительном этапе устанавливаются четкие критерии и термины, которые будут в дальнейшем использоваться для классификации осыпных опасных участков по категориям вероятности наступления и тяжести возможных последствий (таб.1). Степень осыпной опасности оценивается по принципу их пересечения и выражается категорией риска.

Количество категорий вероятности и тяжести последствий осыпных событий выбирается в каждом конкретном случае индивидуально в зависимости от поставленных задач и особенностей исследуемой территории (таб.2).

Для обеспечения объективности и сопоставимости результатов для описания возможных последствий и вероятности возникновения смещения рекомендуется использовать качественные термины в таблицах 1,2 и 3.

Ранжирование по уровню оползневой риска для имущества, населения и окружающей природной среды выполняется с помощью матрицы риска (таб.4). Представленная в таблице 4 матрица носит рекомендательный характер и при необходимости может быть изменена. В этом случае приводится расшифровка всех новых терминов и обосновывается ее преимущество (ОДМ, 2013).

Термины для качественной оценки вероятности осыпного смещения (ОДМ, 2013)

Обозначение категории вероятности осыпного смещения	Качественная характеристика вероятности осыпного смещения	Частота осыпного смещения в год	Вероятность осыпного смещения
P1	Несомненно	>1	Ожидается в течение ближайшего времени
P2	Весьма возможно	$1 - 10^{-1}$	Осыпное событие возможно при ухудшении инженерно-геологических условий в течение расчетного срока эксплуатации участка дороги
P3	Вероятно	$10^{-1} - 10^{-2}$	Может произойти при весьма неблагоприятных обстоятельствах в течение расчетного срока эксплуатации участка дороги
P4	Редко	$10^{-2} - 10^{-6}$	Может произойти в течение расчетного срока эксплуатации участка дороги только в исключительных случаях
P5	Маловероятно	$<10^{-6}$	Осыпное событие практически невозможно

Качественная оценка экономических последствий автодороги (ОДМ, 2013)

Обозначение категории возможного ущерба	Качественная характеристика возможного ущерба	Относительные потери, %	Описание возможного ущерба
D1	Катастрофический	> 100	Полное разрушение участка автомобильной дороги, крупные повреждения одного или нескольких прилегающих объектов
D2	Крупный	40 - 100	Значительная часть земляного полотна автомобильной дороги разрушена, возможны средние повреждения одного прилегающего объекта
D3	Средний	10 – 40	Разрушено до половины земляного полотна автомобильной дороги, возможны незначительные повреждения одного прилегающего объекта
D4	Малый	1 - 10	Умеренное повреждение земляного полотна автомобильной дороги
D5	Незначительный	<1	Ограниченный ущерб практически не влияет на эксплуатационные свойства участка автомобильной дороги

Описание категорий осыпного риска (ОДМ, 2013)

Обозначение категории осыпного риска	Качественная характеристика осыпного риска	Описание категории осыпного риска
R1	Очень высокий	Быстро и практически гарантированно влечет за собой полное разрушение объекта дорожного хозяйства и/или приводит к невозполнимым потерям окружающей природной среды, гибели людей
R2	Высокий	С высокой вероятностью может повлечь за собой значительный ущерб для объекта дорожного хозяйства и/или окружающей природной среды, возможны травмы людей
R3	Средний	Может повлечь за собой серьезный ущерб для объекта дорожного хозяйства, но создает малую угрозу здоровью людей и окружающей природной среде
R4	Низкий	С низкой вероятностью может повлечь снижение эффективности функционирования объекта дорожного хозяйства, но не представляет опасности для окружающей природной среды и здоровья людей
R5	Очень низкий	С низкой вероятностью может повлечь незначительное снижение качества функционирования объекта дорожного хозяйства, но не представляет опасности для самого объекта, окружающей природной среды и здоровья людей

Матрица осыпного риска (ОДМ, 2013)

Обозначение категории возможного ущерба	Категория вероятности смещения				
	P1	P2	P3	P4	P5
D1	R1	R1	R2	R3	R4
D2	R1	R2	R3	R4	R5
D3	R2	R3	R3	R4	R5
D4	R3	R4	R4	R4	R5
D5	R4	R5	R5	R5	R5

4. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Глава 4.1. Районирование трассы автодороги Рушан-Хорог по сложности инженерно-геологических условий

Трасса реконструируемой автодороги рассматривалась по сложности инженерно-геологических условий с выделением различных категорий сложности инженерно-геологических условий по факторам, оказывающее максимальное влияние на объемы и стоимость инженерных изысканий в соответствии с СП 47.13330.2016 Приложению Г (“Категории сложности инженерно-геологических условий”).

Реконструируемые участки находятся на автомобильной дороге Рушан-Хорог. Потенциально-опасные процессы проявляются на участках: Шипад, Дерушан, Барзуд, Шидз, Вамар.

Участок Шипад

По геоморфологическим условиям участок автодороги относится к третьей категории сложности, так как поверхность сильно расчлененная. По геологическим условиям участок автодороги относится к третьей категории сложности, так как имеются скальные и полускальные грунты с неровной кровлей. По гидрогеологическим условиям участок автодороги относится к первой категории сложности, так как подземные воды отсутствуют или встречаются очень редко. По геологическим и инженерно-геологическим процессам участок автодороги относится к третьей категории сложности, так как эти процессы имеют широкое распространение и оказывают существенное влияние на автодорогу. По специфическим грунтам участок автодороги относится ко второй категории сложности, так как эти грунты имеют ограниченное распространение и не оказывают существенного влияния. По техногенным воздействиям и изменении освоенной территории участок автодороги относится к первой категории сложности, так как техногенные воздействия оказывают существенное влияние и учитываются при проектировании.

Участок Дехрушан

Дехрушан является вторым потенциально-опасным участком автодороги Рушан-Бартанг (рис.7).

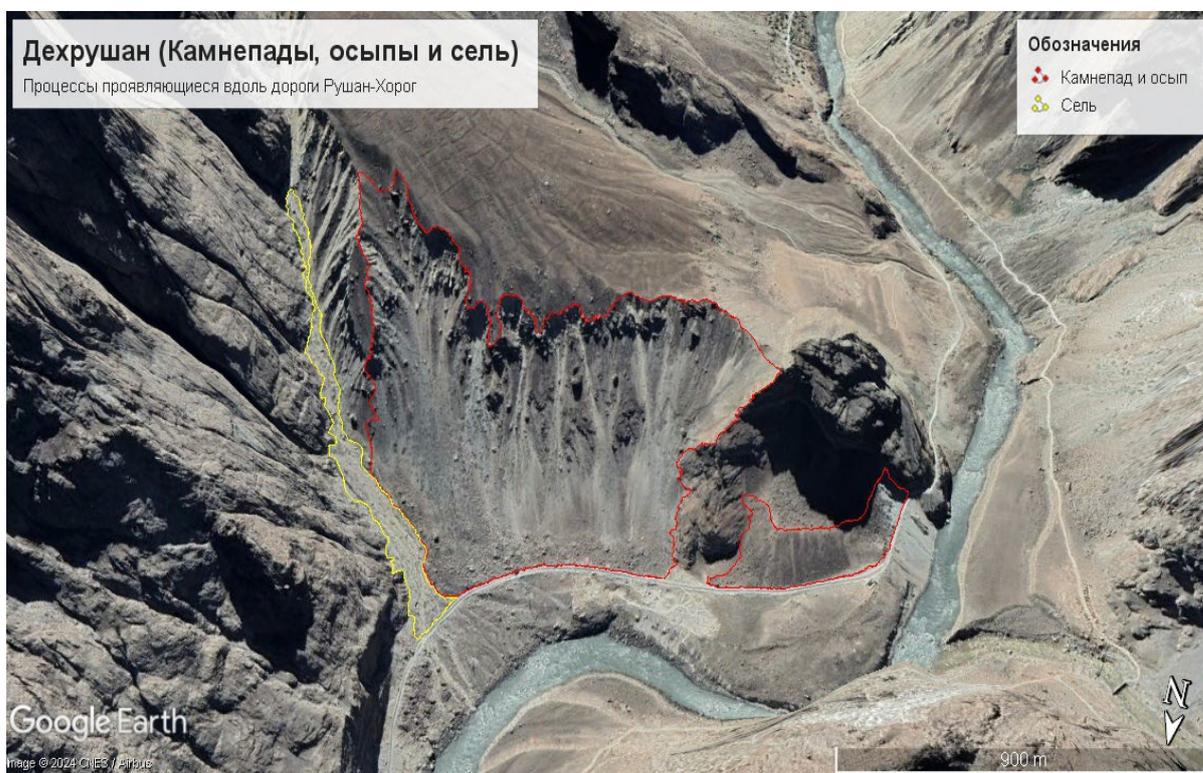


Рис.7. Опасные процессы на участке Дехрушан (GoogleEarth)

По геоморфологическим условиям участок автодороги относится к третьей категории сложности, так как поверхность сильно расчлененная. По геологическим условиям участок автодороги относится ко второй категории сложности, так как имеются скальные и полускальные грунты с неровной кровлей. По гидрогеологическим условиям участок автодороги относится к первой категории сложности, так как при бурении до 6 м подземные воды не были вскрыты. По геологическим и инженерно-геологическим процессам участок автодороги относится к третьей категории сложности, так как эти процессы имеют широкое распространение в виде осыпей, камнепадов и селей, которые оказывают существенное влияние на автодорогу. По специфическим грунтам участок автодороги относится ко второй категории сложности, так как эти грунты имеют ограниченное распространение и не оказывают существенного влияния. По техногенным воздействиям и изменении освоенной территории участок автодороги относится ко второй категории сложности, так как техногенные воздействия оказывают существенное влияние и учитываются при проектировании.

Участок Барзуд

Барзуд является третьем потенциально-опасным участком автодороги Рушан-Хорог Бартанг (рис.8).



Рис.8. Опасные процессы на участке Барзуд (GoogleEarth)

По геоморфологическим условиям участок автодороги относится ко второй категории сложности, так как поверхность сильно расчлененная. По геологическим условиям участок автодороги относится к третьей категории сложности, так как имеются скальные и полускальные грунты с неровной кровлей. По гидрогеологическим условиям участок автодороги относится к первой категории сложности, так как имеется один выдержанный горизонт подземных вод с однородным химическим составом. По геологическим и инженерно-геологическим процессам участок автодороги относится к третьей категории сложности, так как на участке проявляется осыпь который оказывает существенное влияние на автодорогу. По специфическим грунтам участок автодороги относится ко второй категории сложности, так как эти грунты имеют ограниченное распространение и не оказывают существенного влияния. По техногенным воздействиям и изменении освоенной территории участок автодороги относится ко второй категории сложности, так как техногенные воздействия оказывают существенное влияние и учитываются при проектировании.

Участок Шидз

Шидз является четвертым потенциально-опасным участком автодороги Рушан-Хорог Бартанг (рис.9).

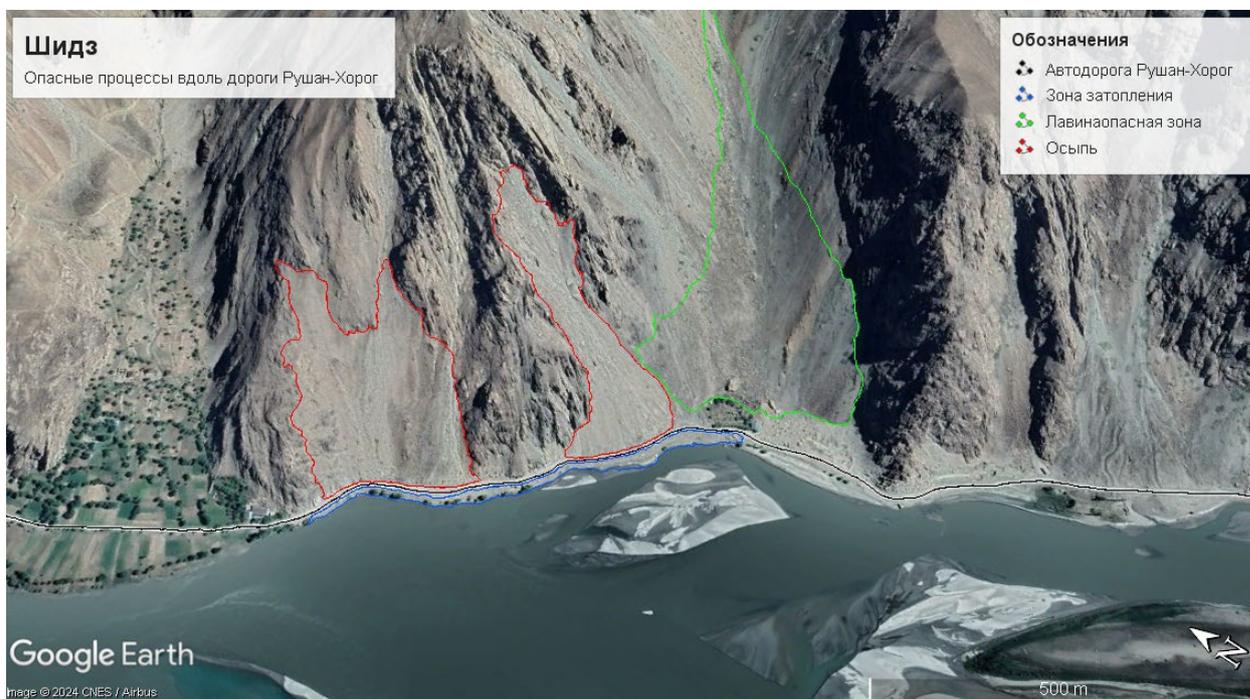


Рис.9. Опасные процессы на участке Шидз (GoogleEarth)

По геоморфологическим условиям участок автодороги относится к третьей категории сложности, так как поверхность сильно расчлененная и находится в пределах нескольких геоморфологических элементов. По геологическим условиям участок автодороги относится к третьей категории сложности, так как имеются скальные и полускальные грунты с неровной кровлей. По гидрогеологическим условиям участок автодороги относится к третьей категории сложности, из-за того, что подземные воды имеют высокий уровень. По геологическим и инженерно-геологическим процессам участок автодороги относится к третьей категории сложности, так как проявляются на участке лавины, осыпи, подтопление и затопление, которые оказывают существенное влияние на автодорогу. По специфическим грунтам участок автодороги относится ко второй категории сложности, так как эти грунты имеют ограниченное распространение и не оказывают существенного влияния. По техногенным воздействиям и изменении освоенной территории участок автодороги относится к третьей категории сложности, так как техногенные воздействия оказывают существенное влияние и учитываются при проектировании.

Участок Вамар

Вамар является последним потенциально-опасным участком автодороги Рушан-Хорог Бартанг (рис.10).



Рис.10. Опасные процессы на участке Вамар (GoogleEarth)

По геоморфологическим условиям участок автодороги относится к третьей категории сложности, так как поверхность сильно расчлененная и находится в пределах нескольких геоморфологических элементов. По геологическим условиям участок автодороги относится к третьей категории сложности, так как имеются скальные и полускальные грунты с неровной кровлей. По гидрогеологическим условиям участок автодороги относится к первой категории сложности, так как подземные воды отсутствуют или встречаются очень редко. По геологическим и инженерно-геологическим процессам участок автодороги относится к третьей категории сложности, так как эти процессы имеют широкое распространение в виде осыпей, подтопления, затопления и оказывают существенное влияние на автодорогу. По специфическим грунтам участок автодороги относится ко второй категории сложности, так как эти грунты имеют ограниченное распространение и не оказывают существенного влияния. По техногенным воздействиям и изменению освоенной территории участок автодороги относится к третьей категории сложности, так как техногенные воздействия оказывают существенное влияние и учитываются при проектировании.

Категории сложности инженерно-геологических условий определяются на основе комплексного анализа всех факторов, характеризующих инженерно-геологическую обстановку (таб.5). Если какой-то конкретный фактор имеет более высокую сложность и играет решающую роль при принятии ключевых проектных решений, то категория сложности ИГУ определяется исходя из этого фактора.

Таблица 5

Категории сложности инженерно-геологических условий (по СП 47.13330.2016)
трассы автодороги Рушан-Хорог

Фактор	№ группы участков				
	I Шипад	II Дехрушан	III Барзуд	IV Шидз	V Вамар
Геоморфологические условия	Сложная	Сложная	Средняя	Сложная	Сложная
Геологические в сфере взаимодействия зданий и сооружений с геологической средой	Сложная	Средняя	Сложная	Сложная	Сложная
Гидрогеологические условия	Простая	Простая	Простая	Сложная	Простая
Геологические и инженерно-геологические процессы и явления	Сложная	Сложная	Сложная	Сложная	Сложная
Многолетнемерзлые и специфические грунты в сфере взаимодействия	Средняя	Средняя	Средняя	Средняя	Средняя
Техногенные воздействия и изменения освоенных территорий	Простая	Средняя	Средняя	Сложная	Сложная
Категория сложности ИГУ по СП 47.13330.2016 (Приложения Г)	Сложная	Сложная	Сложная	Сложная	Сложная

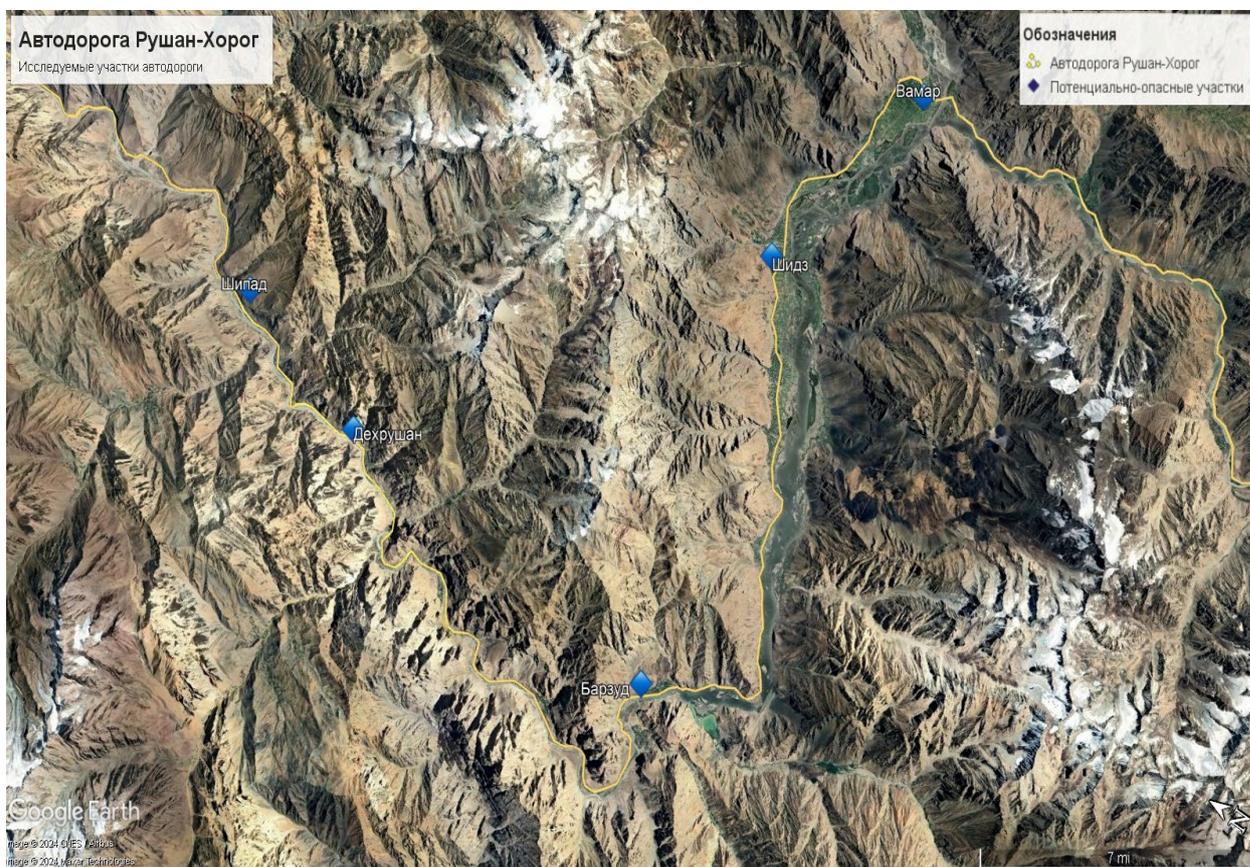


Рис.11. Исследуемые участки автомобильной дороги Рушан-Хорог (GoogleEarth)

Самым опасным участком трассы автомобильной дороги Рушан-Хорог является Шидз, так как на этом участке проявляется более 3 опасных процессов. Интенсивное выветривание горных пород на склонах участка вызывает осыпи и камнепады, которые с верхних участков и падают на дорогу. Это создаёт опасность для автомобильной дороги, так как камни могут преграждать дорогу или вызывать аварии. Периодические дожди, таяние снега или повышение уровня воды в реках вызывают затопление на участке. Затопления приводят к полной или частичной непроходимости дороги, а также создают опасность для автомобилей из-за скрытых под водой препятствий или изменения конфигурации дороги.

4.2. Количественная оценка устойчивости склона Шипад

Абсолютная высотная отметка исследуемого участка автодороги составляет 1604 м над уровнем моря. Ближайшим водным объектом является р. Пяндж, протекающая в 40 м от участка изысканий и согласно буровым работам, участок не располагается в зоне подтопления (рис.12).

Этот участок трассы представляет собой серьезную опасность из-за проявлений осыпей, которые могут привести к разрушению дороги и угрозе для безопасности движения. Крутизна склона, наличие трещиноватых горных пород и недостаточная растительность, способная удерживать грунт, даёт данному процессу происходить как спонтанно, так и в результате воздействия внешних факторов, таких как сильные дожди или землетрясения.

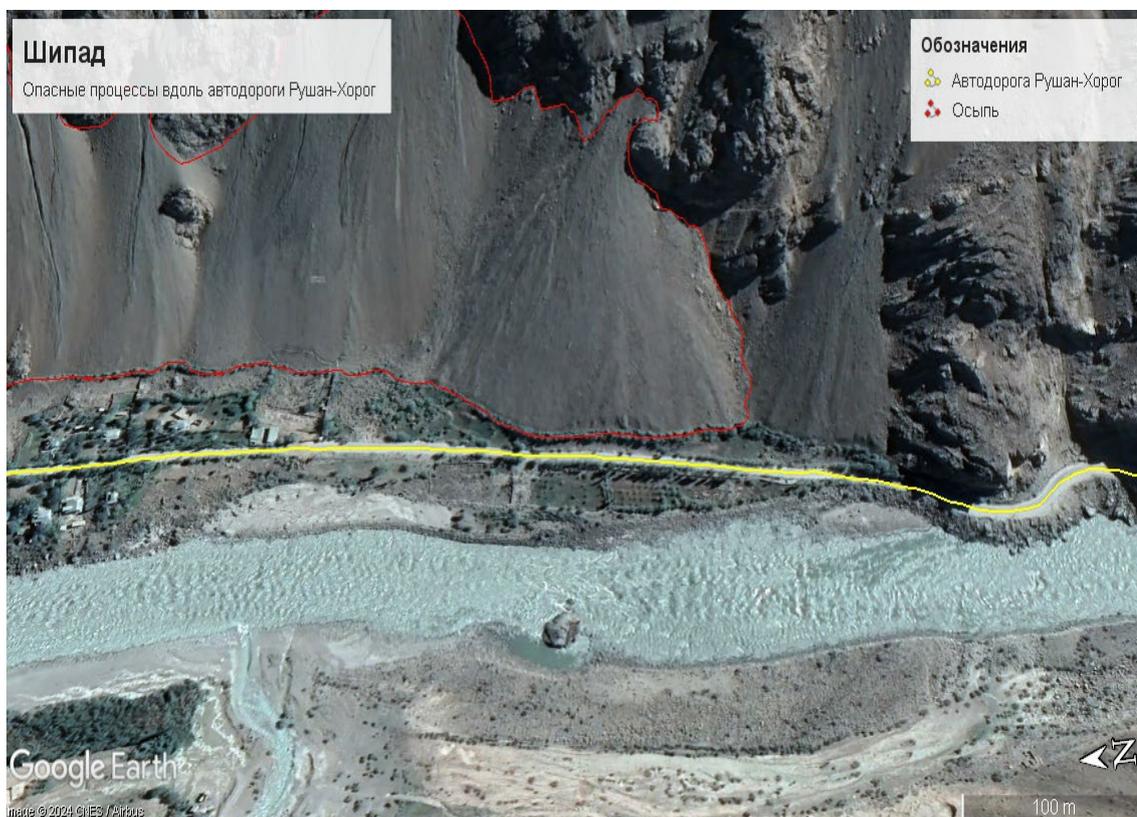


Рис.12. Осыпь на участке Шипад автодороги Рушан-Хорог (GoogleEarth)

Геоморфологическое строение

На этом участке рельеф долины формируется рекой Пяндж. Склоны в основном представлены эрозионными и эрозионно-осыпными формами, имеющими хорошо выраженные особенности: различные формы и толщины, наличие осыпных конусов и шлейфов. В целом, форма долины напоминает дугу и повторяет направление Шипадского разлома.

Гидрогеологические условия

Установившиеся уровень грунтовых вод по состоянию на 20.04.2022 отмечен на глубине 2,01-2,05 м (абсолютные отметки 1589,99-1589,95 м). В других скважинах, пробуренных ближе к дороге и в зоне проявления осыпей водоносный горизонт не вскрыть, так как эти участки относительно первой скважины находятся на высоте более 10 м.

Грунтовые воды не обладают агрессивными свойствами к бетону любой плотности на любых марках цемента. К арматуре железобетонных конструкций грунтовые воды слабоагрессивные.

Опасные геологические процессы

На периферии этого участка и на смежной территории наблюдаются осыпи, камнепады и эрозия в виде оврагов. Также отмечается высокая сейсмичность этой области.

Осыпь. На исследуемом участке осыпь является потенциально-опасным из-за периодичности проявления и близкого расстояния от дороги. Осыпи с обломочным материалом, таким как щебень, галька, глыбовый грунт и песок, представляют собой типичное явление вдоль автодороги. Щебень и галька, часто осыпаются из-за эрозии или недостаточной укрепленности склона. Глыбовый грунт, состоящий из крупных обломков скальных пород, также подвержен осыпям из-за воздействия природных факторов, таких как ветер, изменения температуры и землетрясения.

Лавина. В районе замечается сход лавин как мокрого, так и сухого типа, с большими объемами снега и льда (рис.13). Эти лавины временно блокируют и изолируют автодорогу каждый год.

Мокрые лавины обычно происходят во время нестабильной погоды, когда идет оттепель или дождь. Они образуются из-за прослойки воды между различными слоями снега с разной плотностью. Характерно, что мокрые лавины движутся медленнее сухих — скорость обычно не превышает 50 км/час. Однако они могут быть очень плотными, достигая плотности до 700 кг/м³., что делает их более разрушительными. При остановке мокрые лавины быстро застывают, что затрудняет спасательные операции.



Рис.13. Лавиноопасные участки на районе Шипад автодороги Рушан-Хорог (Отчёт автодороги Рушан-Варшез-Хорог, 2022)

Камнепады. Камнепады, наблюдаемые в выходах коренных пород, расположенных выше автодороги, происходят регулярно весной. Этот процесс связан с наличием разрывов и трещин в обследованных участках, которые способствуют развитию камнепадов.

Сейсмичность. Сейсмичность исследуемого участка составляет 9 баллов. Категория опасности процессов землетрясения – весьма опасная (рис.14).

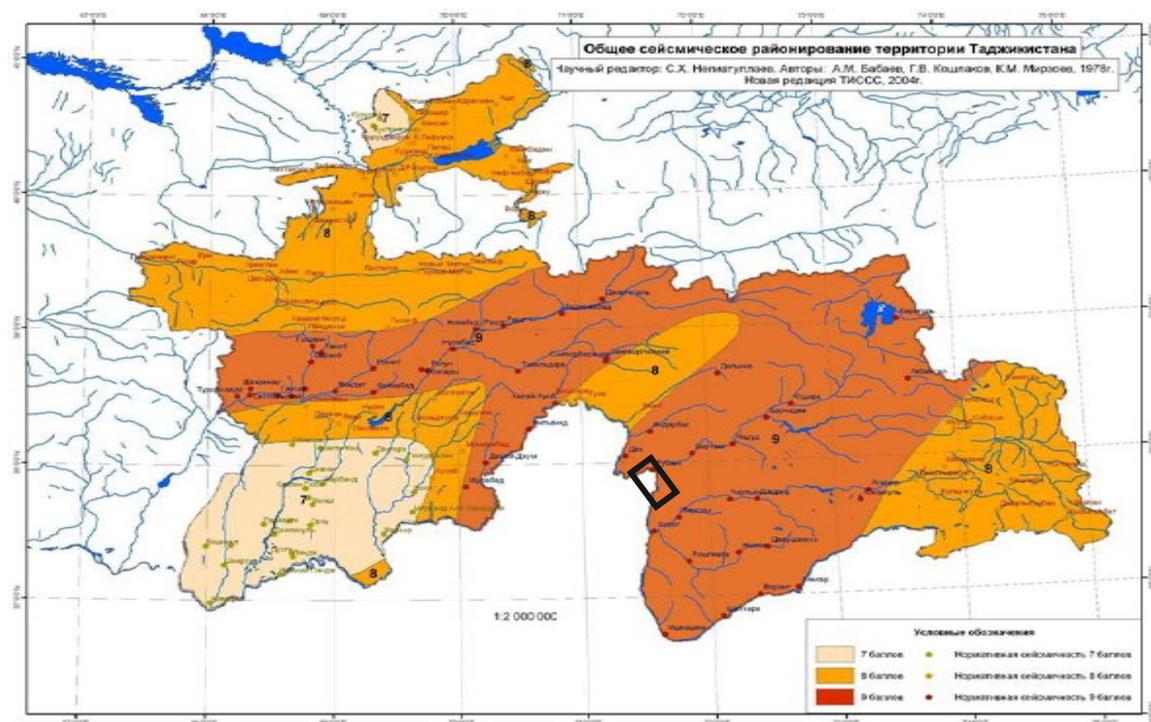


Рис.14. Карта общего сейсмического районирования территории Таджикистан
 Чёрным прямоугольником указан исследуемый участок автодороги (Ищук, 2022)

Физико-механические свойства грунтов

На защищаемом участке выделены шесть инженерно-геологических элементов

Таблица 6

Физико-механические свойства грунтов

ИГЭ	Наименование	Удельный вес γ , кН/м ³	Удельное сцепление c , кПа	угол внутреннего трения φ , град
1	Щебенисто-глыбовый грунт с размерами частиц более 80 мм, с примесью крупнозернистого песка	26,2	0,8	34,3
2	Щебень с размерами частиц более 80 мм	27,5	0,8	28,5
2а	Супесь с примесью гальки до 10-30% и щебня	26,3	41	24,1
3	Граниты, гнейсы мелкозернистые, не затронутые выветриванием, очень прочные	27,4	-	-
3а	Галечник размер зёрен до > 80мм, содержание валунов более 30%, заполнитель песок	21,4	0,7	40,6



Рис.15. Инженерно-геологический разрез района Шипад

Устойчивость склона на исследуемом участке автодороги было рассчитано с программой Plaxis. Устойчивость склона составляет 1,6.

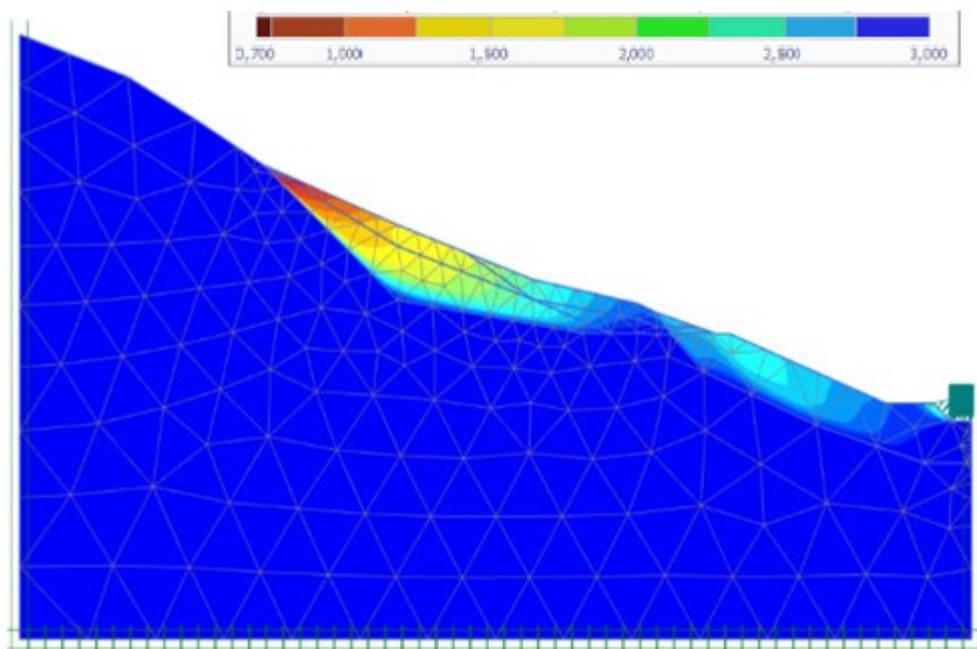


Рис.16. Карта устойчивости исследуемого участка (Plaxis)

Осыпь на исследуемом участке по категории опасности является умеренно опасным. Исследуемый осыпь по устойчивости является устойчивым, так как коэффициент устойчивости выше 1. На карте составленной программы Plaxis, проведено

районирование коэффициента устойчивости частей осыпного тела разными цветами. В нижней части осыпь устойчивее чем в верхней части.

Коэффициент устойчивости 1.6 является достаточно высоким для уверенности в стабильности склона, то есть это говорит о том, что склон имеет достаточное сопротивление, чтобы противостоять воздействию гравитации и других факторов, что делает его относительно стабильным.

Наиболее вероятной (экстремальной) поверхностью скольжения считается поверхность, обеспечивающая наименьший коэффициент устойчивости грунтового массива. В данном случае наиболее вероятным является смещение толщи щебенистых и глинистых пород по кровле коренных грунтов ИГЭ-3, то есть наиболее вероятного в смещения будут вовлечены грунты ИГЭ-1-2, но ИГЭ-1 перемещается быстрее из-за наличия крупнозернистого песка.

Однако, даже при таком высоком коэффициенте устойчивости может быть разумным предпринять некоторые меры для повышения стабильности грунта или для предотвращения потенциальных проблем. Поэтому рекомендуется проводить мониторинг геометрии склона, чтобы следить за его состоянием и своевременно реагировать на любые изменения.

Мониторинг геометрии склона может включать в себя регулярные измерения угла наклона склона, изменения его высоты, а также наблюдение за наличием трещин или других признаков деформации. Это поможет выявить любые потенциальные проблемы и принять меры по их устранению до возникновения серьезных проблем.

4.3. Качественная оценка устойчивости потенциально-опасных участков

Дехрушан

Основной причиной активизации осыпного процесса на этом участке является большая крутизна склона (>40). Большая крутизна создает более сильное давление, которое приводит к ослаблению связей между частицами грунта и, следовательно, к большему риску перемещения. Ситуация на участке ухудшается в осенний период, когда выпадает значительное количество атмосферных осадков. Это создает условия для смещения и обрушения грунта под воздействием собственного веса, то есть этот процесс дополнительно ослабляет связи между частицами грунта, увеличивая вероятность перемещения и ближайшие 1,5—2 года приведут к обрушению на автодорогу.

Согласно таблице 1 (подраздел 7.2), вероятность смещения на участке характеризуется как «вероятный» - (P3). В ходе ожидаемого смещения будет полностью разрушена одна полоса движения (D3), т.е. может повлечь за собой серьезный ущерб для объекта дорожного хозяйства, но создает малую угрозу здоровью людей и окружающей природной среде. Протяженность осыпного участка вдоль автодороги, которая равняется 287 м приведет к значительным материальным затратам на его восстановление. Таким образом, согласно пункту 7.2.5, осыпной риск на участке является «средним» - (R3).

Барзуд

Основной причиной активизации осыпного процесса на этом участке является значительный эффект атмосферных осадков. Вследствие образования широких трещин дождевая вода проникает в грунт, ухудшая его прочностные характеристики и постепенно снижая удерживающую способность по поверхности склона. Усугубление ситуации следует ожидать в осенне-зимний период, когда значительное количество атмосферных осадков выпадает на рассматриваемой территории, а испаряемость минимальна.

Согласно таблице 1 (подраздел 7.2), вероятность смещения на участке характеризуется как «вероятный» - (P3). В ходе ожидаемого смещения будет полностью разрушена одна полоса движения (D3), т.е. может повлечь за собой серьезный ущерб для объекта дорожного хозяйства, но создает малую угрозу здоровью людей и окружающей природной среде. Протяженность осыпного участка вдоль автодороги, которая равняется 370 м приведет к значительным материальным затратам на его восстановление. Таким образом, согласно пункту 7.2.5, осыпной риск на участке является «средним» - (R3).

Шидз

На исследованном участке автодороги проявляются такие процессы как: осыпь, обвалы, лавина и затопление (рис.17). Этот участок является самым опасным на этой трассе. Лавина на участке играет роль в инициировании осыпа, то есть, когда лавина сходит с верхних склонов, она может переносить большие объемы снега и грунта, что создает дополнительное давление на склон и может вызвать его обрушение. затопление дороги может также спровоцировать осыпь. Вода, проникающая из реки в основании склона, может смывать и разрушать ее структуру. Дополнительно, обвалы, которые могут происходить из-за нестабильности склона, могут создавать препятствия для естественного стока воды или распределения давления на склоне. Это может увеличить риск затопления дороги и, в свою очередь, увеличить вероятность образования осыпей.

Согласно таблице 1 (подраздел 7.2), вероятность смещения на участке характеризуется как «несомненный» - (P1). В ходе ожидаемого смещения будет полностью разрушен автомобильный участок дороги, т.е. может повлечь за собой серьезный ущерб для объекта дорожного хозяйства и участок будет характеризоваться как «катастрофический» (D1). Протяженность осыпного участка вдоль автодороги, которая равняется 571 м приведет к значительным материальным затратам на его восстановление. Таким образом, согласно пункту 7.2.5, осыпной риск на участке является «очень высокий» - (R1).



Рис.17. Участок Шидз (фотография от местного жителя)

Вамар

На исследуемом участке автодороги опасными процессами являются осыпь, затопление и боковая эрозия. на крутых склонах, существует риск образования осыпей или обвалов. Это связано с различными факторами, такими как накопление напряжений в горных породах, изменения влажности и температуры, а также действие гравитационной силы. Землетрясения является одним из катализаторов для осыпей, так как они могут вызывать разрывы и перемещения пород. Эрозия вызывается действием воды, ветра или гравитации, которые постепенно разрушают поверхность склона и переносят материал вниз. Это создает опасные условия для окружающей местности. Смещение осыпа всегда происходит при землетрясениях.

Согласно таблице 1 (подраздел 7.2), вероятность смещения на участке характеризуется как «весьма возможный» - (P2). В ходе ожидаемого смещения будет полностью разрушена одна полоса движения (D2), т.е. может повлечь за собой серьезный ущерб для объекта дорожного хозяйства, но создает малую угрозу здоровью людей и окружающей природной среде. Протяженность осыпного участка вдоль автодороги, которая равняется 822 м приведет к значительным материальным затратам на его восстановление. Таким образом, согласно пункту 7.2.5, осыпной риск на участке является «высоким» - (R2).

Таблица 6

Описание категорий осыпного риска опасных участков

Участки	Обозначение категории осыпного риска	Качественная характеристика осыпного риска
Дехрушан	R3	Средний
Барзуд	R3	Средний
Шидз	R1	Очень высокий
Вамар	R2	Высокий

Заключение

Проведенный анализ и оценка инженерно-геологических процессов на автодороге Рушан-Хорог позволили выявить ряд критически важных аспектов, влияющих на безопасность и эксплуатационные характеристики данной транспортной артерии. В результате исследования были детально описаны инженерно-геологические условия исследуемой территории, проведено районирование участков по их инженерно-геологическим условиям, а также выполнена количественная и качественная оценка устойчивости склонов потенциально-опасных участков.

Было выявлено пять потенциально-опасных участков, среди которых участок Шидз оказался наиболее опасным. Основные геологические процессы, оказывающие негативное влияние на устойчивость данных участков, включают лавины, сели, камнепады, осыпи, обвалы, боковую эрозию реки и затопление. Для обеспечения безопасной эксплуатации автодороги Рушан-Хорог необходимо разработать и внедрить комплекс мероприятий по борьбе с этими инженерно-геологическими процессами.

Для обеспечения безопасной эксплуатации автодороги Рушан-Хорог необходимо реализовать комплекс мероприятий, направленных на борьбу с инженерно-геологическими процессами. Важно установить лавинозащитные галереи и барьеры, а также создать лавинные каналы для безопасного схода лавин. С целью предотвращения селевых потоков рекомендуется строительство селезащитных дамб и резервуаров, укрепление склонов с использованием геосинтетических материалов и установка системы дренажа. Для предотвращения камнепадов и осыпей следует монтировать защитные сетки и барьеры, регулярно осматривать и удалять нестабильные камни, а также применять методы цементации и укрепления склонов. Укрепление откосов, террасирование и использование анкеровки помогут стабилизировать склоновые процессы.

Боковая эрозия реки требует укрепления берегов с использованием габионных конструкций и бетонных подпорных стен, регулирования русла реки и восстановления растительности вдоль береговой линии. Для предотвращения затоплений необходимо строительство дренажных систем, поднятие уровня дорожного полотна на затопляемых участках и регулярный мониторинг уровня воды в реках и водоемах. Внедрение данных мероприятий позволит значительно повысить устойчивость и безопасность автодороги Рушан-Хорог, снизив риски, связанные с лавинами, селями, камнепадами, осыпями, обвалами, эрозией и затоплениями.

Внедрение данных мероприятий позволит значительно повысить устойчивость и безопасность автодороги Рушан-Хорог, снизить риски, связанные с потенциально-

опасными процессами, и обеспечить надежную эксплуатацию транспортной инфраструктуры на долгосрочную перспективу.

Список литературы

1. Буданов В.И., Расчленение стратифицированных и интрузивных образований Таджикистана, Изд-во «Дониш», Душанбе 1976
2. Геотехнический отчет автодороги Рушан-Варшез-Хорог, Министерство транспорта республики Таджикистан, 2022
3. Геологическая карта СССР, Масштаба 1:200000, Серия Памирская, М: Изд-во Москва 1970
4. Геологическая карта СССР, Масштаба 1:200000, Серия Памирская. М: Изд-во Москва 1978
5. Золотарев Г.С. Методика инженерно-геологических исследований; Учебник. – М: Изд-во МГУ, 1990
6. Золотарев Г.С. Инженерная геодинамика. Учебник. – М: Изд-во МГУ, 1983
7. Инженерная геология СССР Том 7. Средняя Азия. Под ред. Х.Т. Туляганов. М: Изд-во Москва, 1978
8. Лоскутов И.П., Трофимов Е.И. Природа Памира в четвертичное время, Учебник - Л., Наука. 1971
9. Ищук Н.Р, и др./Комплексные режимные инженерно-геологические и гидрогеологические наблюдения в районе Рушан, 2022
10. Н.Г. Власов, Ю.А. Дьяков., Геологическая карта Таджикской ССР и прилегающих территорий, 1984
11. Отраслевой дорожный методический документ 218.2.030-2013, Методические рекомендации по оценке оползневой опасности на автомобильных дорогах, Москва 2013
12. Отчет по реконструкции автомобильной дороги Рушан-Хорог, Министерство Транспорта, Душанбе, 2019
13. Отчет по геологическому исследованию Рушанской ГЭС в Таджикистане, ООО «Кашф», Душанбе 2018
14. Оценка риска опасных природных процессов в высокогорных областях Западного Памира. Под ред. Хушнуд Назришоев. М: Издатель Доленко, 2011
15. СП 47.13330.2016 Приложение Г (“Категории сложности инженерно-геологических условий”)
16. Чернер Э.С. Тематические работы по тектонике Памира, 1972

Интернет-ресурсы

17. (<https://docs.cntd.ru/document/1200098295>)
18. (<https://gst.tj/geologiya/ekzogennye-protsessy.html>)

19. <https://tnu.tj/DisserPhD/6D.KOA-053/KodirovAA/KodirovAA.pdf>
20. (<https://files.stroyinf.ru/Data1/5/5157/index.htm#i417732>)
21. (<https://docs.cntd.ru/document/456045544/titles/8Q40LU>)