

Отчет о НИР

Бассейн р. Гижгит (Северный Кавказ): селевая опасность и риски для хвостохранилища ТГОК



Исполнители:

PhD Деркачева Анна Андреевна
НИУ ВШЭ / ИГ РАН

к.г.н. Гуринов Артем Леонидович
ИГ РАН / Географический ф-т МГУ им. М.В.Ломоносова

к.г.н. Юдина Виктория Антоновна
Географический ф-т МГУ им. М.В.Ломоносова

Общее руководство:

д.г.н. Голосов Валентин Николаевич
ИГ РАН / Географический ф-т МГУ им. М.В.Ломоносова

Финансирование:

Грант РФФ #19-17-00181-Р

Аннотация

В середине прошлого столетия долина реки Гижгит (Кавказ, республика Кабардино-Балкария) в устье была перегорожена хвостохранилищем Тырныузского ГОКа (ТГОК). Сама река была признана неселеопасной, а отвод речного стока в обход хвостохранилища был организован с помощью тоннеля. После двух селевых паводков в начале XXI в., оказавших влияние на функционирование водопропускного тоннеля, были высказаны опасения о каскадном риске для хвостохранилища и его дамбы в случае новых селевых явлений. В данном отчете собраны и систематизированы архивные и авторские материалы о характере и механизмах современных экзогенных процессов в долине р. Гижгит, имеющих отношение к зарождению селевых потоков, а также сделаны попытки оценить степень их современной опасности для гидротехнических сооружений.

Ключевые слова: Гижгит, Кавказ, экзогенные процессы, селевая опасность, хвостохранилище.

Abstract

In the middle of XX century, the Gizhgit River valley (Caucasus Mountains, Republic of Kabardino-Balkaria, Russia) was blocked at the mouth by the tailings dump of the Tyrnyauzsky mining factory. The debris flow hazard on the river was considered insignificant at that time; thus, the river flow was organized by means of an underground tunnel. By the 20s of the XXI century, two times the debris flows affected the entrance of the tunnel. This has caused concern of the cascade NaTech risk to the tailing site and its dam in the case of a new debris flow. This report collects and arranges archival information and research results concerning the nature and mechanisms of contemporary exogenous processes in the Gizhgit valley that are related to debris flow formation. In addition, we made an attempt to to assess the threat posed by these processes to hydraulic engineering facilities.

Keywords: Gizhgit, Caucasus, exogenous processes, debris flow hazard, tailings site.

Резюме для лиц, принимающих решения

В 1960-х годах Тырныаузский горно-обогатительный комбинат (ТГОК, Эльбрусский район, республика Кабардино-Балкария) создал крупное хвостохранилище в устье реки Гижгит. В то время проектная организация сочла, что река не является селеопасной, и пропуск ее стока был организован через подземный тоннель. В 2000 году комбинат обанкротился, оставив хвостохранилище объемом в миллион кубометров и гидротехническую инфраструктуру (ГТС) без надзора и обслуживания.

Начало XX века ознаменовалось для водопропускного тоннеля двумя сильными, селевыми паводками (2002 г. и 2014 г.). В 2002 г. принесенные наносы даже перекрыли возможность стока через тоннель и вода уходила непосредственно в пруд хвостохранилища. В научном и инженерном сообществах были выражены опасения, что при неблагоприятном развитии событий такого рода сброс воды в хвостохранилище может привести к такому росту уровня воды в нем, что начнется перелив через край, последующая неконтролируемая эрозия тела плотины и, в финале, ее коллапс. Текущее состояние плотины по косвенным признакам также вызывает беспокойство.

В данной работе мы рассмотрели современные природные условия в долине реки Гижгит и ряд склоновых процессов, которые могут участвовать в формировании селей и селевых паводков, чтобы оценить современную селевую опасность. Основное внимание уделялось водопропускному тоннелю, так как именно его функционирование будет определять развитие событий в пруду-отстойнике хвостохранилища. Вместе с тем, детальному анализу подверглась вся территория: использовались космические и БПЛА снимки за разные годы, математическое моделирование, пешие обследования с измерениями на местности и другие методы.

Долина реки Гижгит протягивается на два десятка километров и имеет значительный перепад высот. Ее верховья представляют собой типичные альпийские пейзажи. Крутые склоны и многочисленные выходы грунтовых вод на них приводят здесь к активному проявлению склоновых процессов (оползней, эрозии), которые при сильных дождях регулярно перерастают в сели на притоках Гижгита. Однако небольшая площадь их водосборов препятствует формированию крупных селей. А особенности рельефа русла Гижгита не позволяют даже сформировавшимся крупным селям спускаться далеко по долине. Таким образом, верховья долины имеют высокую селевую активность, но она не представляет опасности для гидротехнической инфраструктуры в низовьях.

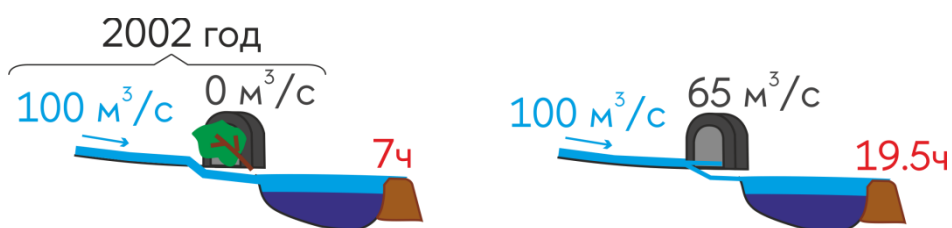
В противовес верховьям, склоновые процессы в непосредственной близости от тоннеля представляют реальную угрозу для его функционирования. На участке русла по течению выше тоннеля, а также непосредственно над порталом тоннеля, существуют нестабильные оползни, которые при переувлажнении способны превращаться в разжиженную массу. Они лежат на крутом борту долины и иногда “стекают” прямо в русло реки, в результате чего могут формироваться плотины в несколько метров высотой и ограниченные ими подпрудные озера. Прорыв такого озера порождает сели или паводок с большим количеством наносов, которые способны заблокировать сток в тоннель. При этом типичный расход воды у формирующейся прорывной волны больше, чем проектная пропускная способность тоннеля.

Помимо грунтовых запруд и наносов, современной проблемой стала растительность в русле Гижгита. Во времена проектирования хвостохранилища днище долины было свободно, а сейчас оно окаймлено густым пойменным лесом на протяжении десятка

километров. Стволы упавших деревьев тоже формируют запрудные плотины в русле реки, а также могут перегораживать портал тоннеля.

Для паводка 2002 г. косвенные оценки расхода воды в реке составляют $100 \text{ м}^3/\text{с}$ [Запорожченко, Докукин, 2019]. Согласно нашим расчетам, при полностью заблокированном водопропускном тоннеле и современном уровне воды в пруду-отстойнике, такой постоянный расход в реке приведет к переливу воды через основную дамбу хвостохранилища, вызывающему наибольшие опасения, через 7 часов. Сопоставимая продолжительность сильных осадков в регионе представляется возможной. Сохранение полной пропускной способности тоннеля при таком же расходе реки увеличит это время до 19 часов. Осадки нужной интенсивности и продолжительности являются крайне маловероятным сценарием. Учитывая проблемы со строительством канала аварийного сброса из хвостохранилища, сооружения и меры для стабильного обеспечения пропускной способности портала тоннеля должны стать приоритетными в краткосрочной перспективе.

За прошедшие более чем полвека с момента проектирования ГТС, в долине изменились и локальный климат, и земельный покров. Согласно прогнозам и наблюдающимся трендам, здесь становится все теплее, а осадки все чаще будут выпадать в виде интенсивных дождей. Наряду с этим, русло активно зарастает лесом, а многие склоны деградировали из-за интенсивного выпаса. Такое сочетание факторов позволяет предположить, что уровень селевой опасности в низовьях долины будет продолжать расти в будущем, а значит для обеспечения надежного функционирования ГТС должны приниматься инженерные и управленческие меры.



Оценка времени, необходимого для начала перелива через дамбу хвостохранилища при фиксированном расходе воды в р.Гижигит и различном состоянии входного портала водопропускного тоннеля: полностью заблокированном (слева) и полностью функционирующим (справа).

Оглавление

| | |
|--|----|
| Аннотация | 1 |
| Abstract | 1 |
| Резюме для лиц, принимающих решения | 2 |
| Введение | 6 |
| 1. Методика и данные | 7 |
| 1.1. Пространственные данные и методики их обработки | 7 |
| Космические снимки | 7 |
| Цифровая модель рельефа и морфометрические расчеты | 8 |
| Материалы БПЛА-съемки | 9 |
| Внешние векторные данные | 10 |
| 1.2. Полевые работы | 11 |
| 1.3. Селевое и гидродинамическое моделирование | 12 |
| Транспортно-сдвиговая модель (FLOVI) | 12 |
| Гидродинамическая модель (FLO-2D) | 12 |
| 2. Объект исследования | 13 |
| 2.1. Хвостохранилище (оз. Гижгит) и ГТС | 13 |
| 2.2. Физико-географические условия бассейна р. Гижгит | 16 |
| Геологическое строение и рельеф | 16 |
| Климат | 18 |
| Растительность | 20 |
| Гидрология | 22 |
| Современные экзогенные процессы | 25 |
| Селевая активность | 27 |
| 3. Результаты | 30 |
| 3.1. Ландшафты суббассейнов и фасеток склонов долины | 30 |
| 3.2. Опасные явления гравитационно-гидрологической природы | 34 |
| Верховья долины | 34 |
| Участок долины около портала водопропускного тоннеля | 37 |
| Заключение | 44 |
| Дополнительные сведения | 46 |
| Благодарности | 46 |
| Доступность данных | 46 |
| Финансирование | 46 |

| | |
|---|----|
| Вклад авторов | 46 |
| Список литературы | 47 |
| Приложения | 49 |
| П1. Картографические материалы | 49 |
| П2. Дендрохронологические образцы | 60 |
| П3. Измерения расходов воды в р.Гижгит | 61 |
| П4. Лабораторные испытания грунтов | 62 |
| П5. Фотографии местности | 67 |
| П6. Расчет времени начала перелива оз. Гижгит через плотину | 71 |

Введение

Проживание и хозяйственная деятельность в горах всегда была, есть и будет сопряжена с необходимостью принятия во внимание большого количества опасных природных процессов. Некоторые из них специфичны именно для горных территорий, характеризующихся крутыми склонами, обилием незакрепленного рыхлого материала, интенсивными осадками и стремительным подъемами уровня воды в реках. На стыке перечисленных характеристик рождается один из характерных для горных районов опасных процессов – сели.

Сели и селевые паводки – смесь в разных пропорциях водной составляющей и влекомых наносов разных размеров – могут представлять серьезную проблему для хозяйственного освоения горных долин, особенно если требуется расположить объекты инфраструктуры близко к руслу потенциально селеопасной реки. При этом во многих местах, представляющихся благоприятными для хозяйственного освоения, они являются событиями не частыми, а значит не оставляющими очевидных воспоминаний у местного населения и сложно прогнозируемыми. Дополнительно, в современную эпоху вероятность их возникновения и интенсивность протекания могут трансформироваться вслед за локальными изменениями климата (в первую очередь, изменениями режима выпадения осадков) и практик землепользования. Особенно опасным может стать сочетание недоучета исторического селевого потенциала территории и его современной интенсификации для объектов промышленной инфраструктуры с длинным жизненным циклом, оставшихся бесхозными в результате экономических кризисов.

Крупнейшее из хвостохранилищ Тырнаузского ГОКа (Приэльбрусье, Кавказ), наполнявшееся более 30 лет в процессе работы вольфрамового комбината, является примером таких объектов. Созданное в середине прошлого века в устье реки Гижгит, последние два десятилетия указанное хвостохранилище и комплекс сопутствующих гидротехнических сооружений не имеют владельца и находятся без адекватного обслуживания. При проектировании сооружений река Гижгит была признана неселеносной и отвод ее стока был организован через подземный тоннель – в обход пруда-отстойника (именуемого теперь у местных жителей, туристов и на картах “озеро Гижгит”). Долгое время здесь не происходило инцидентов, однако в 2002 г., после сильных ливней, портал тоннеля был заблокирован наносами (отложения на прилегающей площадке достигали мощности нескольких метров), а русло реки мигрировало. В результате, речной сток стал уходить непосредственно в хвостохранилище. Еще одно событие со значительными расходами произошло в 2014 г. На их фоне в научном и инженерном сообществах были высказаны опасения, что проблемы с водопропуском по тоннелю могут обернуться критическим развитием событий на основной 168-метровой плотине хвостохранилища, вплоть до ее разрушения [Анаев, 2021; Гегиев и др., 2018; Запороженко, Докукин, 2019; Шерхов, Гергокова, 2022].

На сегодняшний день не существует всесторонних и актуальных оценок селевой опасности долины в целом и для водопропускного тоннеля в частности. В данной работе, не претендуя на полноту и исключительность, мы собираем и систематизируем доступные материалы по этой территории с целью расширить понимание характера современных экзогенных процессов, действующих в долине и имеющих отношение к механизмам зарождения селевых потоков, а также, чтобы оценить степень опасности последних для гидротехнической инфраструктуры (ГТС). Помимо поиска и анализа сохранившихся

архивных измерений, описаний и аэрокосмических снимков, нами были выполнены полевые исследования и проведено математическое моделирование для ряда сценариев.

Полученные результаты могут стать отправной точкой для объективного пересмотра вопроса селевого риска для ГТС хвостохранилища и планирования более детальных изысканий, в том числе в целях инженерной защиты территории.

1. Методика и данные

1.1. Пространственные данные и методики их обработки

В качестве источников пространственных данных преимущественно использовались открытые материалы среднего и высокого разрешения; также для некоторых локальных участков в ходе полевых работ 2022 и 2023 гг. были созданы сверхвысокодетальные материалы с использованием БПЛА-съемки.

Космические снимки

- *Corona/KeyHole* от 13.08.1967, 3x4 м/пикс, и 20.09.1971, 2x4 м/пикс – черно-белые архивные снимки военной разведывательной программы США 1960х-1970х гг., рассекреченные и выложенные в свободный доступ на сайте NASA EarthExplorer¹. Исходные кадры снимались под углом, для создания стереопар, с разрешением на местности около 2 м/пикс. Снимки были привязаны вручную методом резинового листа по нескольким десяткам точек для каждого из двух снимков. Так как сложный рельеф создает неравномерные искажения, добиться высокого качества привязки не удалось; материалы подходят для визуального дешифрирования и сравнения с другими снимками, однако не могут быть использованы для оцифровки контуров, расчета площадей и других точных работ.
- *Sentinel-2* от 16.07.2021, 10 м/пикс (см. Приложение П1-2) – мультиспектральные снимки, получаемые и свободно распространяемые Европейским Космическим Агентством в рамках программы Copernicus². Четыре спектральных канала (RGB + NIR) имеют разрешение 10 м. Снимки уровня обработки L2A поставляются с радиометрической, геометрической и атмосферной коррекцией; они могут использоваться как для геометрических расчетов, так и для работы со спектральными характеристиками. Данный снимок использовался для: (i) расчета спектрального индекса растительности NDVI³; (ii) автоматизированного дешифрирования покрова древесно-кустарниковой растительности; (iii) создания карты коэффициента шероховатости W, необходимой в расчетах *Индекса связанности потоков наносов* (см. ниже), на основе контура древесно-кустарниковой растительности и 4 категорий NDVI.

¹ NASA EarthExplorer <https://earthexplorer.usgs.gov>

² ESA Copernicus <https://dataspace.copernicus.eu>, для доступа может потребоваться VPN

³ Ознакомиться с теоретическими основами NDVI можно, например, здесь <https://gis-lab.info/qa/ndvi.html>

- *Google Earth Pro*⁴ и *ESRI World Imagery*⁵ от 2007, 2013, 2018, 2019, 2020, 2021 гг., <1 м/пикс – указанные ресурсы предоставляют возможность просмотра высокодетальных снимков, а так же поиска даты съемки. Глобальное покрытие Земли сшивается из данных на различные даты от различных спутниковых систем субметрового разрешения, таких как WorldView, GeoEye или Ikonos. Данные, предоставляемые в Google Earth Pro, обычно не имеют качественной геометрической коррекции за рельеф; превью на интересующие даты и участки скачивались и привязывались по методу резинового листа; такие материалы ограниченно использовались для выполнения измерений или векторизации границ. Материалы ESRI World Imagery имеют геометрическую коррекцию за рельеф и использовались без ограничений.

Цифровая модель рельефа и морфометрические расчеты

В материалах исследования используется производная от цифровой модели рельефа (ЦМР)⁶ SRTM, созданная Японским Космическим Агентством для первичной топографической коррекции своих радарных снимков:

- *SRTM/AP*⁷, 12.5 м/пикс – производная от ЦМР модель SRTM (исходное разрешение на исследуемой территории около 27 м/пикс), полученная методом повышающей дискретизации (англ. *upsampling*), с последующей коррекцией ошибок и заполнением пропусков. Доступна для скачивания в виде сопроводительных данных к радарным снимкам ALOS Palsar.

На основе указанной ЦМР был произведен ряд морфометрических расчетов:

- *Суббассейны* (см. Приложение П1-1) были построены с использованием инструментов ПО ArcGIS Spatial Analyst Toolbox - Hydrology, использующих однонаправленный алгоритм определения направления стока D8 [O’Callaghan, Mark, 1984]. Они были построены для всей площади бассейна р. Гижигит с замыкающим створом в водопропускном тоннеле, с минимальной площадью выделения 10 га. Предварительная обработка ЦМР для обеспечения гидрологической корректности включала заполнение локальных понижений и согласование направления стока с водотоками, оцифрованными с высокодетального снимка.
- *Средние уклоны русел* (см. Приложение П1-9) вычислялись для сегментов сети водотоков, созданных на этапе гидрологической коррекции ЦМР.

⁴ Google Earth <https://earth.google.com>, настольное ПО Google Earth Pro позволяет просматривать архивные высокодетальные снимки

⁵ ESRI World Imagery <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=10df2279f9684e4a9f6a7f08febac2a9#>

⁶ Цифровая Модель Рельефа (ЦМР) – цифровое представление поверхности земного рельефа. В отличие от нее, Цифровая Модель Местности (ЦММ) передает совокупность неровностей поверхности, включая себя объемы зданий, деревьев и других объектов на поверхности грунта. Для моделей среднего и мелкого разрешения эти понятия зачастую используют как взаимозаменяемые, однако для детальных моделей разница принципиальна.

⁷ Данные доступны для скачивания на <https://search.earthdata.nasa.gov/search/>. Технические описания создания и использования данных повышенного разрешения доступны в https://asf.alaska.edu/wp-content/uploads/2019/03/rte_product_guide_v1.2.pdf, https://asf.alaska.edu/wp-content/uploads/2019/03/rte_atbd_v1.2_final.pdf

- *LS-фактор* (см. Приложение П1-5), являющийся произведением длины склона на его крутизну, широко используется в работах по потенциалу развития водной эрозии и склоновых процессов. Чем выше значение фактора, тем выше потенциал для развития этих процессов. В данной работе LS-фактор рассчитывался в модификации для горных бассейнов с ограничением на длину склона 100 м [Schmidt, Tresch, Meusburger, 2019].
- *Индекс связанности потоков наносов* (англ. *Index of Sediment Connectivity, IC*) отражает в безразмерном значении благоприятность местности для возникновения и перемещения водотоками наносов до заданной точки [Cavalli et al., 2013]. Крутые склоны и большая площадь бассейна, а значит больший объем стекающей воды, являются благоприятными для транспортировки наносов; а такие факторы как локальное выполаживание или повышение шероховатости поверхности препятствуют ей. IC был рассчитан для портала водопропускного тоннеля (см. Приложение П1-6) и самого русла Гижгита на всем его протяжении (см. Приложение П1-7). Расчеты выполнялись в открытом ПО SedInConnect [Crema, Cavalli, 2018]. Одним из ключевых параметров, требующих настройки при расчетах, является коэффициент шероховатости W . В нашем случае шероховатость, извлекаемая из ЦМР, как в оригинальной работе [Cavalli et al., 2013], не годится, из-за низкой детальности последней; а C -фактор из модели RUSLE, также иногда используемый как оценка шероховатости, будет работать хуже, чем гидравлические коэффициенты Маннинга [Martini, Cavalli, Picco, 2022]. В итоге, мы использовали подход с адаптацией коэффициентов Маннинга по классам земельного покрова [Zanandrea, Michel, Kobiyama, 2020] (Таблица 1). Пространственное распределение классов было построено с использованием снимка Sentinel-2 (см. Рисунок 10).

Таблица 1 Типы земельного покрова в долине р. Гижгит и использованные значения коэффициента шероховатости W

| Тип покрова | Коэф. Маннинга n | Коэф. шероховатости $W = 0.01/n$ | Базовые данные |
|--|--------------------|----------------------------------|---|
| Открытые грунты в горной местности (преимущественно, крупновалунные) | 0,05 | 0,200 | NDVI < 0.2 |
| Горные луга с низким ПП | 0,1 | 0,100 | 0.2 < NDVI < 0.6 |
| Пастбища и луга с низким NDVI | 0,2 | 0,050 | 0.6 < NDVI < 0.8 |
| Пастбища и луга с высоким NDVI | 0,25 | 0,040 | NDVI > 0.8 |
| Сомкнутый древесно-кустарниковый покров | 0,4 | 0,025 | контролируемая кластеризация в ПО ArcGIS Classification Toolbox |

Материалы БПЛА-съёмки

БПЛА-съёмка производилась для нескольких локальных участков (см. Приложение П1-3). Она выполнена квадрокоптерами Phantom-4 Pro v2 и DJI Mavic Pro v1 в ручном режиме контроля галсов, с переменной высотой полета (для компенсации больших перепадов рельефа), с перекрытием кадров не менее 60%. Сбор контрольных точек независимым GPS для коррекции и оценки точности геометрической привязки не выполнялся. Обработка кадров для построения ЦММ⁶ и ортофотоплана проведена в ПО Agisoft Metashape.

- Ортофотоплан (0.05 м/пикс) и ЦММ (0.1 м/пикс) от 30.07.2023 на русло р. Гижгит в низовьях долины, 800 м вверх по течению от моста;
- Ортофотоплан (0.2 м/пикс) и ЦММ (0.4 м/пикс) от 30.07.2023 на часть низовой долины, 3 км вверх по течению от моста;
- Ортофотоплан (0.3 м/пикс) и ЦММ (0.6 м/пикс) от 26.07.2022 на верхнюю часть плотины хвостохранилища.

Для первых двух указанных участков были построены интерполяционные ЦМР, исключаящие из модели древесно-кустарниковую растительность (Рисунок 1). Для этого в рабочем экстенде создавалось густое покрытие точек на безлесных участках, высота для которых определялась по исходной ЦММ. На залесённых участках с выраженным изменением рельефа проставлялись дополнительные точки, с экспертной оценкой высоты на основе соседних безлесных участков и полевых данных (о мощности и местоположении селевых террас, характере поймы и склонов, и т.д.). Точки по руслу реки добавлялись для контроля гидрологической корректности итоговой поверхности (обеспечения стока с точки зрения вычислительных алгоритмов). На последнем шаге из созданных точечных данных выполнялось обратное восстановление рельефа методом интерполяции Торо То Растер в ПО ArcGIS. Для компенсации ошибок описанного подхода и подавления локального шума, выходное горизонтальное разрешение на один порядок ниже, чем у исходных материалов. В итоге созданы “истинные” ЦМР, имеющие отклонение до 10-15 м в местах развития древесной растительности, что соответствует наблюдаемому на местности:

- ЦМР (1 м/пикс) от 30.07.2023 на прирусловую зону р. Гижгит в низовьях долины;
- ЦМР (4 м/пикс) от 30.07.2023 на часть низовой долины.

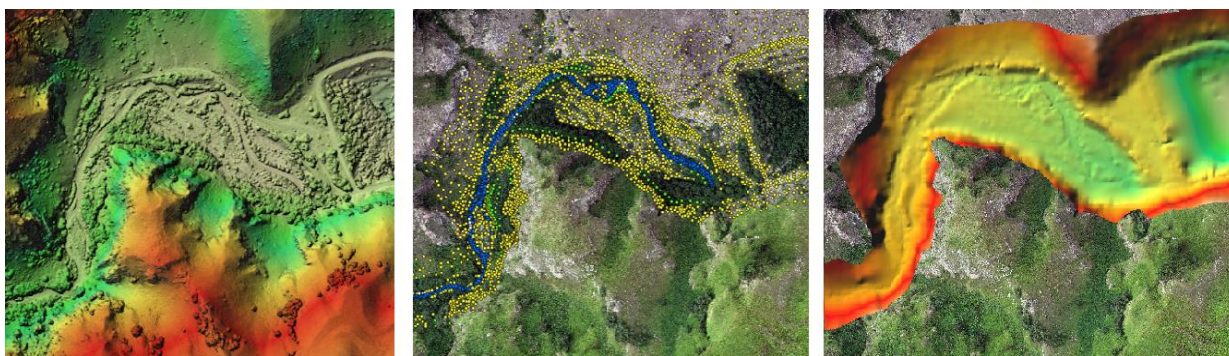


Рисунок 1. Фрагмент БПЛА-материалов. Слева: исходная ЦММ (0.1 м/пикс) с отмывкой. По центру: точки для восстановления ЦМР на фоне ортофотоплана. Справа: восстановленная ЦМР (1 м/пикс) с отмывкой на фоне ортофотоплана.

Внешние векторные данные

В работе использовались два набора векторных данных, взятых с ресурса OpenStreetMap⁸:

- Дорожная сеть⁹ – использовалась в справочных целях и для визуализации;

⁸ OpenStreetMap (OSM) <https://www.openstreetmap.org/about>

⁹ Авторы обращают внимание, что реальная проходимость некоторых участков обозначенных грунтовых дорог в долине Гижгита и окрестностях сильно зависит от погодных условий; представленные картографические материалы не могут использоваться для планирования маршрутов.

- *Древесно-кустарниковая растительность* – по результатам визуальной оценки данный слой признан хорошо и полно отражающим развитие покрова на примерно 2007 г. Эти данные использованы для оценки динамики растительности по отношению к 2021 г. (снимок Sentinel-2).

1.2. Полевые работы

В ходе полевых работ в бассейне р. Гижгит в июле 2023 г. проводился комплекс исследований, включавший в себя: общее маршрутное описание местности (рельеф и геологическое строение, растительность и т.д.), отбор образцов грунта и дендрохронологических образцов, а также измерения расходов воды в русле Гижгита. Полевые маршруты охватывают 2 ключевых участка в пределах бассейна (см. Приложение П1-3), которые, согласно предварительному анализу данных дистанционного зондирования, были оценены как наиболее опасные с точки зрения развития неблагоприятных экзогенных процессов: (i) верховья бассейна с альпийским рельефом, (ii) нижнее течение - непосредственно около портала водопропускного тоннеля и других гидротехнических сооружений.

Полевые наблюдения позволили провести верификацию данных, полученных в ходе дешифрирования космических снимков, анализа ЦМР и другой информации, а также получить представление о наиболее вероятных механизмах развития селевых явлений и других неблагоприятных процессов в разных частях бассейна.

В ходе маршрутов было отобрано 7 проб грунта для проведения лабораторных испытаний, в том числе 3 образца ненарушенной структуры. Отбор последних проводился в отрезки ПВХ трубы диаметром 120 мм путем постепенного заглубления (вкапывания) пробоотборника в грунт до его заполнения, согласно методике ГОСТ 12071-2014 “Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов”. Отбор проб проводился на тех участках, которые, судя по непосредственным наблюдениям на местности, имеют наибольший потенциал для активизации оползневых и/или селевых процессов. Лабораторные испытания выполнялись для ряда характеристик – влажность, гранулометрический состав, угол внутреннего трения и других (Приложение П4. Лабораторные испытания грунтов).

Отбор дендрохронологических образцов производился с целью установления возраста древостоя на селевых террасах в окрестностях портала тоннеля методом поперечных спилов (Приложение П2. Дендрохронологические образцы). Для этого на интересующем участке выбиралось по 2 наиболее высоких (то есть потенциально наиболее взрослых) дерева. Спил проводился на высоте полуметра от земли, на участке ствола без веток и повреждений. В камеральных условиях спилы шлифовались, и производился визуальный подсчет годовых колец, с обеих сторон спила для контроля.

Измерения расходов воды проводились на трех створах в двух секциях долины гидрологической вертушкой в соответствии с методикой “скорость-площадь”. Методика подразумевает определение профиля поперечного сечения в створе на прямом участке русла и трехкратную повторность измерений скорости потока в стрежне (Приложение П3. Измерения расходов воды в р.Гижгит). Основной целью была общая оценка достоверности и современной репрезентативности более ранних (опубликованных и архивных) данных, а также расширение интерпретации полевых наблюдений местности.

1.3. Селевое и гидродинамическое моделирование

Транспортно-сдвиговая модель (FLOVI)

Для расчета характеристик селевых потоков в зоне зарождения использована транспортно-сдвиговая модель, предложенная Ю.Б. Виноградовым [Виноградов, 1980а; Виноградов, 1980б; Виноградов, Виноградова, 2010] и реализованная с доработками в программе FLOVI [Юдина, Юдин, Виноградова, 2022]. Уравнения модели разработаны в 1970-1980 гг. Ю. Б. Виноградовым на основе информации о процессах вовлечения горной массы в селевой поток, полученной в ходе Чемолганских экспериментов [Vinogradova, Vinogradov, 2017].

Модель основывается на уравнении, в котором расход твердого материала увеличивается по мере продвижения по очагу за счет вовлечения рыхлообломочного материала в поток. Рост расхода твердого материала прямо пропорционален коэффициенту неустойчивости (обратная величина коэффициенту устойчивости склонов) потенциального селевого массива (ПСМ) [Виноградов, 1980б], элементарной мощности потока и коэффициенту подвижности селевой массы. Исходными данными для моделирования являются морфометрические характеристики очага, такие как уклон и длина, количество поступившей воды и свойства горной породы – плотность потенциального селевого массива, угол внутреннего трения (динамический и статический), начальное увлажнение материала. Основные уравнения модели представлены в следующих работах [Юдина, Юдин, Виноградова, 2022; Vinogradova, Vinogradov, 2017]. Характеристики селеформирующих грунтов были определены на основе лабораторных испытаний полевых образцов. Результатами моделирования являются значения расхода твердого материала по длине очага, значения плотности селевой массы и гидрограф селевой волны, который в дальнейшем может использоваться как входные данные в гидродинамической модели FLO-2D.

Гидродинамическая модель (FLO-2D)

Для моделирования трансформации селевого потока в долине по мере его движения использовалась гидродинамическая модель FLO-2D [O'Brien, Julien, Fullerton, 1993]. В её основе лежит уравнения Сен-Венана, вычисления ведутся на регулярных прямоугольных расчетных сетках [Кюнж, Холли, Вервей, 1985; O'Brien, Julien, Fullerton, 1993]. Одной из важных особенностей модели является возможность расчета селевых потоков как низкой, так и высокой плотности. При моделировании движения селевого потока используется реологическая модель Бингама [O'Brien, Julien, Fullerton, 1993]. В качестве исходных данных обычно используются данные о рельефе местности, гидрографы селевого потока, фоновые расходы воды, объемная концентрация потока и реологические параметры селевого блока. По результатам моделирования получают карты пространственного распределения глубины и скорости потока. При моделировании селевых потоков использовались реологические параметры, предложенные авторами модели [O'Brien, Julien, 1988], так как имеющаяся приборная база не позволяет получать необходимые величины из полевых образцов.

2. Объект исследования

Долина реки Гижгит расположена в Эльбрусском районе Республики Кабардино-Балкария, в 30 километрах к востоку от горы Эльбрус, примыкая в верховьях к национальному парку Приэльбрусье (Рисунок 2). Река Гижгит, также имеющая в своих верховьях название Ташорун, относится к бассейну реки Терек, являясь левым притоком Баксана, в который впадает между городом Тырнаузом и селом Былым.

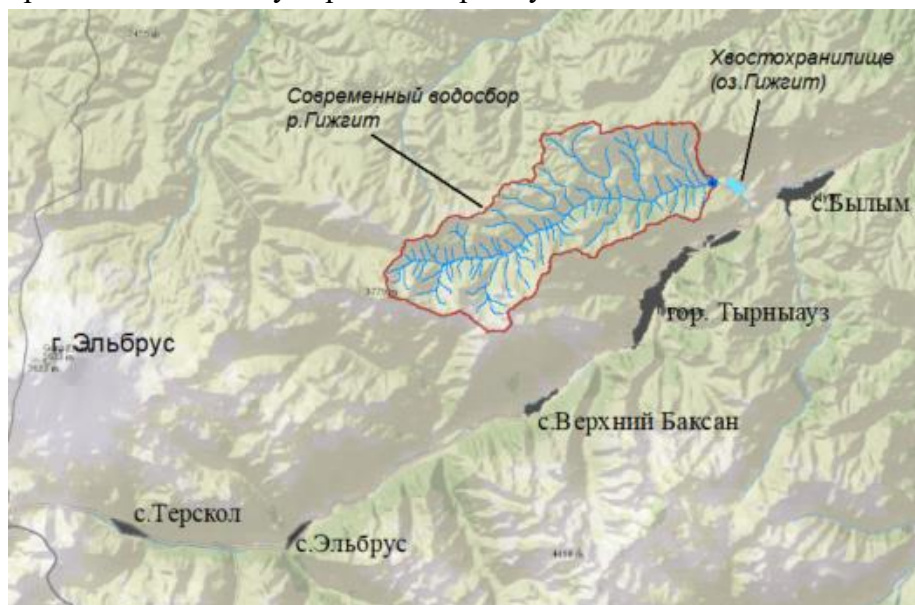


Рисунок 2. Местонахождение долины р. Гижгит

2.1. Хвостохранилище (оз. Гижгит) и ГТС

Хвостохранилище и сопутствующие гидротехнические сооружения в устьевой части р. Гижгит разрабатывались и создавались в середине XX в. для захоронения отходов молибденового Тырнаузского ГОКа методом гидравлического намыва. После банкротства ГОКа в начале 2000-х гг. весь комплекс ГТС не стоит на балансе какого-либо юридического лица. Разработкой проекта ГТС занимался Институт Гипроникель. К настоящему времени архивные отчеты и проектная документация утрачены; приводимые здесь описания сооружений даны по публикациям, в том числе сотрудников Института Севкавгипроводхоз, имевших доступ к исходным документам [Анаев, 2021; Гегиев и др., 2018; Запорожченко, Докукин, 2019; Шерхов, Гергокова, 2022].

Хвостохранилище, изначально локализованное вдоль левого борта р. Баксан (Рисунок 3), было введено в эксплуатацию в 1966 г. Его полная проектная емкость при заполнении до абсолютной отметки в 1300 м н.у.м. планировалась в 180 млн м³. Насыпная грунтовая плотина с дренажной системой наращивалась по мере необходимости, со временем полностью перегородив долину Гижгита (Рисунок 4). С 1997 г. заполнение хвостохранилища было прекращено, и итоговая высота плотины составила 168 м (1240 м н.у.м., 118 млн м³ хвостов), при длине 1400 м и ширине по гребню около 15 м. На сегодняшний день, по своим характеристикам материала исполнения и высоты, она относится к 1 классу опасности¹⁰. Средняя крутизна низового откоса дамбы, 12,5°,

¹⁰ СП 58.13330.2019 / СНиП 33-01-2003 “Гидротехнические сооружения. Основные положения”, где I класс – чрезвычайно высокий, IV класс – низкой опасности.

оценивается специалистами как критичная для возможного развития сдвигового процесса. В основании дамбы происходит постоянное высачивание воды, в том числе по полевым наблюдениям 2022 и 2023 гг. За плотиной сформировался постоянный водоем-отстойник, который получил у местных жителей и туристов наименование “озеро Гижгит”, и еще один малый водоем (пруд), выделившийся при разрастании плотины к востоку от основного водоема. Актуальная емкость озера Гижгит оценивается в 1-1.2 млн м³. В 2018 г., с выделением финансирования по Национальному Проекту “Экология”, был рекультивирован верхний сухой пляж, который долгое время являлся источником токсичной пыли из обсыхающего материала хвостов. С этого времени хвостохранилище и его ГТС больше не фигурируют в Перечне объектов накопленного экологического вреда¹¹, хотя известно, что токсичные химические соединения поступают в р. Баксан, грунтовые воды и окружающие экосистемы [Винокуров и др., 2018].

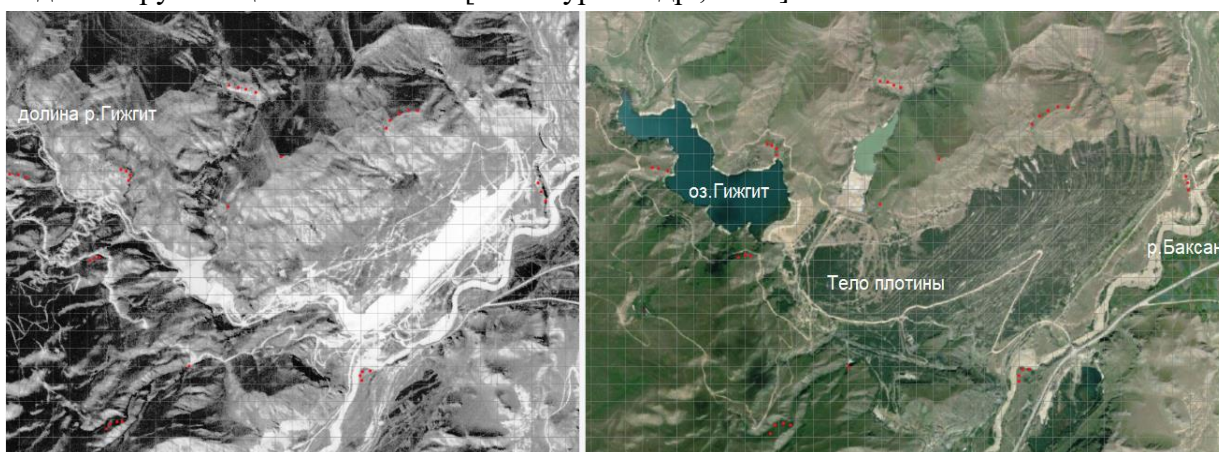


Рисунок 3. Космические снимки хвостохранилища. Слева: в 1967 г., через год после ввода эксплуатации (светлым тоном выделяются открытые грунты в русле р. Баксан и обсыхающие хвосты); справа: в 2019 г. Шаг сетки 100 м; красные маркеры - ориентиры между изображениями.



Рисунок 4. Верхний бьеф дамбы хвостохранилища. Слева: цифровая модель местности (2022 г.), в правой части видна отсечная дамба; ориентация на север, шаг сетки 100 м.

¹¹ https://mnr.gov.ru/opendata/7710256289-objects_of_accumulated_environmental_damage, дата обращения 02.06.2024.

Справа: фотография с места, отмеченного на левом изображении белой звездой. На обоих изображениях белый пунктир - урез воды, черный пунктир – габионная подпорная стенка, рыжий пунктир - начало недостроенного канала аварийного сброса.

В своих заключениях 1972 г. и 1989 г. Институт Гипроникель признал р. Гижгит неселеопасной и разработал тоннели в качестве водопропускных сооружений для сброса стока в обход водоема-отстойника¹². Сначала функционировал тоннель №1, затем №2 (действующий на данный момент), предусмотренный проектом более крупный тоннель №3 достроен не был. На момент остановки эксплуатации хвостохранилища, комплекс сооружений тоннеля №2 состоял из: (i) грунтовой подпорной плотины (она же дамба №2), формирующей припортальный аварийный пруд-накопитель; при проектной высоте 26 м, на 2023 г., после заполнения накопителя наносами, среднее превышение над уровнем русла Гижгита составляет 10 м (Рисунок 5); (ii) открытого лотка в теле плотины для аварийного сброса стока в сторону хвостохранилища по старому руслу реки; (iii) сороудерживающей решетки непосредственно на входном портале тоннеля (в настоящее время отсутствует); (iv) самого тоннеля, длиной 3.6 км при перепаде 210 м, с сечением 9м² и расчетной пропускной способностью 65 м³/с. Отметим, что указанный расход по некоторым оценкам соответствует современной 10%-ой обеспеченности [Запороженко, Докукин, 2019] (см. раздел 2.2 *Гидрология*), в то время как по нормативам для ГТС 1 класса опасности, включая примыкающие сооружения, должны закладываться расходы 0.1% в расчеты и 0.01% в поверку¹⁰.

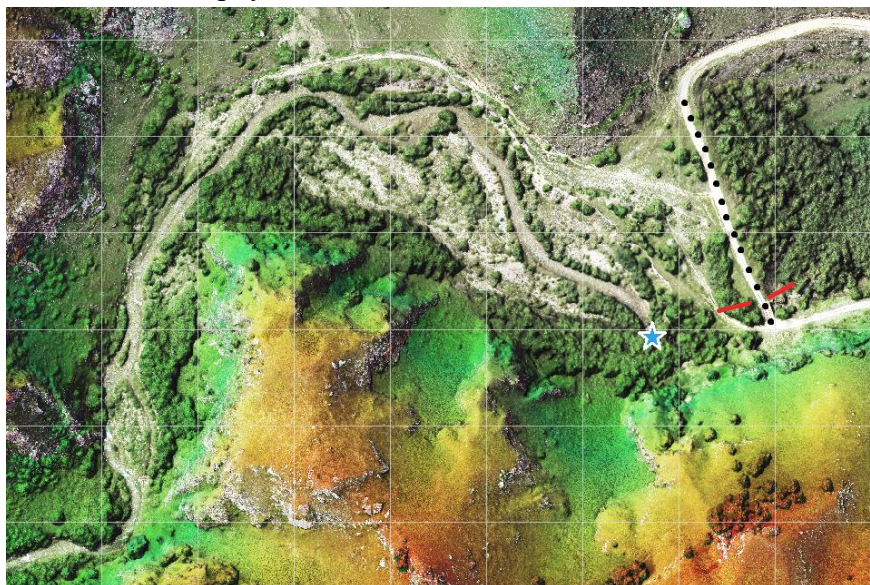


Рисунок 5. Цифровая модель местности на 2023 г. для участка у портала водопропускного тоннеля. Черный пунктир - автомобильная дорога, проходящая по гребню плотины, внешний откос которой зарос деревьями; красные маркеры - аварийный лоток под автомобильным мостом; синий маркер - портал тоннеля. Шаг сетки 50 м.

После селевого паводка 2002 г., приведшего к закупорке портала тоннеля, по верху основной плотины хвостохранилища соорудили дополнительную отсечную дамбу (Рисунок 4), призванную регулировать направление стока в случае перелива озера в

¹² По нормативам, на селеопасных реках нельзя ставить трубы и тоннели (СНиП 2.05.03-84 Мосты и трубы).

открытый канал по правому борту. Строительство последнего, инициированное Севкавгипропроводхозом, было заброшено вскоре после начала: при подрезке коренного склона активизировался оползень и перегородил часть канала. В настоящее время заявляется, что 2 раза в год проводятся плановые визуальные обследования ГТС при участии МЧС, а также внеплановые при существенном ухудшении погодных условий [Анаев, 2021].

2.2. Физико-географические условия бассейна р. Гижгит

Геологическое строение и рельеф

Бассейн реки Гижгит охватывает территорию, расположенную между Скалистым и Передовым хребтами. Здесь ярко проявляется асимметрия строения долины и морфологии долин притоков. В верховьях бассейна в строении рельефа большую роль сыграло горное оледенение. Здесь распространен как структурно-экзарационный рельеф (ледниковые цирки, ригели, кары и их склоны), так и аккумулятивные формы в днищах долин и цирков. Относительно молодые ледниковые образования встречаются в суббассейнах № 31, 35, 43 (руч. Суарык) и 45. Конечно-моренные комплексы в этих суббассейнах, судя по их морфологии, молодые и могли функционировать как каменные глетчеры еще в недавнем геологическом прошлом. В частности, в суббассейнах № 31 и 35, существуют образования в виде длинных языков, спускающихся из цирков и занимающих более 15% площади бассейнов. В краткосрочной перспективе эти образования можно считать стабильными. С 70-х годов изменения прослеживаются по космическим снимкам только на самых крупных из них и наиболее вероятно связаны с обвально-осыпными процессами на крутых откосах из незакрепленного материала; тенденции развития поверхностных или боковых озер и термокарста отсутствуют (Рисунок 6).

Большая часть бассейна Гижгита, в частности среднее и нижнее течение, не несет свежих признаков активной ледниковой моделировки. Рельеф здесь может быть охарактеризован как структурно-эрозионный.

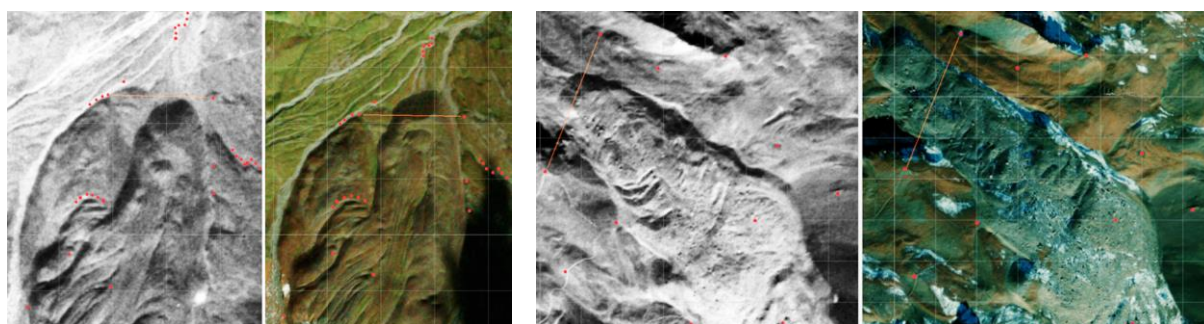


Рисунок 6. Моренные языки в бассейнах №31 (пара изображений *слева*) и №35 (пара изображений *справа*). Ч/б фрагменты - снимки Corona от 1971 г., цветные фрагменты – покрытие ArcGIS Imagery от 2019 г. Красные маркеры - идентичные ориентиры на местности. Шаг сетки 100м. Изображения имеют искажения за рельеф и деформации взаимной привязки.

Согласно данным Государственной Геологической Карты масштаба 1:200 000 [Геологическая карта, 2004], борта и днище долины сложены осадочными (сцементированными и несцементированными) и метаморфическими породами. Выходы магматических пород единичны (Приложение П1-4).

В геологическом строении долины Гижгита можно выделить 3 основных комплекса пород. В основании разреза залегают породы протерозойского метаморфического комплекса, представленные кристаллическими сланцами разного минерального состава, а также гнейсами и другими породами. Основной ствол долины Гижгита на значительном протяжении прорезает именно эту толщу и местами (ближе к нижнему отрезку) образует крутые скальные склоны, практически лишенные растительности и рыхлообломочного чехла.

На метаморфических породах верхнего протерозоя с несогласием залегают сильно дислоцированные осадочные и вулканогенно-осадочные палеозойские (девон-карбон) образования, которые относятся к грабен-синклинию Передового хребта. Породы палеозоя распространены в первую очередь в бассейнах верхних правых притоков Гижгита, спускающихся с крутых северных склонов Передового хребта, и представлены песчаниками, аргиллитами, алевролитами, мраморизованными известняками и другими. Они плотные, сильно литифицированные, а местами и метаморфизованные [Объяснительная записка, 2004].

Породы протерозоя и палеозоя системой разломов и трещин раздроблены на отдельные блоки. Территорию пересекает множество разломов, которые имеют преимущественную субмеридиональную и восток-юго-восточную ориентировку. Наиболее плотно они локализованы к югу от водосбора №11 (долина руч. Каштан). Местами разрывные нарушения выражены в рельефе и могут представлять интерес с точки зрения активизации современных экзогенных процессов. К разрывным нарушениям в приконтактной зоне интрузивных тел приурочены, судя по всему, гидротермальные изменения пород, что провоцирует, в том числе, смещение чехла грубообломочных отложений по склонам в бассейнах № 34 и 35 (Рисунок 7).



Рисунок 7. Слева: линейно вытянутые участки активизации склоновых процессов, приуроченные к зонам разрывных нарушений в бассейнах № 34 и 35. Справа: нижние части склонов правого борта в верховьях долины Гижгита подвержены процессам массового смещения рыхлообломочного чехла по механизму солифлюкции.

Верхнюю часть разреза составляют осадочные породы мезозоя, в основном юрского возраста, которые являются фоновыми для бассейнов левых притоков Гижгита. Слои

осадочных пород образуют аструктурные (куэстовые) уступы и гребни Скалистого хребта, ограничивающие бассейн Гижгита с севера. Отложения юры представлены неравномерным переслаиванием слабо консолидированных аргиллитов, алевролитов и песчаников, а также карбонатных пород (известняков и мергелей) в верхней части разреза, которые и образуют отвесные скальные уступы. Важной особенностью залегания осадочных породы мезозоя является пологое (10-15°) падение слоев на С и СВ, что хорошо видно на геологических картах и разрезах [Геологическая карта, 2004]. Эта особенность сказывается как на морфологии бассейнов ручьев-притоков (например, Каштан, Кабардинсу и др.), так и на перераспределении поверхностного и подземного стока, а также на специфике современных процессов в бассейне Гижгита. Левые притоки Гижгита протекают в основном с севера на юг/юго-восток – т.е. против направления падения слоев, что предопределяет не очень большую водность как самих ручьев, так и расположенных в их верховьях родников (участков разгрузки грунтовых вод). Вместе с тем, небольшие ареалы распространения юрских осадочных пород есть и на правобережье Гижгита, где направления падения пластов и течения ручьев в целом совпадают. В бассейне Гижгита два таких участка: (i) верховья р. Гижгит под перевалом Шаукол и (ii) нижние правые притоки Гижгита в районе урочища Кырбаши.

По всей долине, за исключением нивального пояса, наблюдаются выходы грунтовых вод, дешифрируемые на снимках, в том числе по смене растительности (Приложение П1-8). В силу особенностей геологического строения эти участки переувлажнены и часто подвержены оползневым процессам, а также массовому смещению рыхлого обломочного материала по склонам (местами и по механизму солифлюкции, Рисунок 7).

Климат

Рассматриваемая территория располагается в теплой влажной климатической области высокогорного Кавказа и демонстрирует выраженную высотную поясность и орографическую обусловленность количества тепла, ветров и осадков. Температура воздуха опускается в зимние месяцы ниже 0°C, но большую часть года остается положительной с наибольшими значениями в июле-августе. Осадки преобладают в виде дождей, имея в некоторых окрестных долинах более или менее выраженный максимум в мае-июле [Ледники и климат Эльбруса, 2020].

Детальная характеристика климата бассейна Гижгита, особенно осадков, затруднена по двум причинам. Во-первых, это горный бассейн довольно большого размера (порядка 130 км²), со значительной изменчивостью абсолютной высоты (от 1300 до 3700 м). То есть площадь бассейна больше, чем характерные размеры одного локального конвективного ливня, типичного для Кавказа источника интенсивных осадков. Во-вторых, в окрестностях нет метеостанций, которые, обладая длинными и надежными рядами измерений, покрывали бы разные высотные уровни. Близкие территориально и схожие по физико-географическим условиям м/с Тырныауз (ID 37206) и Гарабаши (ID 37207) – это автоматические станции, данные с которых стали поступать только с 2015 года¹³. Ниже приводятся данные по м/с Терскол (ID 37204), расположенной в одноименном поселке в долине Баксана у подножья Эльбруса на абсолютной высоте 2140 м¹⁴.

¹³ Также отметим, что по отзывам сотрудников ВНИИГМИ-МЦД, получаемые с указанных м/с данные имеют много пропусков и большие ошибки (личная коммуникация при запросе данных).

¹⁴ Текущее местоположение; метеостанция была перенесена в 1995 г.

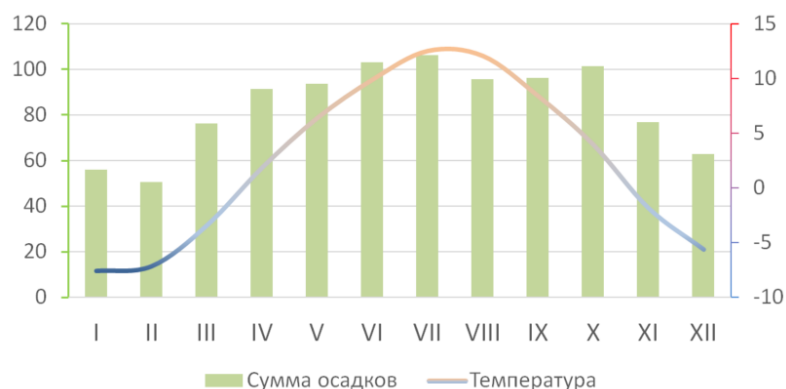


Рисунок 8. Средние многолетние температуры и суммы осадков на м/с Теркол в 1960-2018 гг.

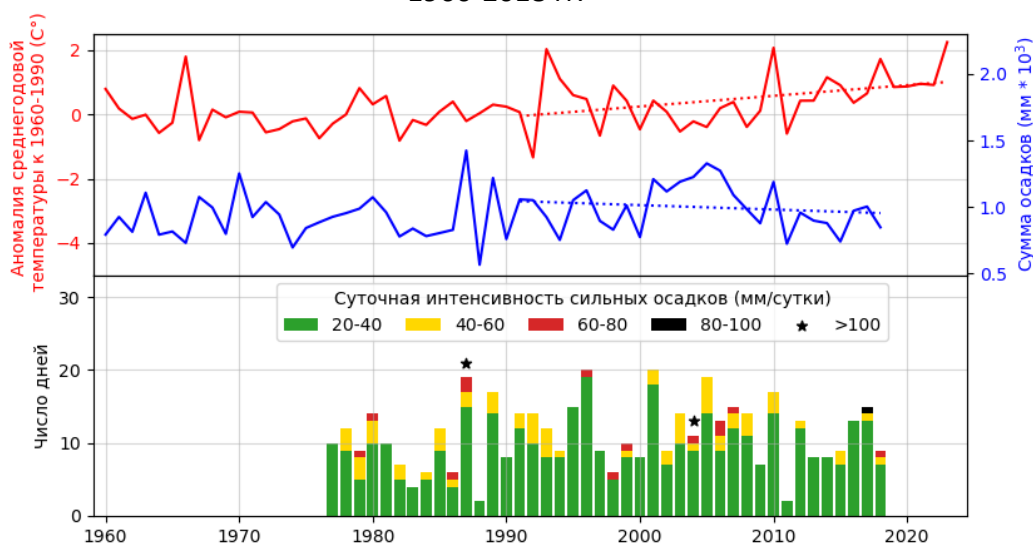


Рисунок 9. *Сверху:* Аномалия среднегодовой температуры к периоду 1960-1990 гг. и годовая сумма осадков на м/с Теркол (сплошные линии) и их тренды с 1990 (пунктирные линии). *Снизу:* повторяемость осадков различной интенсивности в 1977-2018 гг. Данные даны за временные интервалы, имеющиеся в распоряжении авторов.

Температура в Терсколе держится выше нуля большую часть года, соответственно, большая часть осадков выпадает в виде дождей. В последние десятилетия наблюдается устойчивый тренд роста температуры, выраженный и в теплый, и в холодный сезоны. Годовая сумма осадков составляет около 1000 мм и статистически значимо не изменяется за последние десятилетия на фоне значительной межгодовой изменчивости. Согласно прогнозным оценкам изменения климата [Ледники и климат Эльбруса, 2020; Третий оценочный доклад об изменениях климата..., 2022], в Приэльбрусье в течение всего XXI в. продолжится рост зимних и летних температур, суммы зимних и летних осадков изменятся статистически слабо. Для обоих сезонов вырастут максимальные суточные суммы осадков (для зимы - более чем на четверть), что означает, что осадки будут выпадать в виде более интенсивных ливней и снегопадов. Сейчас почти в 80% случаев осадки имеют интенсивность до 10 мм/сутки. Однако интенсивные дожди, более 20 мм/сутки, исторически не являются редкостью для Терскола (Рисунок 9). Отметим, что такую интенсивность ливней можно рассматривать как селеобразующую для Центрального Кавказа [Сейнова и др., 2018]. По наблюдениям за 1960-1975 гг. оценка функционально-нормального распределения суточных норм сумм осадков имеет

следующие значения [Таланов, Херхеулидзе, 2018]: P=10% 11.0 мм, P=1% 57.0 мм, P=0.1% 89.5 мм. Однако за период наблюдений 1977-2018 гг. превышение указанной 0.1%-ой обеспеченности наблюдалось уже трижды: 128 мм в мае 1987 г., 153 мм в марте 2004 г., 97 мм в октябре 2017 г.

Отдельно отметим, что в 1967 г. серия очень сильных ливней прошла одновременно масштабным фронтом по значительной части Кавказа. На м/с Терскол 4-5 августа было зарегистрировано выпадение 86 мм осадков с максимальной интенсивностью 0.4 мм/мин [Сейнова и др., 2018]. Судя по массовым следам схода свежих селей в притоках верхней и средней части бассейна, ясно различимым на космическом снимке от 13.08.1967, долина Гижгита также попала в этот теплый фронт. Это значит, что величины экстремальных осадков с м/с Терскол можно использовать как ориентиры при рассмотрении долины Гижгита.

Растительность

По условиям растительности долину можно подразделить на три типа территорий (Рисунок 10).

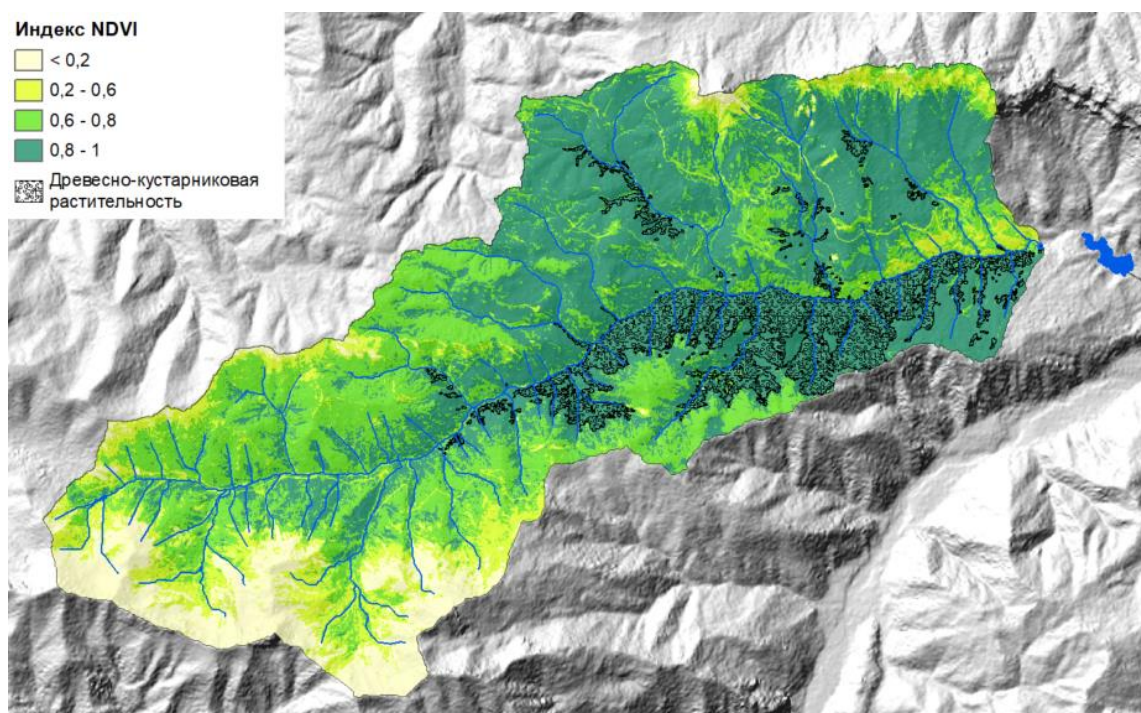


Рисунок 10. Индекс продуктивности растительности NDVI (по снимку Sentinel-2 от 16.07.2021) и область покрытия древесно-кустарниковой растительностью в бассейне р. Гижгит.

Бассейны в нижнем и среднем течении по правому борту (т.е. северной экспозиции) в большей или меньшей степени покрыты плотной древесно-кустарниковой растительностью. В ряде случаев она занимает более половины площади суббассейнов. Сравнение разновременных снимков показывает, что последние десятилетия ее площадь стабильно увеличивается, за счет продвижения вверх как по склонам малых водосборов, так и в целом по долине Гижгита на более высокие гипсометрические уровни. Отдельно нужно отметить, что на сегодняшний день густые заросли сформировались и вдоль самого русла Гижгита, заняв всё пространство днища долины (Рисунок 13, Рисунок П5-6,

Рисунок П5-8). Это значит, что, по сравнению с серединой прошлого века, возросло количество «древесного мусора» в русле, а также частота и интенсивность карчеходов¹⁵. На левом борту долины (южная экспозиция) кустарники и низкорослые деревья встречаются изредка, небольшими группами, приуроченными к выходам грунтовых вод.

Верховья правого борта долины поднимаются до субнивального пояса, где растительность крайне разрежена или отсутствует вовсе. Субстрат здесь представлен выступами скальных пород и грубообломочными отложениями морен, обвалов и осыпей. В частности, так выглядят верхние звенья крупных водосборов в верховьях Гижгита по правому борту (№ 31-45), где более половины общей площади бассейнов может иметь очень низкое проективное покрытие (Рисунок П5-4). В основном здесь произрастают мхи, лишайники и травы, изредка встречаются кустарнички ивы.

Остальная, бóльшая, часть долины Гижгита занята субальпийскими и альпийскими лугами разной степени продуктивности и антропогенной нагруженности (Рисунок 11, Приложение П5). Общий характер распределения продуктивности в среднем и нижнем течении подразумевает более высокотравные, густые и развитые травянистые сообщества на мощном элювиальном чехле по правому борту (северная экспозиция, много выходов грунтовых вод). На склонах левого борта (южная экспозиция, редкие выходы грунтовых вод) преобладают низкотравные сообщества ксерофитного характера. Хотя растительность в них имеет меньшее проективное покрытие и продуктивность, преобладающие злаки и осоки создают плотную дернину [Тайсумов и др., 2016], что повышает устойчивость сообществ к механическим нагрузкам. В верховьях долины, на менее благоприятном каменистом субстрате и при меньшей роли экспозиции, низкотравные сообщества формируются на обоих бортах. Все типы лугов используются для отгонного выпаса, а на продуктивных участках низовий с пологим рельефом ведется еще и заготовка сена.



Рисунок 11. Слева: низкотравные луга со скотопрогонными тропами в низовьях долины Гижгита. Справа: высокотравные луга правого борта в низовьях долины Гижгита (водосбор № 65).

Известно, что растительность оказывает большое влияние на удержание и перераспределение стока дождевых вод. Например, многолетние исследования на лесогидрологическом стационаре Аибга (Причерноморье, Северный Кавказ) показывают долю

¹⁵ Карчеход представляет собой движение в паводок или половодье выпавших деревьев с кроной и корневой системой. Его развитие возможно на любой реке, по берегам которой растут деревья. На реках с карчеходом нельзя ставить трубы (СНиП 2.05.03-84 Мосты и трубы).

склонового стока в буковых лесах менее 10% от выпадающих осадков [Битюков, 2007], а остальное уходит на инфильтрацию в почву и испарение; в лиственном лесу Закавказья поверхностный сток с лесопокрытых склонов в 3-4 раза меньше, чем с травянистых, и в 10-15 раз меньше, чем с оголенных [Рахманов, 1984]. Для экологических расчетов обычно принимают, что немедленный поверхностный сток с лесопокрытой территории составляет около 20% от выпавших осадков [Critchley, Siegert, 1991]. Кроме того, растительность регулирует и водонасыщенность верхнего слоя грунта, за счет поглощения влаги корневой системой. В контексте данного исследования, важно выделить следующие три эффекта растительности, в первую очередь древесно-кустарниковой: (i) перераспределение стока, совместно с эффектом физического закрепления грунта корнями, повышает устойчивость склонов к развитию оплывин¹⁶; (ii) увеличение времени добегающего дождевого стока к руслам водотоков, за счет его фильтрации и перехода в подповерхностный сток, сглаживает пик паводкового расхода воды, а значит, снижает способность потока транспортировать наносы; (iii) разрастание древесно-кустарниковой растительности непосредственно вдоль русла горных рек повышает шанс развития карчехода при значительных расходах воды.

Гидрология

До создания хвостохранилища и подземного водопропускного тоннеля, бассейн Гижгита включал более 158 км² при длине главного водотока 28 км, и эти цифры до сих пор часто фигурируют в публикациях. Современный бассейн со створом у портала водопропускного тоннеля, полученный нами по ЦМР, охватывает 138 км² при длине главного водотока 23 км. В долине Гижгита существует несколько десятков крупных и малых ручьев с постоянным стоком и многочисленные тальвеги с сезонными водотоками. Мы выделили внутри долины 65 локальных суббассейнов с площадью более 10 га (Рисунок 12, Приложение П1-1).

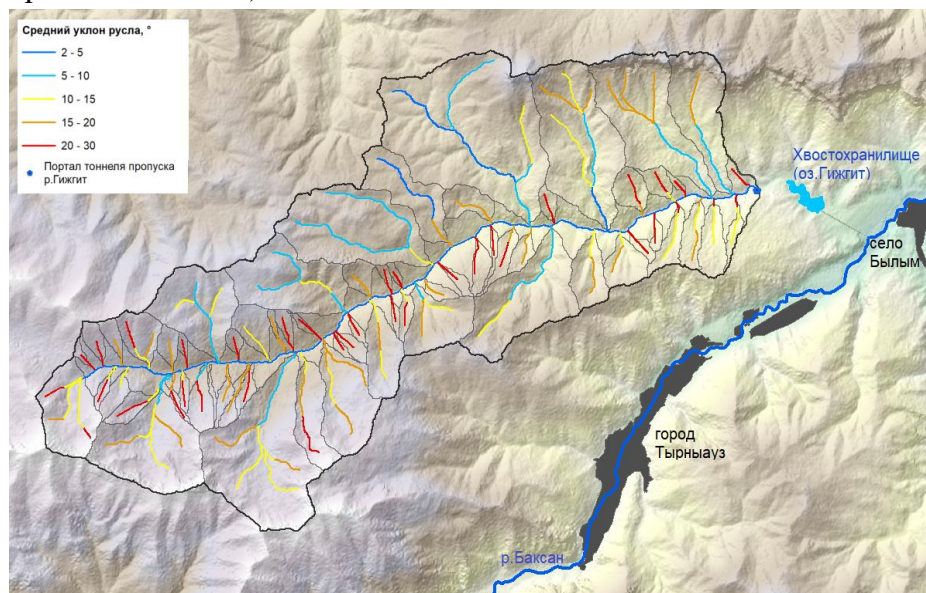


Рисунок 12. Современный бассейн р. Гижгит (черный контур) с замыкающим створом в портале тоннеля (синий маркер), его суббассейны крупнее 10 га (серые контуры) и сеть соответствующих постоянных и временных водотоков с градацией по уклонам.

¹⁶ Оползни неглубокого заложения, затрагивающие первые метры грунта от поверхности и обычно вызванные его переувлажнением до состояния пластичной текучести.

Собственное русло Гижгита обладает относительно небольшим уклоном, менее 5° , даже в верховьях долины. На отдельных участках русел притоков могут быть уклоны до 30° , причем не только в их верховьях (Рисунок 12, Приложение П1-9). В верховьях долины сама река и притоки протекают по луговым ландшафтам, а в нижней половине пойма Гижгита и прислоненные оползневые тела заросли древесно-кустарниковой растительностью (Рисунок 13).



Рисунок 13. Русло р. Гижгит. Слева: в верхнем течении (точка полевых работ QF9); виден автомобильный брод. Справа: в нижнем течении, в километре выше портала тоннеля; видны следы карчехода (нагромождения древесных остатков), потенциально формировавших локальную дамбу.

Характеристики стока

Постоянные водотоки, включая сам Гижгит, имеют смешанное питание, в котором в сухой сезон немаловажную роль занимают повсеместно выклинивающиеся грунтовые воды. Максимальные расходы воды формируются при выпадении летних ливневых дождей, тогда как весеннее половодье, связанное с таянием снега в верховьях, растянуто по времени и имеет сравнительно небольшой объем. Ледниковое питание в бассейне Гижгита с высокой вероятностью отсутствует (см. раздел *Геологическое строение и рельеф*).

Перед созданием хвостохранилища на Гижгите были организованы гидрологические наблюдения. Гидрологический пост был открыт в июле 1958 г., в 300 м выше существовавшего на тот момент естественного устья. Хотя он просуществовал до 1970 г., на сегодняшний день удалось установить наличие исходных данных в архивных гидрологических ежегодниках только за 1963-1965 гг. При этом отчеты организации Гипроникель, проектировавшей гидротехнические сооружения, не сохранились. В опубликованных материалах [Запорожченко, Докукин, 2019] указаны следующие результаты наблюдений за 1958-1970 гг., из расчета исторического бассейна в 158 км^2 :

Уровень воды на гидропосту:

минимальный: 0.5 м

максимальный: 1.75 м

Среднегодовой расход: 1.61 м³/с

Наивысшие измеренные расходы паводков: 1967 – 29.1 м³/с, 1970 – 20.1 м³/с

Расход 1%-й обеспеченности (оценка Института Гипроникель): 90 м³/с

Более широкий список характеристик доступен в справочниках [Куприянова, 1973] на более коротком ряду наблюдений 1959-1965 гг., из расчета исторического бассейна в 158 км²:

Средний расход воды: 1.59 м³/с

*Модуль стока: 10.1 л/сек*км²*

Модульные коэффициенты расходов:

средний максимальный: 7.55

средний минимальный: 0.15

суточные различной продолжительности:

30 дней: 2.43

90 дней: 1.60

180 дней: 0.64

270 дней: 0.30

355 дней: 0.19

Сток наносов (за 3 года наблюдений):

средний годовой расход R: 0.22 кг/сек

средний годовой расход Q: 1.45 м³/сек

средняя плотность: 150 г/м³

Средний слой стока:

Годовой: 319 мм

Многоводный сезон (V-VIII): 220 мм / 69 % годового стока

Лимитирующий период (IX-IV): 99 мм / 31 %

Нелимитирующий сезон (III, IV): 22 мм / 7%

Лимитирующий сезон (IX-II): 77мм / 24%

Месячный сток для года средней водности, в % от годового стока:

| V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII | I | II | III | IV |
|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 15.7 | 19.0 | 21.6 | 12.7 | 8.4 | 5.4 | 3.6 | 2.7 | 2.0 | 1.9 | 2.0 | 5.0 |

В июле 2023 г., в рамках полевых работ, авторами были выполнены единичные измерения расходов воды в верхнем и нижнем течении Гижгита при хорошей погоде с осадками умеренной интенсивности за несколько дней до этого (Приложение ПЗ). Полученные величины – около 3 м³/сек в створе у портала тоннеля – согласуются с приведенными историческими данными.

Опасные гидрологические явления

Как упоминалось выше (см. подраздел *Климат*), достоверно известно, что в августе 1967 г. были интенсивные дожди, и в верхней и средней части долины сходили сели (Рисунок 16). По-видимому, в районе гидропоста последствия ливней не наблюдались даже в виде селевого паводка, так как в своих заключениях Институт Гипроникель признал р. Гижгит неселеопасной.

В современной истории достоверно известно о двух опасных событиях в виде селевых паводков ливневой природы летом 2002 и 2014 гг. В первом случае происходила интенсивная аккумуляция наносов в аварийном пруду, в том числе перед порталом водопропускного тоннеля (Рисунок 17), что вызвало перестройку русла и сброс стока непосредственно в хвостохранилище. Для 2002 г. специалисты Института Севкавгипроводхоз в ходе обследования русла косвенно оценили максимальный расход

паводка в 100 м³/с [Запороженко, Докукин, 2019]. Они также рассчитали обеспеченности разного расхода в створе тоннеля¹⁷ (Таблица 2), согласно которым это было событие 5% обеспеченности.

Таблица 2. Максимальный расход и объем паводочного стока р. Гижгит [Запороженко, Докукин, 2019].

| Обеспеченность, % | 0.01 | 0.1 | 0.5 | 1 | 5 | 10 | 50 |
|---|------|------|------|------|------|------|------|
| Коэффициент обеспеченности | 2.66 | 1.68 | 1.18 | 1.00 | 0.63 | 0.38 | 0.23 |
| Максимальный расход, м ³ /с | 430 | 270 | 190 | 160 | 100 | 60 | 37 |
| Объем паводочного стока, млн м ³ | 13.0 | 8.2 | 5.8 | 4.9 | 3.1 | 1.8 | 1.1 |

Современные экзогенные процессы

Днище долины Гижгита и долин его притоков – ареал преимущественной эрозии: как глубинной, так и боковой. Русло реки местами подрезает коренные борта, провоцируя развитие склоновых процессов, которые будут рассмотрены ниже. Однако на отдельных участках наблюдаются признаки промежуточной аккумуляции влекомых и взвешенных наносов (так называемые «ловушки наносов»). Как правило, такие участки приурочены к расширениям днища основной долины и долин притоков, а также к устьевым зонам ручьев-притоков. Морфология, в том числе морфометрия, склонов долины Гижгита и его притоков, вместе с особенностями геологического строения, определяют активное развитие склоновых процессов, развивающихся по двум основным сценариям: (i) обвалы и осыпи на открытых крутых склонах и (ii) делювиальные, дефлюкционно-солифлюкционные и оползневые процессы на более пологих (часто задернованных и/или залесенных) участках. Вместе с тем активное поступление материала со склонов в русло может провоцировать развитие селевых явлений, что будет рассмотрено в следующем разделе.

Оползни

Оползни на склонах долины Гижгита и в малых бассейнах его притоков представляют собой, по-видимому, один из главных механизмов поступления материала в русло реки. Современные проявления оползневых процессов зафиксированы практически повсеместно на обследованных участках. В местах выхода грунтовых вод отмечены современные проявления оползневых процессов по поверхностям скольжения с неглубоким залеганием (оплывины), которые, основном, к середине XX века уже были стабилизировавшимися и заросли (Рисунок 14). На старых оползневых телах характерно развитие эрозии и повторного сползания. В относительно недавнем геологическом прошлом на коренных бортах долины также происходили оползни глубинного заложения, в том числе вызывавшие подпруживание и перестройку русла Гижгита (Рисунок 14). Условия для развития подобных процессов сохраняются и в настоящее время.

Оползание и массовое смещение переувлажненного материала по склону активно развивается в условиях совпадения направления падения пластов водоупорных слоев и падения склона. Такие условия, как было отмечено ранее, характерны для правого борта долины Гижгита в его нижнем-среднем течении, а также локально в самых верховьях

¹⁷ Отметим, что в опубликованных материалах отсутствуют указания на методику расчета, а оригинальный отчет об обследовании русла и выполнении расчетов был утрачен.

бассейна. Таким образом, оползневые процессы в значительной степени можно считать обусловленными структурными и гидрогеологическими особенностями местности. В таких условиях материал со склонов поступает в днище долины без видимых препятствий. Местами, сливаясь своими дистальными частями, оползни формируют языки, вытянутые по тальвегам локальных бассейнов (оползни-потоки). В сочетании с ливневыми осадками этот материал, уже переувлажненный в силу гидрогеологических условий, может сравнительно быстро оказаться непосредственно в русле, способствуя насыщению потока наносами и превращению локальных ливневых паводков в селевые потоки (см. раздел *Селевая активность*). В отдельных случаях могут сформироваться временные дамбы-подпруды, дополненные материалом карчехода, блокирующие сток по основному руслу. Следы таких временных невысоких плотин были отмечены в нижнем-среднем течении Гижгита в ходе полевых исследований (Рисунок 13). В разделе *Результаты* даются оценки типового размера грунтовых плотин и объема соответствующего подпрудного озера.

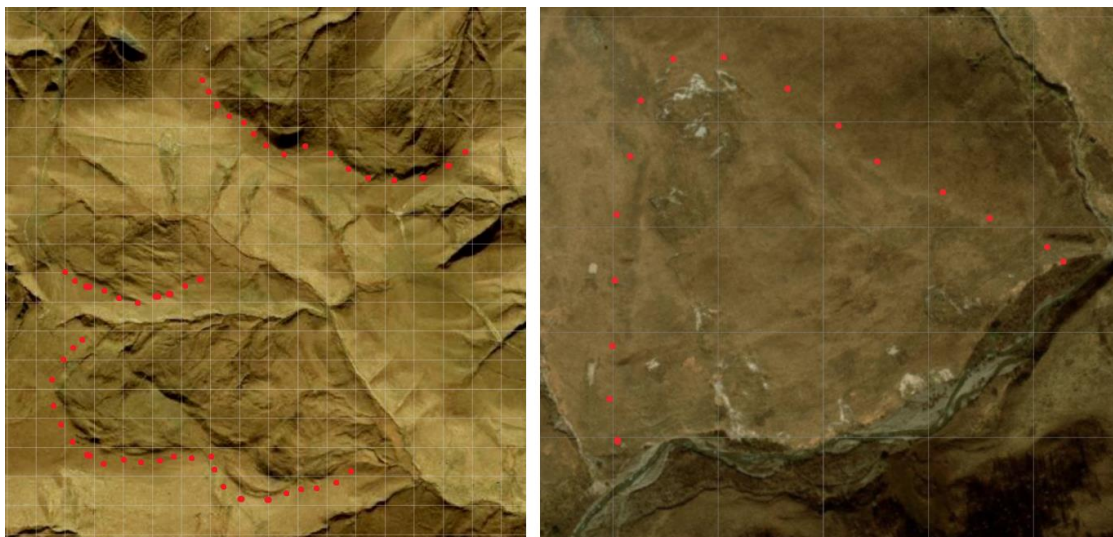


Рисунок 14. Старые оползни (красные маркеры по бровкам). *Слева*: массовые оползания рыхлообломочного чехла, приуроченные к выходам грунтовых вод в суббассейнах №11 и №13. *Справа*: структурно-обусловленный скальный оползень на фасетке №118, вызвавший смещение русла реки Гижгит. Снимок 2020 г. Шаг сетки 100 м.

Обвалы и осыпи

Собственно гравитационные процессы – обвалы, осыпи, лавины – являются фоновыми для крутых склонов скальных гребней в высоко- и среднегорном поясе Кавказа. В бассейне Гижгита особенно ярко эти процессы выражены в верховьях долин притоков (Рисунок 15): на приводораздельных участках Передового хребта (правые притоки), а также на крутом куэстовом уступе Скалистого хребта (левые притоки). Особенно развито комплексное проявление блоковых и массовых гравитационных смещений на склонах, находящихся между крупными суббассейнами №31, 35, 43. В самих суббассейнах №31, 35, 43, 44, 45 развиты осыпи, скальные стенки с потенциалом обвалов, древние моренные комплексы, эрозия по тальвегам временных водотоков и т.д. Вместе с тем проявления обвально-осыпных процессов отмечены и в нижнем-среднем течении по обоим бортам долины Гижгита – в той части бассейна, где река глубоко врезается в толщу протерозойских пород, образуя крутые скальные борта.

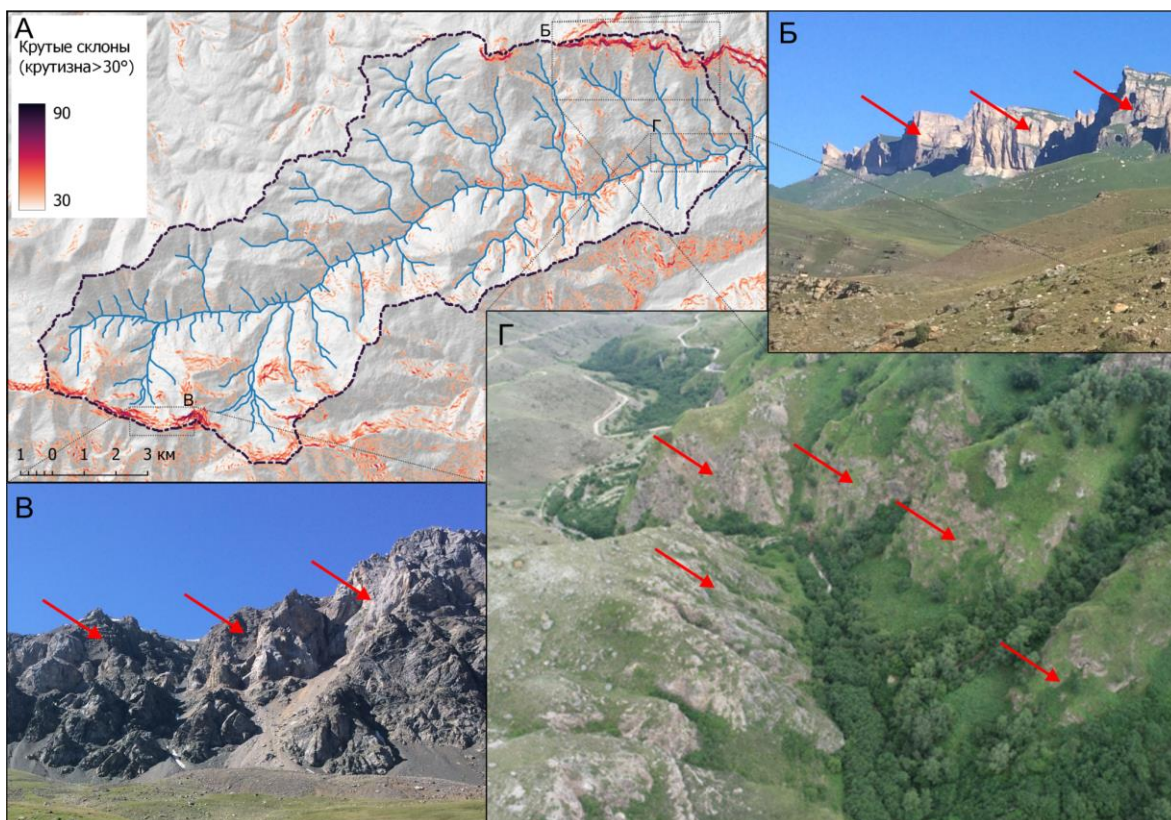


Рисунок 15 Крутые обвально-осыпные склоны в бассейне р. Гижгит (А), на фото (Б-Г) отмечены красными стрелками: Б – обвальный крутой (куэстовый) уступ Скалистого хребта; В – обвально-осыпные склоны ледникового цирка в верховьях водосбора №35; Г – скальные склоны долины в нижнем течении (фото БПЛА, оператор С.В. Харченко)

Селевая активность

Долина Гижгита располагается в макрорегионе потенциального проявления климатически-обусловленных селей и селевых паводков дождевого генезиса. Селеопасный сезон привязан ко времени выпадения жидких осадков, то есть длится здесь с марта по ноябрь. Три основных механизма образования селей, которые могут развиваться в таких условиях, это: (i) размыв и вовлечение в движение рыхлого материала на склоне; (ii) водонасыщение и последующее оползание грунта на склоне; (iii) вовлечение в движение руслового и прируслового материала мощным потоком воды.

Исторически река Гижгит считалась неселеопасной. Это было отражено как в научно-справочных каталогах середины XX века [Каталог селеопасных рек на территориях Северного Кавказа и Закавказья, 1969], так и в отчетах Института Гипроникель. Последний выполнял натурные обследования в 1972 г., то есть после достоверно имевших место селей на притоках Гижгита в верхней и средней частях долины (Рисунок 16). В более поздних материалах статус отдельных притоков [Перов, 2012] или всего бассейна Гижгита [Кондратьева и др., 2015] был пересмотрен на «потенциально-опасный» или «селеносный».

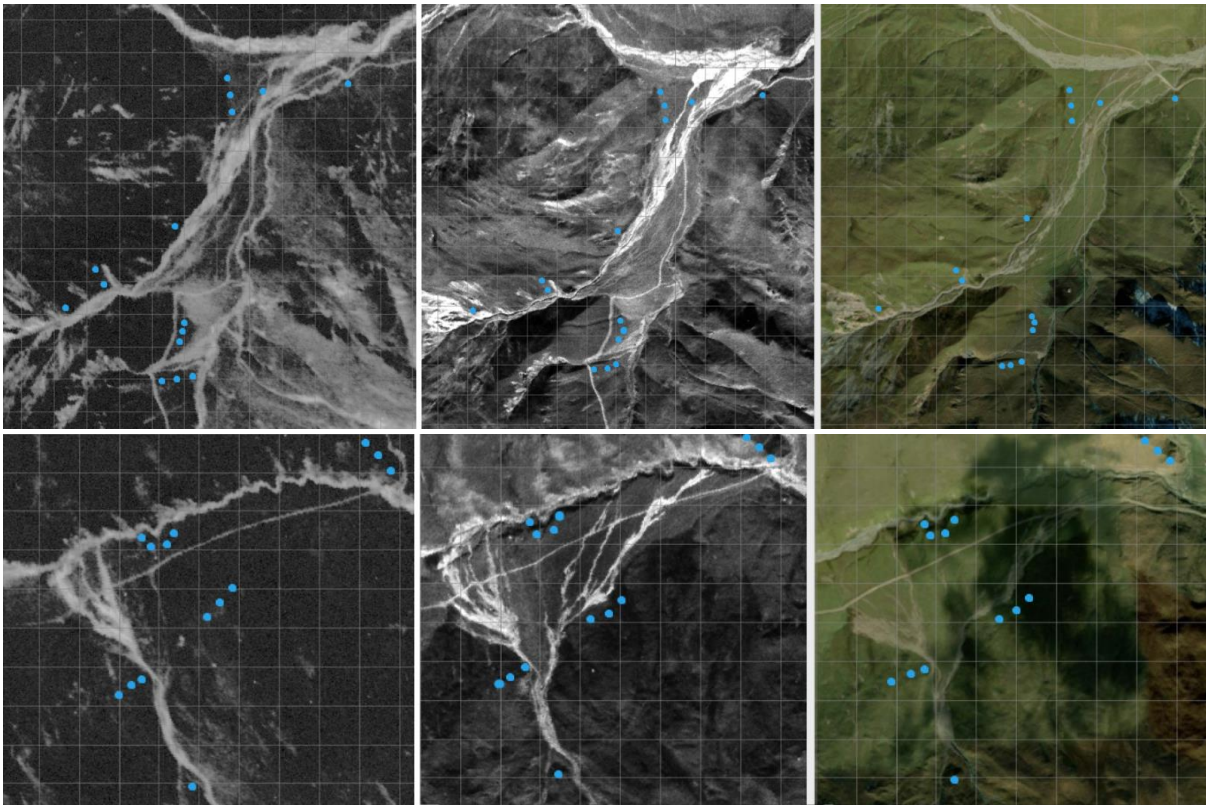


Рисунок 16. Исторические и современные селевые проявления. *Верхняя линия:* низовья бассейнов №34 и №35, имеющих общий конус выноса; *нижняя линия:* низовья бассейна № 38. *Слева направо* - космические снимки 1967, 1971 и 2019 гг. В верхних (северных) частях снимков видно русло р.Гижгит. Шаг сетки 100 м. Синие маркеры - общие ориентиры между снимками в одном ряду.

В настоящее время (как минимум за последние три десятилетия, охватываемые высокодетальной космической съемкой) селевые явления регулярно наблюдаются в альпийских суббассейнах верховий с большой долей незадернованного рыхлого материала (Приложение П1-9, П1-10). Они расположены преимущественно по правому борту (суббассейны № 29-45). Здесь формируются небольшие по объему и дальности выноса сели, которые достигают русла Гижгита, как правило, только из небольших по площади суббассейнов с крутопадающим тальвегом, опирающимся непосредственно на русло Гижгита. Характерно, что самые крупные суббассейны с альпийским рельефом (№ 31, 35, 43) имеют крайне низкий селевой потенциал, так как на их на большей части сток фильтруется в крупнообломочный моренный чехол, и благоприятные условия для развития данного процесса не складываются. Селеносными можно также признать верховья суббассейна №9 и левый приток в суббассейне №11. Оба они берут начало на крутых склонах г. Науджидзе с осыпями. Однако морфологические (в т.ч. морфометрические) параметры бассейнов не позволяют развиваться крупным селевым потокам, способным достичь русла Гижгита.

Современные селевые паводки в районе ГТС

Первый достоверно известный факт воздействия на гидротехнические сооружения в результате прохождения селей произошел в июне 2002 г. [Запороженко, Докукин, 2019]. В результате критического заполнения площадки перед водопропускным тоннелем наносами и карчеходом, портал был заблокирован, и сток Гижгита пошел

непосредственно в озеро (хвостохранилище) через аварийный лоток, активно размывая прилегающие к нему склоны малой дамбы. По оценкам авторов указанной публикации, большие расходы воды позволили потоку обогащаться влекомым материалом за счет боковой эрозии русла и приобрести селевой характер. Косвенными методами средний расход на уровне тоннеля был оценен в $100 \text{ м}^3/\text{с}$ в первые сутки¹⁸ и около $50 \text{ м}^3/\text{с}$ в следующие два дня, а суммарный объем перемещенного твердого материала – в $50\,000 \text{ м}^3$. Предположительно, сформировавшееся при этом событии русло направляло сток Гижгита в хвостохранилище вместо тоннеля в течение еще нескольких лет (Рисунок 17).



Рисунок 17. Участок русла р.Гижгит перед входным порталом тоннеля (синий маркер). Течение реки слева направо. Красный пунктир - действующее на момент съемки русло, отводящее сток в озеро Гижгит через аварийный лоток в теле плотины под автомобильным мостом. Снимок QuickBird от 21 июля 2007 г., изображение взято с Google Earth Pro TimeLapse. Шаг сетки 100 м.

В 2014 г. на Гижгите прошел еще один селевой паводок, который не привел к закупорке портала тоннеля [Запорожченко, Докукин, 2019]. Им были частично вынесены отложения 2002 г., сильно углублено русло и эродированы его борта (Рисунок 18). По мнению авторов указанного источника, причиной формирования селевого потока стал сход оползня-потока в 400-500 м выше портала тоннеля, за крутым изгибом русла. Предположительно, его тело достигло русла реки, перегородив его и инициировав последующую прорывную волну. Максимальный расход реки по косвенным признакам был оценен в $62.5 \text{ м}^3/\text{с}$.

¹⁸При максимальной пропускной способности тоннеля по полному сечению - $65 \text{ м}^3/\text{с}$.



Рисунок 18. Селевая терраса в 400 м выше по течению от тоннеля, предположительно 2002 г. формирования – место полевого отбора дендрологических образцов D2 (см. Приложение П2. Дендрохронологические образцы; фото от 2023 г.). *Слева*: Общий вид на участок русла р.Гижгит. *Справа*: Отложения, слагающие террасу.

3. Результаты

3.1. Ландшафты суббассейнов и фасеток склонов долины

На основании природных характеристик, рассмотренных в предыдущем разделе, суббассейны долины были сгруппированы в несколько классов (Рисунок 19, Приложение П1-10). Классификация в первую очередь отражает различия в морфометрии и закрепленность поверхностных грунтов растительностью, но сами растительные сообщества и их состояние напрямую связаны с местными микроклиматическими и гидрогеологическими условиями. Вместе они влияют на развитие процессов транспорта рыхлого материала в русло Гижгита, некоторые механизмы которого рассматриваются в следующем разделе.

1: Залесенные суббассейны и фасетки

Правый борт долины в нижнем и среднем течении занят бассейнами и фасетками с различной степенью залесенности. Одной из причин комфортных условий для произрастания деревьев являются северная экспозиция и многочисленные выходы грунтовых вод, что позволяет легче переносить солнечное лето.

1А: несколько наименее залесенных бассейнов (от 15 до 20 % площади) располагаются в низовьях долины. Большая их часть лежит на осадочных коренных породах и обладает пологоволнистым рельефом. Здесь сформировался элювиальный чехол в первые метры толщиной (см. раздел 4.2, подраздел *Сход оползня*). Его материал обладает высокими пористостью и содержанием пылеватых и глинистых частиц, что приводит к низкому сопротивлению сдвигу, особенно в водонасыщенном состоянии

(Приложение П4). Перманентно увлажненный грунтовыми водами, он с легкостью переходит в состояние перенасыщенности при продолжительных или интенсивных осадках, демонстрируя широкое развитие оползней с механизмами скольжения и вязкопластичного течения (Приложение П1-8). Небольшие уклоны в средних и верхних частях бассейнов не являются благоприятными для перемещения оползневых тел на значительные расстояния или развития на обнажившемся грунте вторичной эрозии (Приложение П1-5). Однако на крутых склонах непосредственно над днищем долины, в том числе рядом с порталом водопропускного тоннеля, это способно приводить к опасным ситуациям в русле Гижгита; подробнее процессы и механизмы на этом участке рассмотрены в разделе 3.2 *Опасные явления гравитационно-гидрологической природы*. Также, благодаря постоянной увлажненности почвы, места, не покрытые древесно-кустарниковой растительностью, заняты здесь высокопродуктивными луговыми сообществами и пологие водораздельные участки используются как сенокосы. Поэтому вероятность развития оползней потенциально может повышаться в ситуации обильных осадках после уборки сена, из-за меньшей эффективности регулирования стока растительностью.

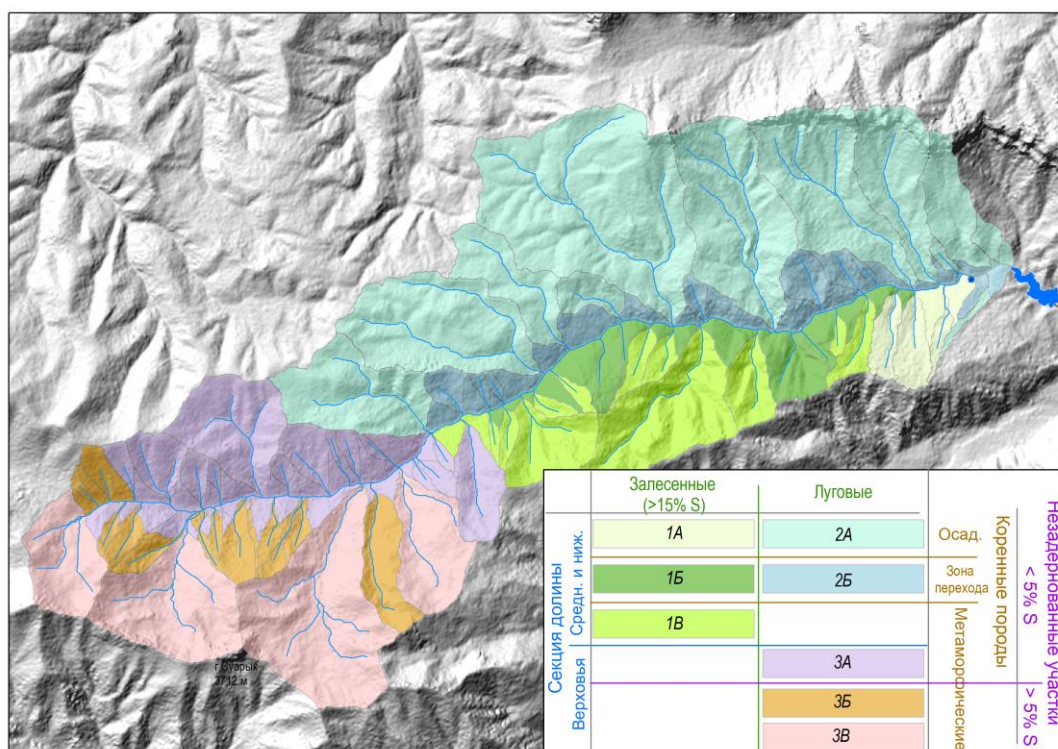


Рисунок 19. Типизация суббассейнов и фасеток склонов долины р.Гижгит.

1B: в среднем и нижнем течении русло Гижгита углубилось в плотные метаморфические породы, сформировав крутые (местами почти отвесные) склоны. Лесная растительность чувствует себя здесь наиболее комфортно и может занимать до 100% площади суббассейна или фасетки. Эти склоны обладают очень высокой связанностью потоков наносов (значение индекса IC) с руслом Гижгита (Приложение П1-6, П1-7), то есть пришедший в движение материал или упавшие деревья в высокой вероятностью окажутся в потоке или на пойме. Из-за невключения данных участков в полевые обследования и сокрытия дневной поверхности под пологом леса, достоверные сведения о характере и интенсивности склоновых процессов здесь отсутствуют. Согласно общим

представлениям, закрепление грунта древесными корнями, перевод значительной доли поверхностного стока осадков в подземный и транспирация избытка грунтовой влаги снижают здесь возможности для развития процессов денудации, в частности поверхностной эрозии и оползней-оплывин, относительно безлесых участков при прочих равных. Однако такие участки могут явиться источником материала для карчехода.

1В: бассейны, полностью лежащие на метаморфических коренных породах, имеют изрезанный рельеф, сформированный эрозией. Облесение здесь составляет 20-70% и, как и в масштабе всей долины Гижгита, демонстрирует выраженную связь с экспозицией и уклоном. Проанализированные исторические снимки подкрепляют предложение, что эти бассейны с существенной долей залесенной площади не способны генерировать значимые по объему и дальности продвижения селевые потоки. В их руслах потенциально может развиваться глубинная и боковая эрозия, способная вызвать локальные обрушения подмытых бортов и вывалы деревьев. Однако небольшие водосборные площади вкупе с регуляцией гидрологического режима растительностью позволяют предположить, что такие события не приведут к опасным последствиям (например, к формированию крупного запрудного водоема с потенциалом прорыва).

2: Луговые суббассейны и фасетки в среднем и нижнем течении

Весь левый борт долины Гижгита занимают бассейны с практически сплошным покрытием травянистой растительностью, преимущественно ксеровитной. Незадернованные участки здесь занимают первые проценты площади и в основном представлены структурно обусловленными скальными обрывами. Иногда встречаются небольшие группы кустарников, которые поселяются у выходов грунтовых вод.

2А: Крупные бассейны, охватывающие средние и верхние части склонов долины, сформировались преимущественно в мягких осадочных породах. Здесь сформировался спокойный рельеф (характерная крутизна склонов $< 20^\circ$), благоприятный для накопления элювиального чехла. На нем в прошлом массово развивались оползневые процессы в местах переувлажнения грунтовыми водами (Приложение П1-8), однако морфология склонов лимитировала дальность перемещения оползневых тел и развитие вторичной эрозии (Приложение П1-5, П1-7). В настоящее время крупных очагов развития оползания или эрозии склонового чехла на этой территории не наблюдается. Единичные водотоки демонстрируют современную или историческую селевую активность, однако объемы и дальность перемещаемого ими материала так же незначительны из-за морфологических условий. Таким образом, можно ожидать, что даже в случае деградации этих ксерофитных, низкопродуктивных травянистых экосистем, например при интенсификации выпаса, склоновый материал не будет поступать в русло Гижгита в значимо больших объемах.

2Б: Как и по правому борту, особенности геологического строения долины определили существование на нижнем гипсометрическом уровне мелких бассейнов и фасеток склонов с большими уклонами, примыкающих непосредственно к руслу Гижгита. Для тальвегов характерен выпуклый продольный профиль, связанный со сменой подстилающих пород, и слабое развитие рыхлообломочного чехла, так как материал выносится, не имея возможности накапливаться. В рельефе некоторых из них читаются крупные древние оползни структурной природы, которые даже провоцировали перестройку русла Гижгита (Рисунок 14). Оценка вероятности повторения подобных геологически-обусловленных событий остается за рамками данной работы. Для широкого

же развития транспорта рыхлого материала в русло Гижгита гравитационными процессами эти участки можно считать неперспективными даже в случае деградации растительного покрова или интенсификации осадков ввиду маломощного склонового чехла.

3: Суббассейны и фасетки верховий долины

Верховья долины Гижгита представляют собой типичные альпийские ландшафты с развитием комплекса характерных гравитационных процессов, высотной сменой пояса горных лугов на субнивальные каменистые россыпи, и активным включением климатического фактора (перехода температуры через 0 °С) в формирование рельефа. Правый борт в верховьях имеет более благоприятные гидрогеологические и морфологические условия для активного развития склоновых процессов. Однако возможность транзита рыхлого материала в русло Гижгита неодинакова для больших и малых бассейнов в силу их морфологии.

3А: Хорошо задернованные луговые бассейны и фасетки в верхнем течении Гижгита расположены преимущественно по правому борту. Эти участки с характерной крутизной 20-30° и рыхлообломочным чехлом мощностью около метра играют ограниченную роль в питании Гижгита влекомыми наносами. Маленькие водосборы и отсутствие постоянных источников питания (родников) лимитируют в таких бассейнах развитие эрозии и/или селей. На северных склонах микроклиматические и гидрогеологические условия, а также слагающие чехол грунты (Приложение П4), крайне благоприятны для развития солифлюкции (Рисунок 7).

3Б: Существование данных малых бассейнов, с оползневой и эрозионной моделировкой рельефа их склонов, фактически являются следствием интенсивного разрушения и выноса материала с коренных склонов долины Гижгита. Благоприятные климатические, гидрогеологические и морфологические условия обеспечивают интенсивное выветривание горных пород, оползание и эрозию накопившегося материала с низкими характеристиками устойчивости к сдвигу (Приложение П4), и вынос продуктов разрушения за пределы суббассейнов (Рисунок П5-5). С прогнозируемыми изменениями температурного режима и интенсивности осадков условия для этого станут еще более благоприятными. Многие из этих бассейнов сейчас являются селевыми очагами. Селевые потоки из них, в том числе достигающие русла Гижгита, могут наблюдаться каждые несколько лет, а конусы выноса в некоторых случаях всего в два-три раза меньше по площади, чем основной бассейн.

3В: Крупные бассейны верховий представляют собой классическое альпийское высокогорье в пост-гляциальной фазе развития ландшафта: они оконтурены крутыми скальными хребтами со снежниками и спускающимися шлейфами обвалов и осыпей, а центральные части – днища каров и крупных ледниковых цирков – представляют собой котловины с холмисто-грядовым рельефом и относительно пологими склонами (10-20°), заполненные крупнообломочным моренным материалом. В последний легко фильтруются выпадающие осадки и выклинивающиеся грунтовые воды, поэтому местные ручьи зачастую выходят на дневную поверхность в местах, где обнажаются подстилающие скальные породы (Рисунок П5-4). Русла ручьев проходят по пологим днищам, также сложенным материалом, благоприятным для фильтрации части стока. В результате, на склонах постоянно генерируется и перемещается к подножиям рыхлообломочный материал, но морфология и механический состав грунтов центральных частей бассейнов

препятствует дальнейшему транзиту рыхлого материала в русло Гижгита. Так, в современной истории здесь не формировалось крупных селей, достигающих русла Гижгита или повреждающих местную дорогу¹⁹. Наиболее вероятно, что указанные геолого-геоморфологические особенности этих бассейнов, обеспечивающие блокировку транзита рыхлого материала, сохранятся и при ожидаемом росте интенсивности ливней в будущем.

3.2. Опасные явления гравитационно-гидрологической природы

Анализ материалов дистанционного зондирования и полевое обследование позволили выявить типичные опасные явления и механизмы их реализации в различных частях долины. Чтобы более обоснованно оценить уровень их опасности, в первую очередь для гидротехнических сооружений в низовьях долины, нами было проведено математическое моделирование для нескольких сценариев на двух участках долины. Описание используемых моделей приведено ранее в разделе *Селевое и гидродинамическое моделирование*.

Верховья долины

По результатам полевого обследования и исходя из общего геоморфологического анализа территории, бассейн №34, расположенный в верховьях Гижгита, был выбран в качестве типичного селевого бассейна данной местности. Здесь развивается комплекс условий и процессов, характерных для высокогорий Кавказа. Как и другие действующие селевые бассейны верховий долины (Приложение П1-9), он имеет небольшую площадь, крутые склоны, относительно мощный чехол рыхлых отложений на них и, судя по рельефу и космическим снимкам, регулярную селевую активность.

В пределах бассейна в качестве зоны зарождения были выделены 3 селевых очага (Рисунок 20, врезка). Длина 1 селевого очага составила около 88 м, для 2-ого – 60 м, для 3 – 59 м. Средний уклон для 1 и 2 очагов составляет 30°, для 3 – 23°. В ходе полевых работ в этих зонах проводился отбор проб грунта, полученные результаты лабораторных исследований были использованы при моделировании.

Моделирование проводилось для двух сценариев задания входного водного расхода в селевые очаги. В I сценарии входной расход во все очаги составил 1 м³/с, во II варианте – 2 м³/с. Выбранные значения входных водных расходов обусловлены размерами селевого бассейна, а также его потенциалом для образования катастрофического селевого потока, который в силу геоморфологических и геологических условий не может быть очень большим. Такие входные расходы соответствуют слою стока с локальных водосборных площадей очагов около 0.1-0.2 мм или слою осадков 0.2-0.3 мм, принимая коэффициент стока для увлажненного открытого грунта на склоне равным 0.6 [Critchley, Siegert, 1991; Derkacheva, Golosov, Shvarev, 2024].

¹⁹ Переход дороги через притоки Гижгита организован с использованием труб.

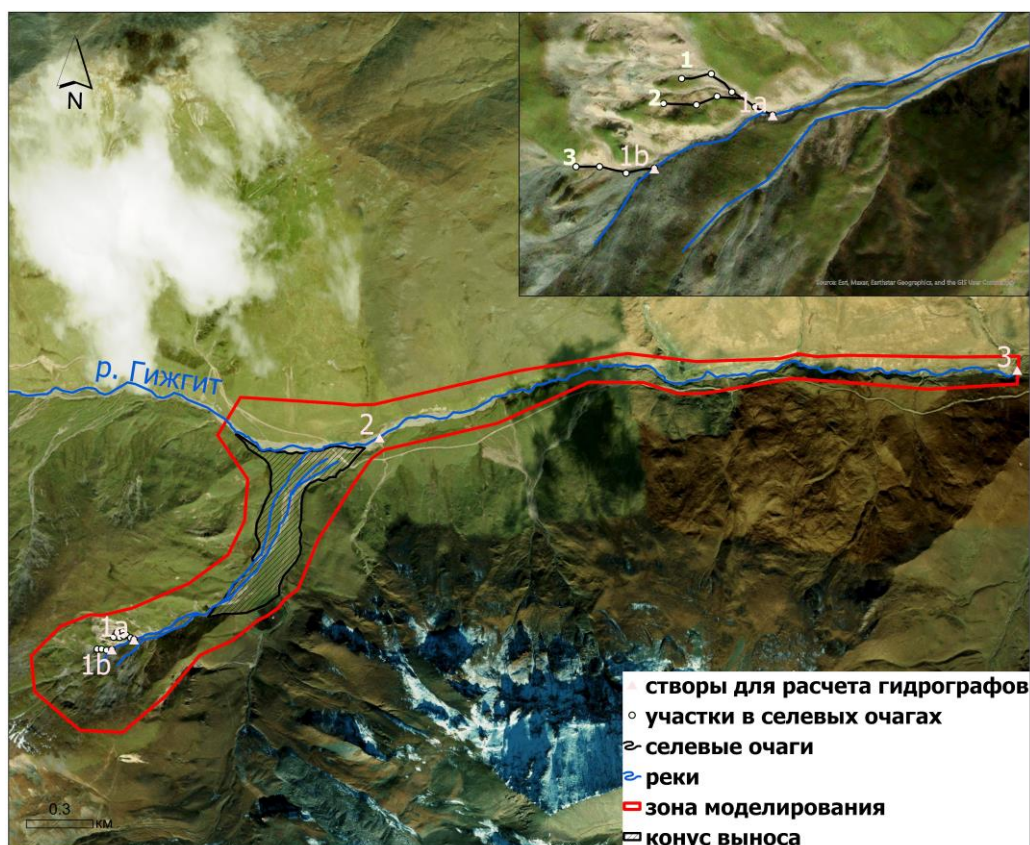


Рисунок 20. Схема расположения расчетных участков в суббассейне №34.

Моделирование селевых потоков проводилось с последовательным применением транспортно-сдвиговой модели в селевых очагах и гидродинамической модели FLO-2D для зон транзита и аккумуляции. Необходимо отметить, что в результатах моделирования для участков ниже конуса выноса не всегда точно воспроизводится положение русла р. Гижгит. Это связано, прежде всего, с разрешением используемых данных (ЦМР 12.5 м/пикс).

По результатам моделирования для I сценария суммарный максимальный селевой расход в 1 и 2 очагах в створе №1а составил около $16.3 \text{ м}^3/\text{с}$ при средней скорости потока 16 м/с. Для 3 очага максимальный расход на выходе из селевого очага (створ №1b) равнялся $5.3 \text{ м}^3/\text{с}$ при скорости в 13 м/с. На Рисунке 21 представлены соответствующие селевые гидрографы. Время добегания максимального расхода до русла р. Гижгит ниже конуса выноса бассейна составило 18 минут, при этом расход селевого потока практически не уменьшился. Время добегания от конуса по руслу Гижгита до створа №3, расположенного в 3 км ниже по течению, после нескольких полей аккумуляции наносов (см. Рисунок 20), составило около часа, а расход потока уменьшился на 63 %.

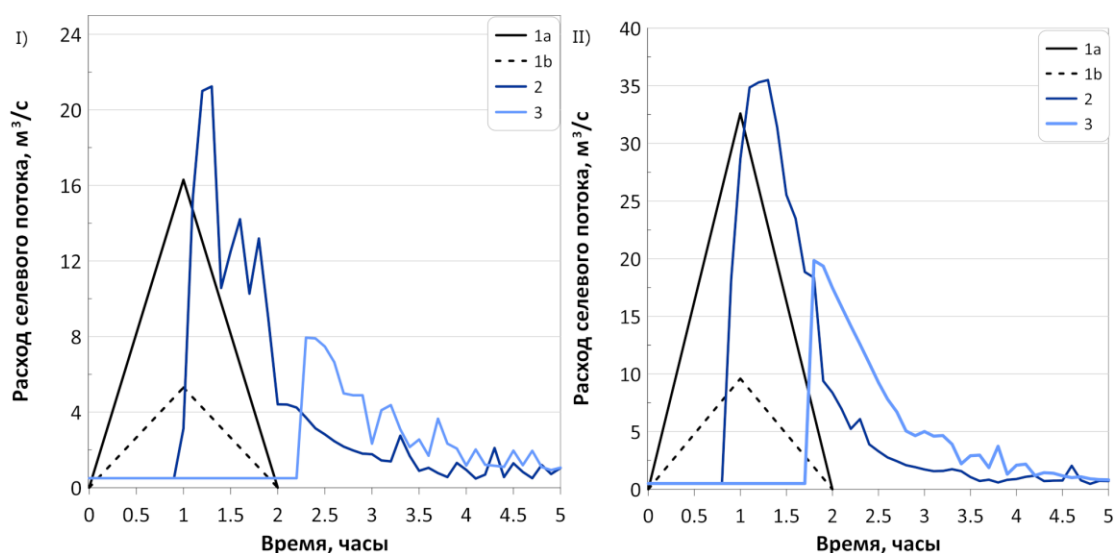


Рисунок 21. Гидрографы селевых потоков, полученные по результатам расчетов в транспортно-сдвиговой модели. I) Входной расход во все очаги $1 \text{ м}^3/\text{с}$; II) входной расход во все очаги $2 \text{ м}^3/\text{с}$.

Согласно II сценарию суммарный максимальный расход в 1 и 2 очагах составил около $32.6 \text{ м}^3/\text{с}$, средняя скорость потока составила около 14 м/с . Максимальный селевой расход на выходе из 3 очага равнялся $9.6 \text{ м}^3/\text{с}$. Время добегания до русла р. Гижгит ниже конуса выноса составило 42 минуты, максимальный расход при этом уменьшился на 12 %. Время добегания от конуса до 3 створа составило еще 30 минут (итого, чуть больше 1 ч), максимальный расход при этом упал вдвое, до почти $20 \text{ м}^3/\text{с}$.

Пространственное распределение глубины потока представлено на Рисунках 22 и 23. Глубина потока согласно I сценарию на конусе выноса будет составлять в среднем 0.3 м , в русле водотоков достигая 1 м . Скорость потока будет в среднем равняться около 1 м/с на конусе, увеличиваясь в руслах водотоков до 3 м/с . По результатам моделирования для II сценария глубина потока будет составлять 0.5 м на большей части конусе выноса, достигая в устьевой области более 1 м . Скорость потока на конусе увеличится до 2 м/с , достигая 5 м/с на отдельных участках русел.

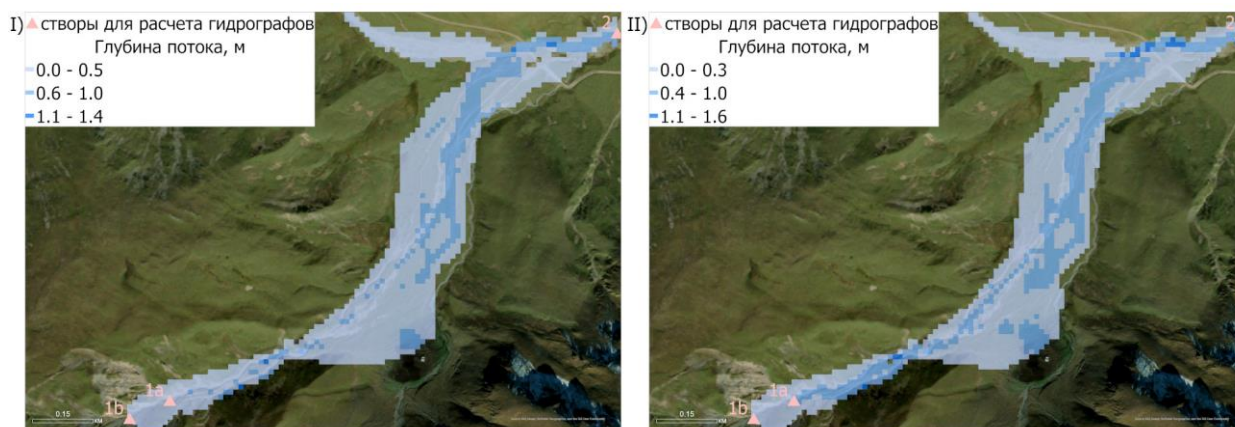


Рисунок 22. Результаты моделирования глубины селевых потоков на основе программного комплекса FLO-2D, бассейн №34 и его конус выноса. I) Входной расход во все очаги $1 \text{ м}^3/\text{с}$; II) входной расход во все очаги $2 \text{ м}^3/\text{с}$.

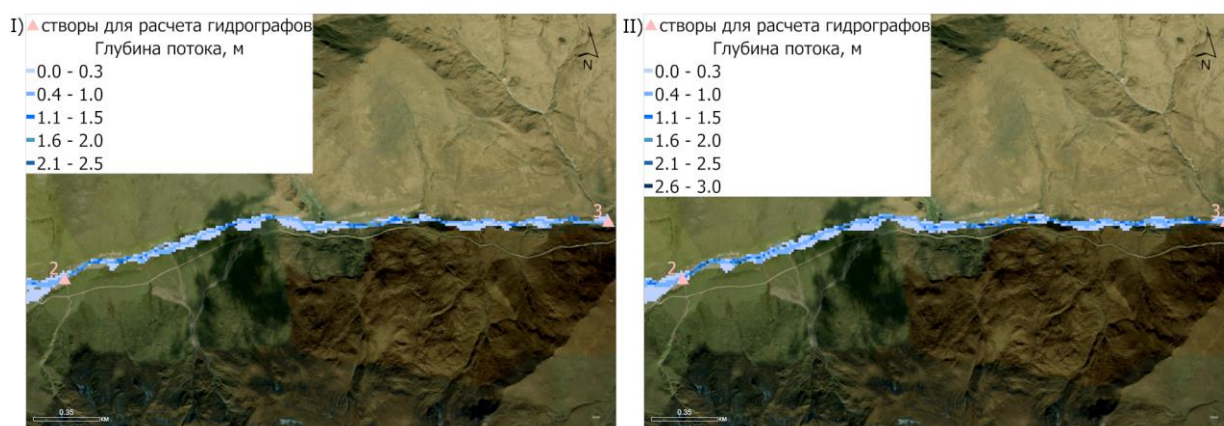


Рисунок 23. Результаты моделирования глубины селевых потоков на основе программного комплекса FLO-2D, участок русла р. Гижгит ниже по течению бассейна №34. I) Входной расход во все очаги $1 \text{ м}^3/\text{с}$; II) входной расход во все очаги $2 \text{ м}^3/\text{с}$.

Ниже конуса выноса рассматриваемого бассейна, непосредственно в русле р. Гижгит, по I сценарию средняя глубина потока составила около 1 м, а скорость около 3 м/с. При II сценарии, глубина потока превышает 1 м, достигая 3 м на участках сужений, и средняя скорость составляет 3.5 м/с. В обоих сценариях наблюдается затопление значительной части прирусловых полей аккумуляции, прослеживающихся на космических снимках.

С точки зрения ГТС в низовьях долины, в том числе водопропускного тоннеля, данный бассейн №34 и окрестные аналогичные ему можно считать не представляющими угрозы. Эти селеносные бассейны расположены в 10-15 км от входного портала тоннеля. При движении селевых потоков вниз по руслу Гижгита наблюдается значительное уменьшение гидродинамических характеристик, а также количества и размера транспортируемых наносов. Таким образом, мощность потока, достигнувшего портала тоннеля, оказывается недостаточной для значительного воздействия на ГТС.

Участок долины около портала водопропускного тоннеля

С практической точки зрения, наиболее актуальным является вопрос о процессах, способных затронуть ГТС, в частности водопропускной тоннель. В этом разделе мы рассматриваем два вопроса:

1. ситуацию схода оползня (оползня-сплыва или оползня-потока) с крутого правого борта немного выше по течению от тоннеля, который перегораживает русло Гижгита и создает подпрудную плотину: именно такой механизм возникновения селевого паводка был предложен для событий 2014 г. [Запорожченко, Докукин, 2019];
2. гидродинамические характеристики паводков и селевых потоков, независимо от причин их возникновения, на поле аккумуляции перед порталом тоннеля.

В заключение мы оцениваем время реализации сценария, который часто упоминается как возможное последствие паводков и селей на Гижгите [Анаев, 2021; Гегиев и др., 2018; Запорожченко, Докукин, 2019; Шерхов, Гергокова, 2022]: экстремальное наполнение хвостохранилища (озера Гижгит) и начало перелива через плотину.

Сход оползня

Геологическое строение долины Гижгита в нижней части привело к образованию крутого, почти отвесного правого борта, опирающегося часто непосредственно на русло. Долина Гижгита на этом участке – узкое ущелье. В нескольких сотнях метров выше по течению от портала тоннеля на этом борту имеется серия локальных водосборов (крутопадающих ложбин), в которых накапливается склоновый материал (Рисунок 24, Рисунок П5-8). Многочисленные выклинивания грунтовых вод поддерживают его все время во влажном состоянии, а также обеспечивают наличие потенциальной поверхности скольжения. В большинстве из этих тальвегов наблюдаются процессы медленного оползания (Рисунок 24). При дополнительном выпадении интенсивных осадков, грунт здесь может перейти в состояние вязкопластичной текучести и оползень превратится в относительно быстрый “поток”.

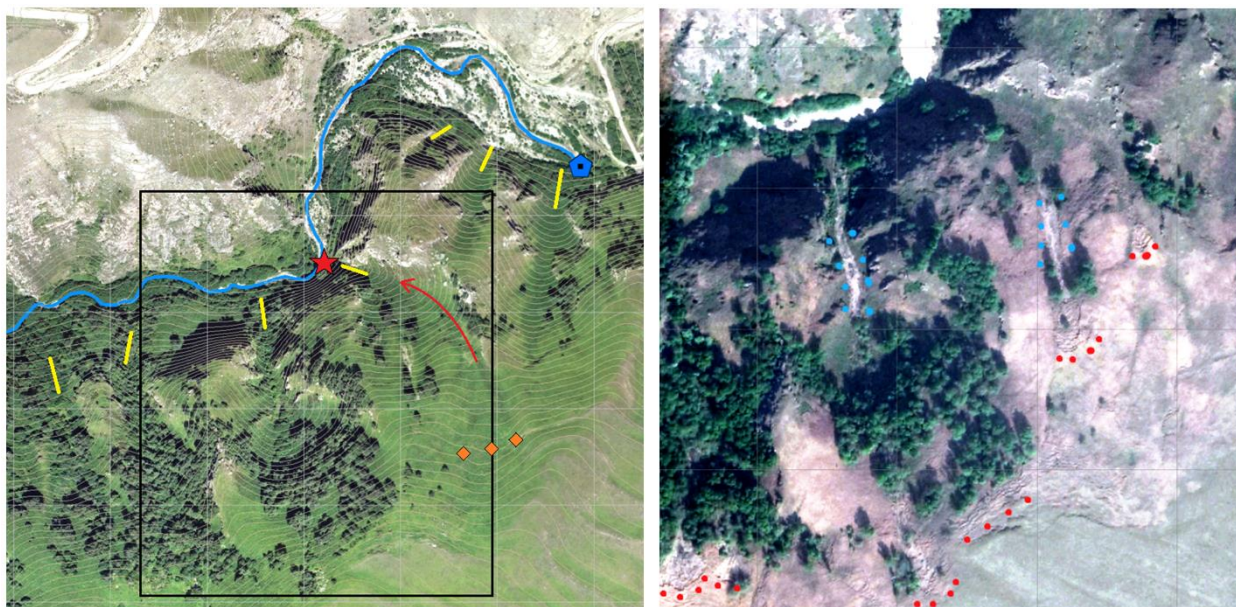


Рисунок 24. Слева: Местоположение всячких тальвегов (желтые маркеры), точек бурения (рыжие маркеры) и моделируемой плотины запрудного озера (красный маркер); синий маркер - портал тоннеля; черная рамка - охват правого рисунка. Фоновое изображение – ортофотоплан с БПЛА, 2023 г.; сечение горизонталей 5 м; шаг сетки 100 м.

Справа: Действующие оползни (красные маркеры по стенкам отрыва) и следы схода оползней-потоков (синие маркеры вдоль “русел”), космический снимок от 5 мая 2018 г. Источник изображения Google Earth Pro TimeLapse; шаг сетки 100 м.

Признаки активного смещения чехла рыхлых отложений на этом участке фиксируются на космических и аэрофотоснимках и подтверждаются полевыми наблюдениями. На описанном участке с помощью ручного бурения была определена мощность делювиально-оползневых масс, скопившихся в днище одной из таких ложбин (Рисунок 24). В трех скважинах, пересекающих зону зарождения небольшого оползня-потока, измеренная мощность рыхлого обломочного чехла колеблется от 0.7 до 1.65 м. Площадь поверхности оползня-потока в той его части, которая была обследована в ходе полевых работ, по материала БПЛА-съемки составляет около 6500 м². Соответственно, объем материала, подготовленного процессами выветривания к дальнейшей транспортировке вниз по тальвегу и локализованного только в одной из таких ложбин, может быть оценен в 6500-7000 м³. Эту цифру стоит считать средней минимальной

оценкой количества материала, которое может одновременно поступить в русло в результате активизации склоновых процессов на этом участке.

Таким образом, при самых консервативных оценках, объем материала, который может поступить в днище долины и непосредственно русло р. Гижгит с одного или нескольких участков в ходе одного события, составляет от 6.5 до первых десятков тысяч м³ грунта (Таблица 3). Такой объем имеет высокую вероятность блокирования стока р. Гижгит с образованием подпрудного водоема (или серии небольших водоемов) выше по течению. Высота дамбы может быть рассчитана, исходя из ширины днища долины, куда непосредственно и открываются крутопадающие ложбины правого борта долины (в среднем, около 60 м на этом участке). При расчетах учитывался и современный рельеф днища долины: выделяются участки (протяженностью около 40 м вдоль русла), представляющие собой нагромождения глыб, валунов, а также стволов деревьев и сильно заросшие древесно-кустарниковой растительностью. Они представляют собой, судя по всему, фрагменты уже разрушенных временных селевых и/или оползневых плотин, возникавших здесь ранее. С учетом различий в возможной морфологии временной дамбы и неопределенности, связанной с оценкой количества материала, которое единоразово может поступить со склона в днище долины, высота плотины (соответственно, и объем подпрудного водоема) может варьировать в существенных пределах: от 3-5 м до 10 и более метров (Таблица 3).

Таблица 3. Оценка параметров плотины и объемов подпрудного водоема.

| Участок днища долины | | Геометрия плотины | Объем материала плотины, тыс. м ³ | Высота плотины (отн.), м | Водоем*, м ³ |
|----------------------|------------------------------|------------------------|--|--------------------------|-------------------------|
| Длина x Ширина, м | Площадь, тыс. м ² | | | | |
| 60 x 40 | 2.4-2.5 | Треугольная в профиле | ~6.5 | ~5 | 3 047 |
| | | Близкая к изометричной | ~12** | | |
| | | Треугольная в профиле | ~12** | ~10 | 24 714 |

* – рассчитано в SAGA 9.3.0 на основе модели Terrain Flooding²⁰ по БПЛА ЦМР (1 м/пикс)

** – с учетом поступления материала из соседнего очага и из зоны транзита

Для оценки расходов прорывного паводка в случае прорыва плотины подпрудного озера использовались эмпирические формулы. Результаты расчетов представлены в Таблица 4. Несмотря на то, что использование подобных эмпирических зависимостей может приводить к недооценке реальных значений [Froehlich, 2022], такой подход является единственной возможностью оценки максимального расхода в условиях недостатка данных для математического моделирования.

²⁰ V. Wichmann, 2022 https://saga-gis.sourceforge.io/saga_tool_doc/8.5.1/ta_hydrology_33.html

Таблица 4. Максимальные расходы прорывного паводка, в случае образования подпрудного озера с высотой дамбы 5 м и 10 м.

| № | Формула | Источник | Высота плотины (H), м | Объем озера (V), м ³ | Максимальный расход (Q _{max}), м ³ /с |
|---|---|-------------------|-----------------------|---------------------------------|--|
| 1 | $Q_{max} = 6.3 \cdot (H^{1.59})$ | [Costa, 1985] | 5 | 3047 | 81 |
| 2 | $Q_{max} = 672 \cdot (V^{0.56})$ | [Costa, 1985] | | | 26 |
| 3 | $Q_{max} = 0.72 \cdot (V^{0.53})$ | [Evans, 1986] | | | 51 |
| 4 | $Q_{max} = 0.0034 \cdot (V^{1/3} / H)^2 \cdot (gH^5)^{1/2}$ | [Froehlich, 2022] | | | 5 |
| 1 | $Q_{max} = 6.3 \cdot (H^{1.59})$ | [Costa, 1985] | 10 | 24714 | 245 |
| 2 | $Q_{max} = 672 \cdot (V^{0.56})$ | [Costa, 1985] | | | 85 |
| 3 | $Q_{max} = 0.72 \cdot (V^{0.53})$ | [Evans, 1986] | | | 153 |
| 4 | $Q_{max} = 0.0034 \cdot (V^{1/3} / H)^2 \cdot (gH^5)^{1/2}$ | [Froehlich, 2022] | | | 29 |

Наибольшие расходы были получены по формуле (1) [Costa, 1985], которая использует в качестве единственной входной характеристики высоту плотины. Разница между формулами (1) и (2), где вторая оперирует не высотой плотины, а объемом подпрудного озера, может достигать более 60 %. Отметим, что использование значения максимального объема в подобных формулах видится авторами более обоснованным решением. Значения, полученные по формуле (4) оказываются значительно ниже остальных. Это может быть связано в том числе с тем, что проверка формулы осуществлялась для крупных запрудных озер с, предположительно, более длительным и постепенным разрушением плотины в силу ее размера.

В целом, для более вероятного сценария с высотой подпрудной плотины в 5 м, полученные значения максимального расхода оказываются сопоставимы или ниже паводков 2002 и 2014 годов, результаты гидродинамического моделирования для которых приведены далее. Поэтому гидродинамическое моделирование для полученных здесь расходов не проводилось.

Резюмируя, сход оползней по височим тальвегам правого борта уже наблюдался в прошлом и благоприятные условия для регулярной повторной реализации этого механизма сохраняются. При этом он с большой вероятностью достигнет русла Гижгита и, из-за геометрии днища долины, перегородит ее. Это вызовет образование подпрудного озера, последующий прорыв которого будет сопровождаться паводком с вовлечением в движение материала плотины. Объем такого озера может оказаться достаточным, чтобы максимальный прорывной расход превысил проектную пропускную способность тоннеля (65 м³/с). Последняя с большой вероятностью будет снижена за счет заполнения припортальной площадки наносами и стволами деревьев. При неблагоприятном развитии ситуации это приведет к стоку через аварийный канал в сторону хвостохранилища. Отдельно отметим, что одна из таких ложбин с готовым к подвижке грунтом располагается в непосредственной близости от портала тоннеля (Рисунок 24).

Гидродинамическое моделирование паводков 2002 и 2014 годов

В 2002 и 2014 гг. в низовьях Гижгита были зафиксированы сильные паводки. В первом случае это было классифицировано как селевой паводок; он сопровождался накоплением перед порталом тоннеля 2-4-метрового слоя наносов и миграцией русла к лотку аварийного сброса, отводящего сток в направлении хвостохранилища. Во втором случае высокие расходы и скорости течения привели к интенсивной эрозии и выносу отложенного ранее материала без ухода стока в сторону озера.

Для первичной оценки развития ситуации при прохождении сильных паводков было выполнено гидродинамическое моделирование. Зона моделирования включала в себя нижний участок русла реки Гижгит и ограничивалась входом в тоннель. Используемая гидродинамическая модель не учитывает процессы донной и боковой эрозии (то есть изменение локального рельефа и вовлечение дополнительного материала в движение), а также движение крупнообломочного материала в селевом потоке. Кроме того, используемая модель FLO-2D является двумерной. В связи с вышеперечисленным движение потока в тоннеле и его пропускная способность не рассматривалась в данных расчетах.

Моделирование проводилось для четырех сценариев. В I сценарии рассматривался паводок с расходом в $100 \text{ м}^3/\text{с}$, что соответствует оценке расхода институтом «Севкавгипроводхоз» паводка 2002 года [Запорожченко, Докукин, 2019]. Во II сценарии проводился расчет селевого потока с тем же расходом. В III сценарии проводилось моделирование паводка 2014 года с расходом в $62.5 \text{ м}^3/\text{с}$ [Запорожченко, Докукин, 2019]. В IV сценарии был произведен расчет селевого потока с тем же расходом. По результатам моделирования были получены карты пространственного распределения глубин (Рисунок 25) и скоростей потока.

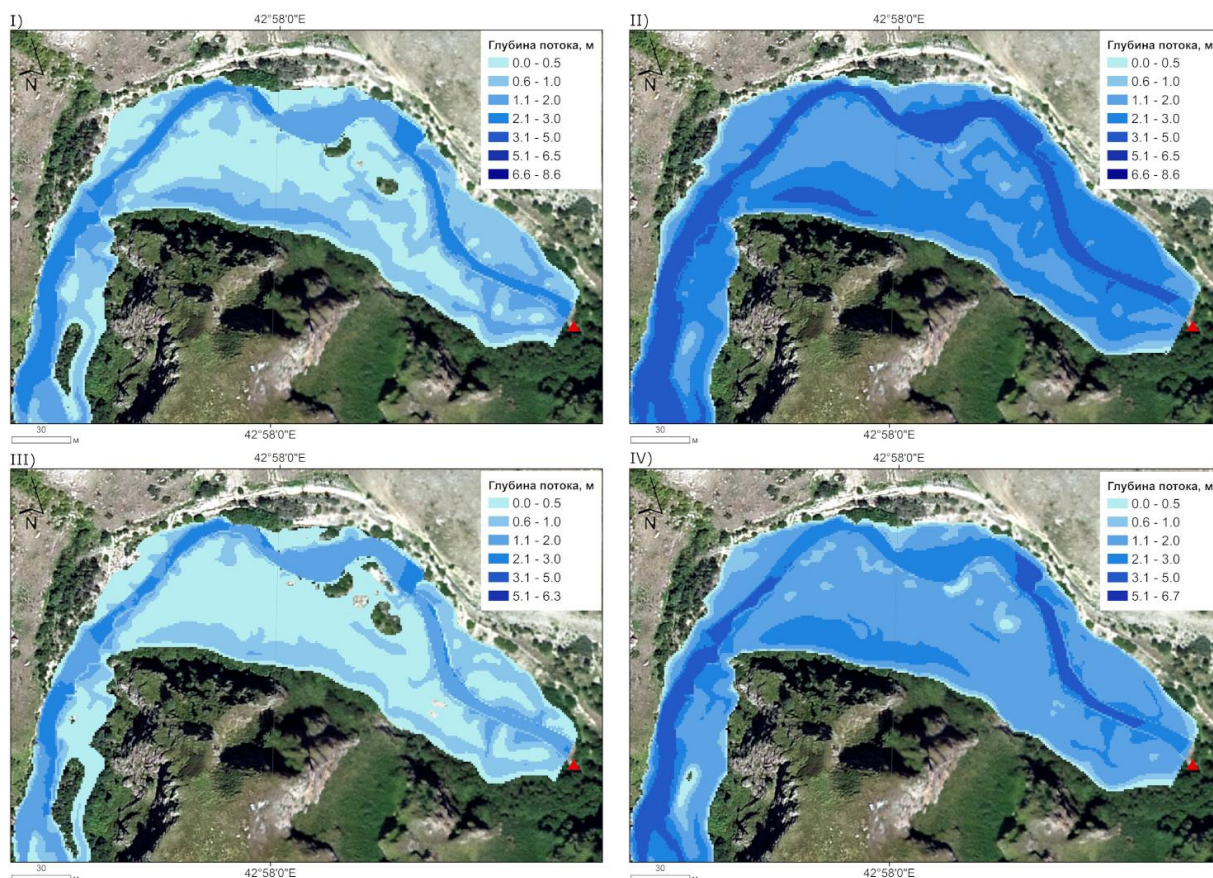


Рисунок 25. Результаты моделирования прохождения паводков и селевых потоков на основе программного комплекса FLO-2D. Входной портал водопропускного тоннеля обозначен красным треугольником. I) водный паводок с расходом в $100 \text{ м}^3/\text{с}$; II) селевой поток с расходом в $100 \text{ м}^3/\text{с}$; III) водный паводок с расходом в $62.5 \text{ м}^3/\text{с}$; IV) селевой поток с расходом в $62.5 \text{ м}^3/\text{с}$.

Согласно I сценарию, глубина потока в русле реки Гижгит на рассматриваемом участке составляет около 3 м, а средняя скорость - около 3 м/с. На прилегающих участках эти величины будут соответственно до 2 м (0.5 на значительной части территории) и 3 м/с. По II сценарию при моделировании селевого потока глубина в русле будет составлять более 4 м, а на прилегающей территории от 2 до 3 м. Скорость потока в русле будет достигать 3 м/с, на соседних участках упадет до 1.5 м/с. В III сценарии глубина в русле на некоторых участках будет достигать 2.5 м, а средняя скорость потока - 3 м/с. На большей части участка глубина затопления не поднимется выше 0.5 м, и скорость будет равняться приблизительно 2 м/с. По IV сценарию для селевого потока наблюдается увеличение глубины потока в русле реки до 4 м и снижение, относительно водного потока, скорости до 2 м/с. На прилегающих участках глубина и скорость будут составлять не более 2.5 м и 1.5 м/с соответственно.

Результаты моделирования показывают, что даже при прохождении паводка с расходом, соответствующим пропускной способности тоннеля, рассматриваемый участок долины и вся площадка перед порталом оказываются в зоне затопления. При полученных значениях скорости потока и типичном гранулометрическом составе старых селевых отложений (Рисунок 18) это означает, что прирусловой рыхлый материал и древесно-кустарниковая растительность с большой площади могут быть вовлечены в поток.

В случае движения большого количество материала может наблюдаться уменьшение пропускной способности тоннеля. В ситуации превышения расхода над пропускной способностью тоннеля уровень воды формирующегося водоема быстро достигнет высоты аварийного лотка в местной дамбе и начнется сток в сторону хвостохранилища: при расходе воды в $100 \text{ м}^3/\text{с}$ и полностью функционирующем тоннеле на это потребуется около получаса (Приложение Пб. Расчет времени начала перелива оз. Гижгит через плотину).

Перелив озера Гижгит через плотину хвостохранилища

Одним из потенциальных последствий высоких расходов воды в реке и/или нарушения работы тоннеля называют сток реки напрямую в хвостохранилище, с дальнейшим превышением критического уровня озера и началом его перелива через дамбу хвостохранилища [Анаев, 2021; Гегиев и др., 2018; Запорожченко, Докукин, 2019; Шерхов, Гергокова, 2022]. В случае большого расхода образующегося переливного ручья, авторы предсказывают возможность развития эрозии и каскадных эффектов, способных привести к разрушению всей дамбы.

По имеющимся данным мы оценили диапазон времени, необходимого для начала такого перелива (Приложение Пб. Расчет времени начала перелива оз. Гижгит через плотину). Для расчетов был взят постоянный расход реки в $100 \text{ м}^3/\text{с}$, оцененный как имевший место в 2002 г. [Запорожченко, Докукин, 2019]. Доступный для заполнения “буферный” объем был оценен по ЦМР с привлечением снимков; он составляет около 70 тыс. м^3 для водоема, формирующегося перед порталом тоннеля, и почти 2.5 млн. м^3 для озера Гижгит при уровнях воды и рельефе местности на 2022-2023 гг. То есть этот доступный объем суммарно меньше, чем соответствующий расчетный потенциальный объем паводочного стока (3.1 млн. м^3) при указанном расходе [Запорожченко, Докукин, 2019].

При наиболее неблагоприятном развитии событий, упрощенно рассматриваемом как немедленная и полная закупорка водопропускного тоннеля, формирование водоема перед тоннелем до уровня сброса воды через аварийный лоток в местной дамбе займет 10 минут, и еще через 7 часов будет достигнут критический уровень озера Гижгит. При этом расчетный потенциальный объем паводочного стока при указанном потенциальном расходе (3.1 млн. м^3) превысит доступный “буферный” объем озера на 0.6 млн. м^3 .

В наиболее благоприятном сценарии, при сохранении полной пропускной способности тоннеля, “избыточный” расход будет составлять $35 \text{ м}^3/\text{с}$, что в 3 раза меньше предыдущего сценария. Сток в сторону озера начнется через 30 минут, а для начала перелива озера речной расход в $100 \text{ м}^3/\text{с}$ должен сохраняться в течение еще 19 часов.

Как было показано в предыдущих разделах, типичной причиной возникновения высоких речных расходов в долине являются сильные дожди. Поэтому второй сценарий, с переливом при исправно функционирующем тоннеле, можно оценить как на порядок менее вероятный, чем первый, в силу необходимой для его реализации продолжительности интенсивных ливней.

Заключение

Несмотря на более чем полувековую историю существования критической инфраструктуры в низовьях, река Гижгит и ее долина являются малоизученными в гидрологическом и геоморфологическом плане. В частности, критически важным для любых работ по обеспечению стабильной работы ГТС остается вопрос расходов воды редкой повторяемости.

Одним из основных итогов исследования является типизация подбассейнов и фасеток склонов в долине Гижгита, в основу которой были положены морфологические и ландшафтные критерии. Проведенная типизация позволила систематизировать имеющиеся сведения о бассейне с точки зрения механизмов транзита наносов, а также выявить участки, представляющие потенциальную опасность для хозяйственной деятельности. Основным механизмом, который может генерировать селевые потоки в долине Гижгита, является вовлечение склонового материала в водный поток, вызванное активизацией оползневых процессов в подбассейнах. Несмотря на то, что условия для проявлений оползневой и селевой активности есть во многих подбассейнах, проведенные исследования позволяют утверждать, что опасность для потенциальной инфраструктуры могут представлять только относительно небольшие по площади подбассейны: типа 1А (расположенные на нижнем отрезке течения Гижгита, непосредственно у портала тоннеля) и типа 3Б (расположенные в верховья долины). Именно первые требуют более детальных исследований и мониторинга для разработки эффективных мер инженерной защиты существующих ГТС.

Гидродинамическое моделирование позволило численно оценить глубину и скорость паводков и селевых потоков, как для участка перед тоннелем, так и в верховьях реки для одного из типичных селевых бассейнов. Это позволило приблизиться к оценке потенциальной угрозы существующим объектам инфраструктуры указанными процессами.

Полевые исследования на ключевых участках показали, что в случае активизации оползневых процессов в районе портала водопропускного тоннеля велика вероятность формирования подпрудного водоема (или серии небольших водоемов) в русле Гижгита. Прорыв такой временной подпруды рассматривается как один из вероятных механизмов возникновения селевого потока или селевого паводка. Вторым важным механизмом рассматривается активное насыщение сильного паводка прирусловым материалом за счет боковой эрозии ранее отложенных наносов.

Водопропускной тоннель, отводящий сток Гижгита в обход хвостохранилища, играет ключевую роль с точки зрения безопасности основной дамбы и хвостохранилища в целом. Так как на дамбе отсутствуют сооружения для водопропуска, а о состоянии шахт аварийного сброса сведений нет, стабильное функционирование тоннеля, с обеспечением проектной пропускной способности, можно считать единственным фактором, который сейчас нивелирует опасность развития событий по наименее благоприятному из возможных сценариев: сток через аварийный канал в сторону хвостохранилища, переполнение последнего и начало неконтролируемого перелива через дамбу. Одновременно портал тоннеля является самой уязвимой частью ГТС: в частности, не существует никаких дополнительных сооружений, которые бы препятствовали его блокировке наносами или карчем.

Анализ разновременных архивных дистанционного зондирования и опубликованных материалов является основой для оценки и прогноза опасности селевых явлений в ближайшем будущем. В ходе этой работы были получены данные, свидетельствующие о том, что селевые процессы активно протекали в верховьях долины на момент принятия проектного решения о строительстве водопропускного тоннеля; на основе исторических и современных материалов были актуализированы сведения о селевой опасности бассейна Гижгита. Можно с уверенностью утверждать, что имеются все условия для повторения событий, аналогичных произошедшим в 2002 и 2014 гг. А в условиях бывших и будущих изменений климата и землепользования стоит ожидать рост повторяемости и интенсивности селевых потоков и карчеходов в долине.

Дополнительные сведения

Благодарности

д.г.н. **Голосову Валентину Николаевичу**, Институт Географии РАН / Географический ф-т МГУ – за общее руководство проектом и выделение средств гранта РФФИ #19-17-00181-Р на его реализацию

к.г.н. **Иванову Максиму Михайловичу**, Институт Географии РАН / Географический ф-т МГУ – за помощь в подготовке и личное участие в полевых работах 2023 г.

к.г.н. **Харченко Сергею Владимировичу**, Институт Географии РАН / Географический ф-т МГУ – за выполнение БПЛА-съемки и ее обработку

к.г.н. **Цыплёнкову Анатолию Сергеевичу**, Географический ф-т МГУ – за консультацию по метеорологическим и гидрологическим данным, подготовку и предоставление данных по м/с Терскол

к.г.н. **Торопову Павлу Алексеевичу**, Институт Географии РАН / Географический ф-т МГУ – за подготовку и предоставление данных по м/с Терскол

к.т.н. **Мирному Анатолию Юрьевичу**, Геологический ф-т МГУ – за выполнение лабораторных испытаний грунтов и анализ полученных результатов, включая составление Приложения П4.

Доступность данных

Все данные, использованные в работе и представленные в данном отчете, включая высокодетальные ЦМР на основе БПЛА-съемки, могут быть представлены по запросу на условиях лицензии CC BY-SA (корректное цитирование и сохранение производных продуктов также в открытом доступе).

Финансирование

Проект реализован за счет средств гранта РФФИ #19-17-00181-Р (рук. Голосов В.Н.)

Вклад авторов

Гуринов А.Л. – поиск и обработка геолого-геоморфологических данных; полевые обследования и обработка полевых данных; подготовка разделов по геологии и геоморфологии территории, оценке размеров запрудной дамбы, Приложения П1-4 и П3.

Деркачева А.А. – концептуализация и дизайн исследования; поиск и обработка геоданных; подготовка разделов по методикам и данным, описанию объекта и природных условий, классификации суббассейнов, оценке времени перелива, Приложений П1, П2, П4, П5, введения и заключения; оформление отчета.

Юдина В.А. – поиск гидрологических данных; подготовка разделов по селевому и гидродинамическому моделированию, включая проведение расчетов.

Список литературы

1. Анаев М. А. Обеспечение безопасности территории бассейна реки Гижгит (Баксанское ущелье, Кабардино-Балкария) // Жизнь Земли. 2021.
2. Битюков Н. А. Экология горных лесов Причерноморья. Сочи: СИМБиП, ФГУ «НИИГорлесэкол», 2007. 397 с.
3. Виноградов Ю. Б. Транспортный и транспортно–сдвиговый селевые процессы // Селевые потоки: сб. статей / под ред. Ю. Б. Виноградов, Т. Л. Киренская. Москва: Гидрометеиздат, 1980а. С. 3–19.
4. Виноградов Ю. Б. Этюды о селевых потоках. Ленинград: Гидрометеиздат, 1980б. 160 с.
5. Виноградов Ю. Б., Виноградова Т. А. Математическое моделирование в гидрологии. Москва: Академия, 2010. 304 с.
6. Винокуров С. Ф., others. Экологические риски хранения отходов Тырнаузского вольфрамо-молибденового комбината и проблемы их комплексной утилизации: монография / под ред. Л. З. Кулова, Т. П. Ханиева. Нальчик: Каб.-Балк. ун-т, 2018. 130 с.
7. Гегиев К. А. и др. Экологические проблемы Тырнаузского хвостохранилища на реке Гижгит // Вестник МГСУ. 2018.
8. Запорожченко Э. В., Докукин М. Д. Об угрозе разрушения Тырнаузского хвостохранилища на р. Гижгит в КБР // ГеоРиск. 2019.
9. Кондратьева Н. В. и др. Кадастр селевой опасности юга европейской части России / под ред. Н. В. Кондратьева. Москва; Нальчик: Феория, 2015. 148 с.
10. Куприянова В. В. Ресурсы поверхностных вод СССР. Основные гидрологические характеристики. Северный Кавказ. Ленинград: Гидрометиздат, 1973.
11. Кюнж Ж., Холли Ф., Вервей Ф. Численные методы в задачах речной гидравлики. М.: Энергоатомиздат, 1985. 255 с.
12. Перов В. Ф. Карта селевых бассейнов Северного Кавказа, 1:200 000 // 2012.
13. Рахманов В. В. Гидроклиматическая роль лесов. Москва: Лесная промышленность, 1984. 240 с.
14. Сейнова И. Б. и др. Опыт прогнозирования селей в условиях деградации оледенения на Центральном Кавказе // Геориск. 2018.
15. Тайсумов М. А. и др. Эколого-поисковой анализ ксерофитов флоры российского Кавказа // Вестник КрасГАУ: Биологические науки. 2016. № 12.
16. Таланов Е. А., Херхеулидзе Г. И. Пространственно-временные закономерности характеристик ливневых осадков и селевых потоков на Кавказе // ГеоРиск. 2018.
17. Шерхов А. Х., Гергокова З. Ж. Оценка актуального состояния некоторых компонентов комплекса гидротехнических сооружений хвостохранилища Тырнаузского горно-обогатительного комбината // Природообустройство. 2022.
18. Юдина В. А., Юдин Н. Е., Виноградова Т. А. Программа для расчета прорывного паводка и селевого потока (FLOVI) // 2022.
19. Cavalli M. и др. Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments // Geomorphology. 2013. Т. 188. С. 31–41.
20. Costa J. E. Floods from dam failures. Denver: , 1985. 54 с.
21. Crema S., Cavalli M. SedInConnect: a stand-alone, free and open source tool for the assessment of sediment connectivity // Comput. Geosci. 2018. Т. 111. С. 39–45.
22. Critchley W., Siegert K. Rainfall-runoff analysis: A manual for the Design and Construction of Water Harvesting Schemes for Plant Production. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1991.
23. Derkacheva A., Golosov V., Shvarev S. Hazardous exogenous geological processes in the mountains under the pressure of human activity: 15-year observations from a natural landscape to a large ski resort // Nat. Hazards. 2024. Т. 120. № 3. С. 2847–2868.
24. Evans S. G. The maximum discharge of outburst floods caused by the breaching of man-

made and natural dams // *Can. Geotech. J.* 1986. Т. 23. № 3. С. 385–387.

25. Froehlich D. C. Predicting Landslide Dam Outburst Flood Peak Discharge. , 2022. С. 119–132.

26. Martini L., Cavalli M., Picco L. Predicting sediment connectivity in a mountain basin: A quantitative analysis of the index of connectivity // *Earth Surf. Process. Landforms.* 2022. Т. 47. № 6. С. 1500–1513.

27. O'Brien J. S., Julien P. Y. Laboratory analysis of mudflow properties // *J. Hydraul. Eng.* 1988. Т. 114. № 3. С. 877–887.

28. O'Brien J. S., Julien P. Y., Fullerton W. T. Two-dimensional water flood and mudflow simulation // *J. Hydraul. Eng.* 1993. Т. CXIX. № 2. С. 244–261.

29. O'Callaghan J. F., Mark D. M. The extraction of drainage networks from digital elevation data // *Comput. Vision, Graph. Image Process.* 1984. Т. 28. № 3. С. 323–344.

30. Schmidt S., Tresch S., Meusburger K. Modification of the RUSLE slope length and steepness factor (LS-factor) based on rainfall experiments at steep alpine grasslands // *MethodsX.* 2019. Т. 6. С. 219–229.

31. Vinogradova T. A., Vinogradov A. Y. The experimental debris flows in the Chemolgan river basin // *Nat. Hazards.* 2017. Т. 88. № S1. С. 189–198.

32. Zanandrea F., Michel G. P., Kobiyama M. Impedance influence on the index of sediment connectivity in a forested mountainous catchment // *Geomorphology.* 2020. Т. 351. С. 106962.

33. Каталог селеопасных рек на территориях Северного Кавказа и Закавказья / под ред. Г. Н. Хмаладзе. , 1969.

34. Геологическая карта: К-38-I,VII (Кисловодск). Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Издание второе, серия: Кавказская // 2004.

35. Объяснительная записка: Государственная геологическая карта РФ масштаба 1:200 000. Издание второе, серия: Кавказская. Листы К-38-I, VII (Кисловодск) / под ред. Н. Л. Энна. СПб.: ФГУГП Кавказгеолсъёмка, 2004. 364 с.

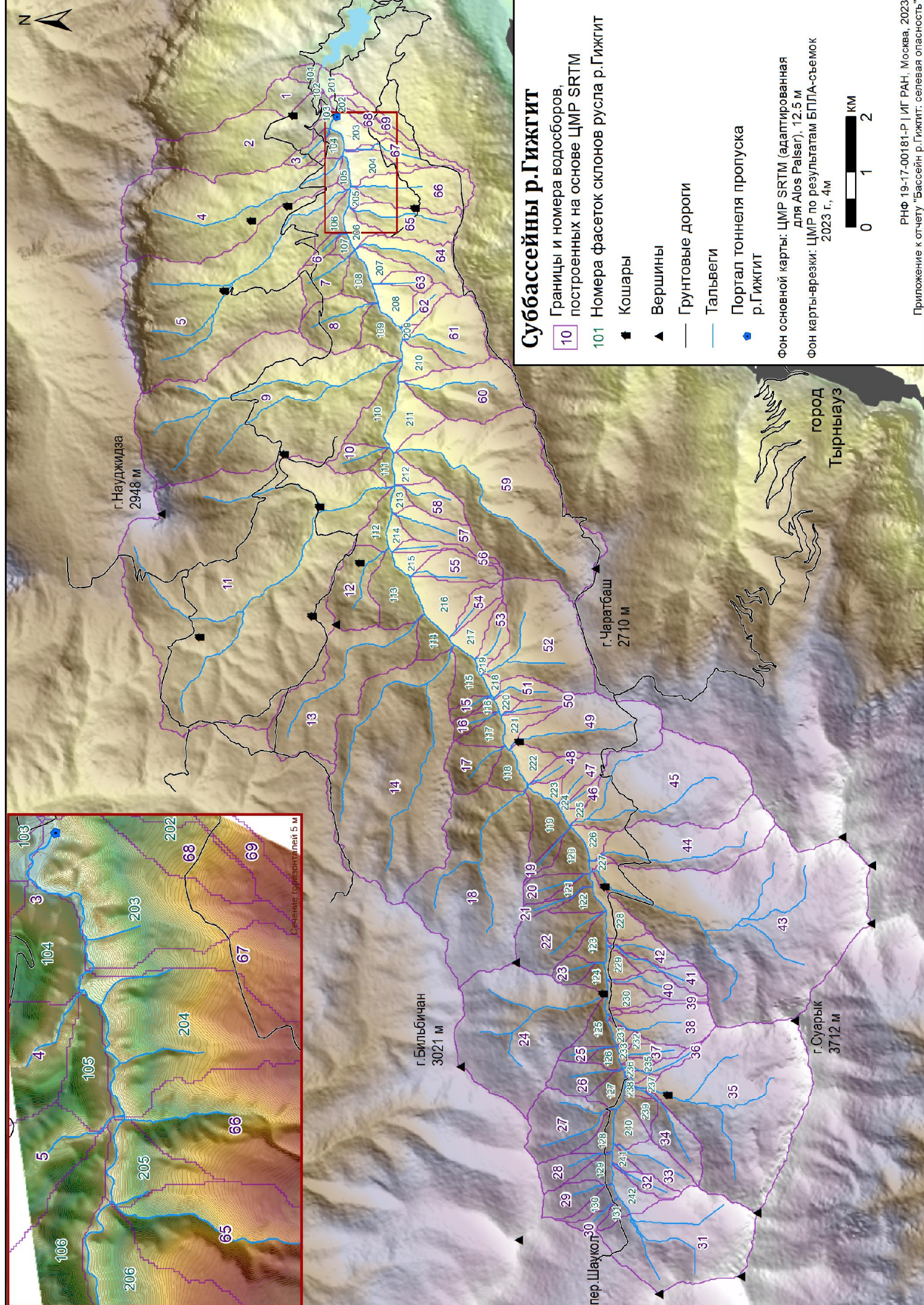
36. Ледники и климат Эльбруса / под ред. В. Н. Михаленко. М.; СПб.: Нестор-История, 2020.

37. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В. М. Катцов. Санкт-Петербург: Научные технологии, 2022.

Приложения

П1. Картографические материалы

- П1-1 Инвентаризация суббассейнов и фасеток склонов в долине р.Гижгит (на фоне ЦМР)
- П1-2 Инвентаризация суббассейнов и фасеток склонов в долине р.Гижгит (на фоне космического снимка Sentinel-2 от 16.07.2021)
- П1-3 Маршруты полевых обследований и места отбора образцов (Фактические материалы)
- П1-4 Геологическое строение
- П1-5 LS-фактор
- П1-6 Индекс связанности потоков наносов: до портала тоннеля
- П1-7 Индекс связанности потоков наносов: до русла р.Гижгит
- П1-8 Оползневая активность и выходы грунтовых вод
- П1-9 Селевая активность
- П1-10 Классификация суббассейнов

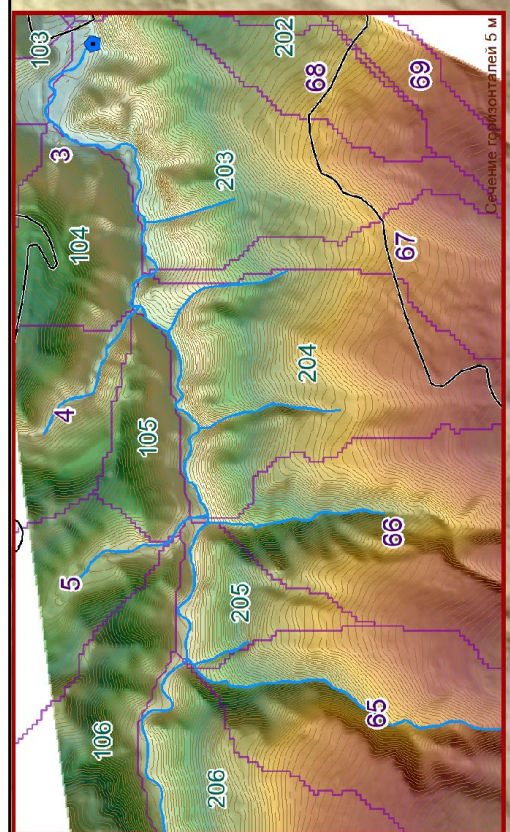


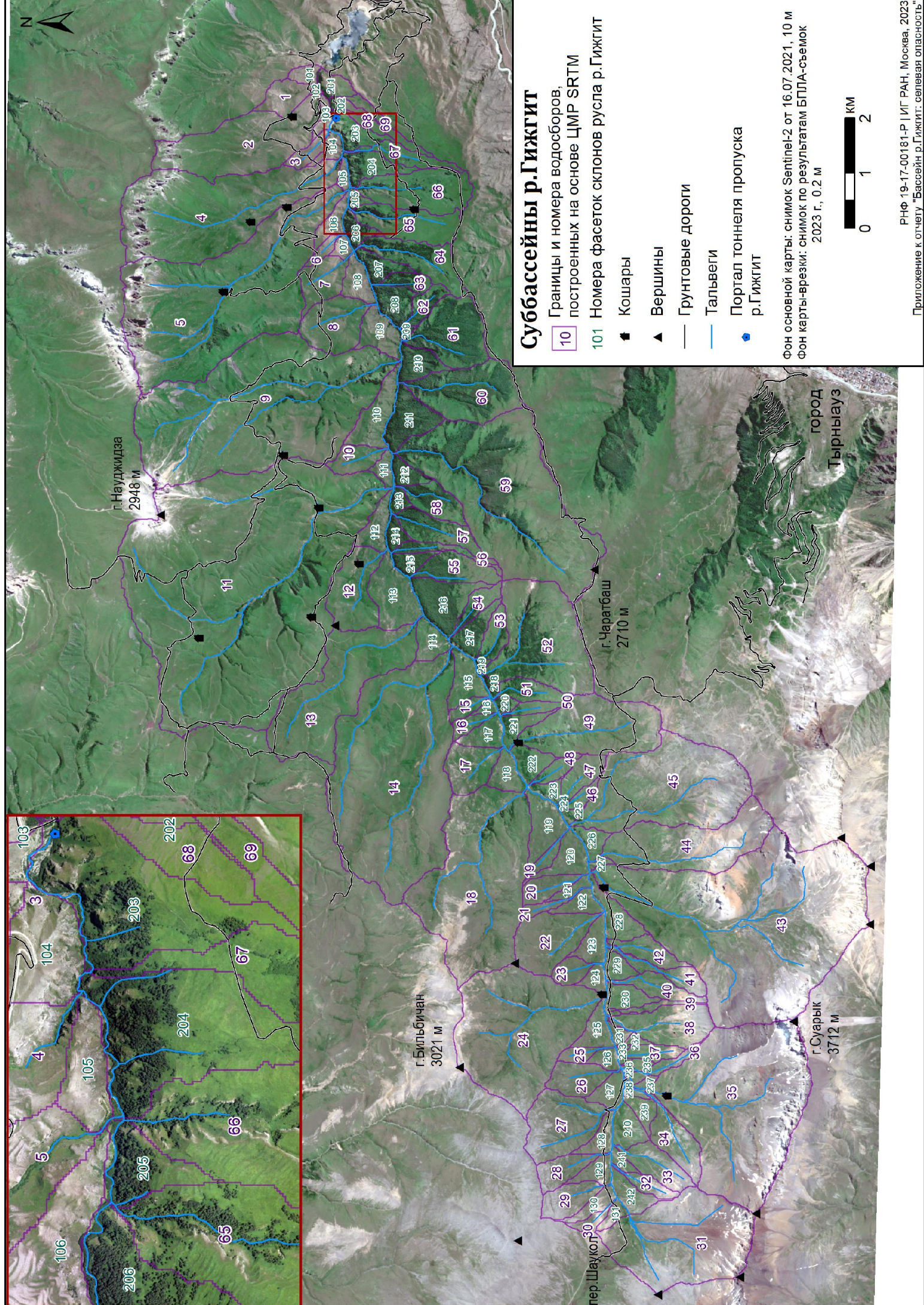
Суббассейны р.Гижигит

- 10 Границы и номера водосборов, построенных на основе ЦМР SRTM
- 101 Номера фасеток склонов русла р.Гижигит
- ▲ Кошары
- ▲ Вершины
- Грунтовые дороги
- Тальвеги
- Портал тоннеля пролука р.Гижигит

Фон основной карты: ЦМР SRTM (адаптированная для Alos Palsar), 12,5 м
 Фон карты-врезки: ЦМР по результатам БПЛА-съёмки 2023 г., 4м

0 1 2 км

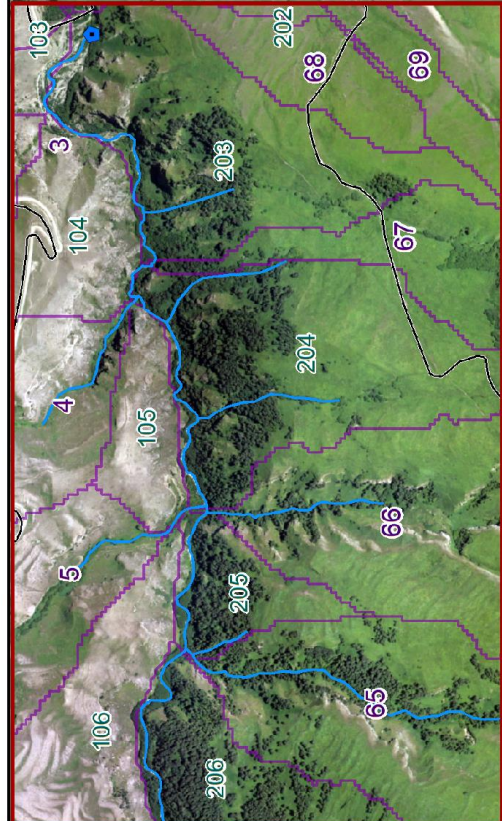
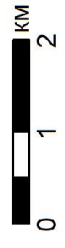




Суббассейны р. Гижигит

- 10 Границы и номера водосборов, построенных на основе ЦМР SRTM
- 101 Номера фасеток склонов русла р. Гижигит
- ▲ Кошары
- ▲ Вершины
- Грунтовые дороги
- Тальвеги
- Портал тоннеля пропуска р. Гижигит

Фон основной карты: снимок Sentinel-2 от 16.07.2021, 10 м
 Фон карты-врезки: снимок по результатам БППА-съёмки 2023 г., 0,2 м



г. Наудждидза
2948 м

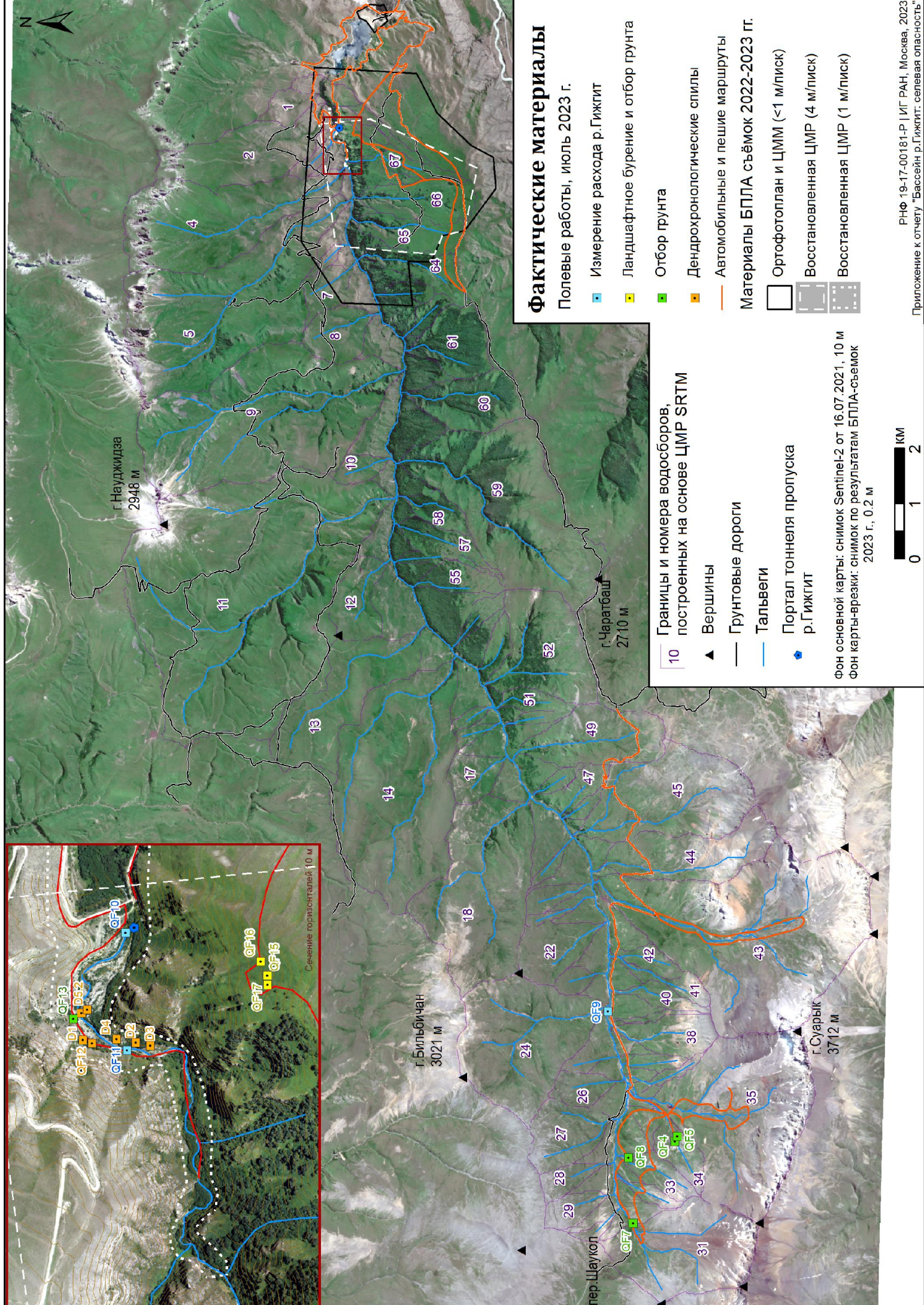
г. Чаратбаш
2710 м

г. Бильбичан
3021 м

г. Суарык
3712 м

пер. Шаукол
30

город
Тырныауз



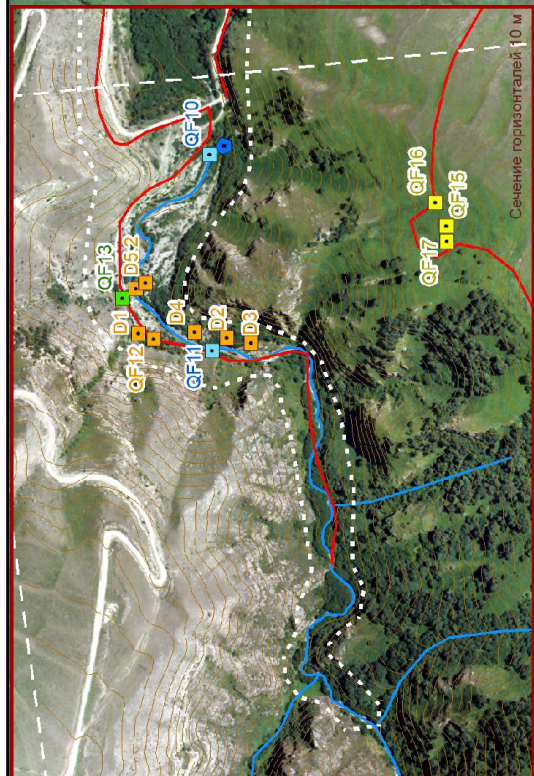
Фактические материалы

Полевые работы, июль 2023 г.

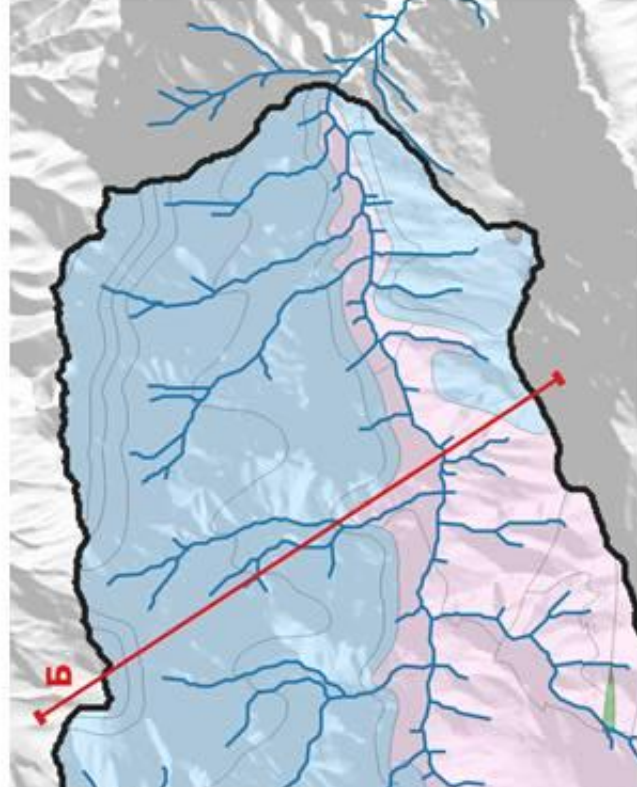
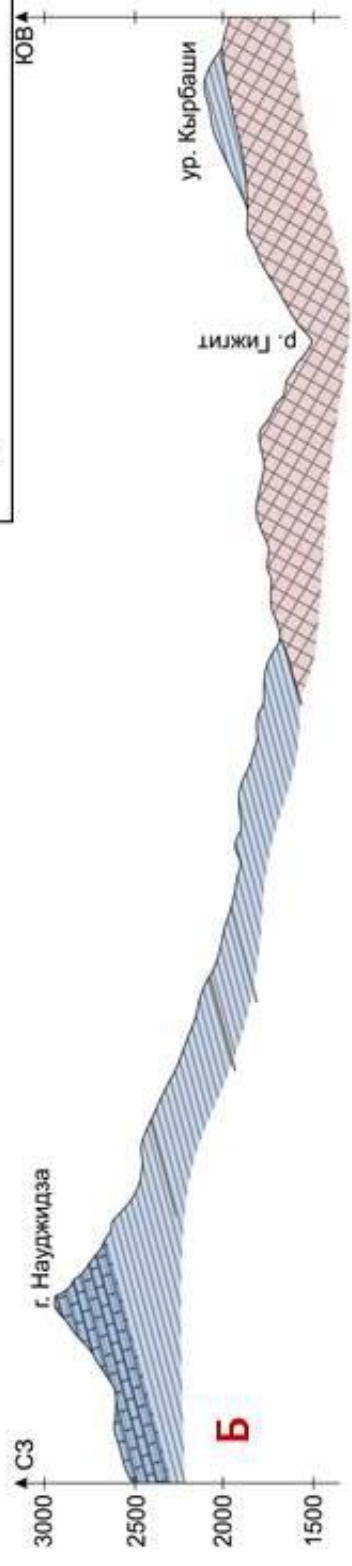
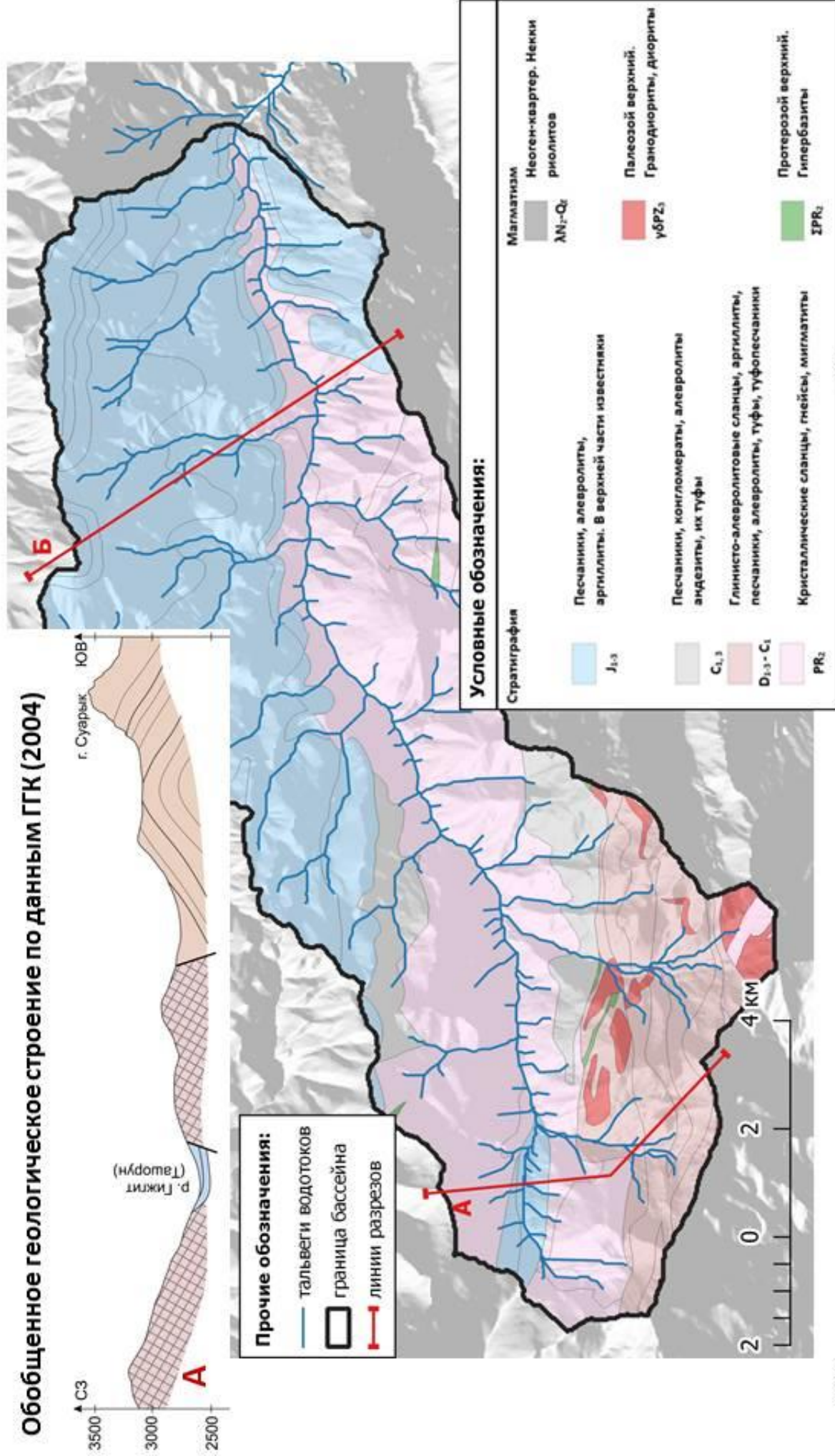
- Измерение расхода р. Гижигит
 - Ландшафтное бурение и отбор грунта
 - Отбор грунта
 - Дендрохронологические спилы
 - Автомобильные и пешие маршруты
- Материалы БПЛА съёмок 2022-2023 гг.
- Ортофотоплан и ЦММ (<1 м/пикс)
 - Восстановленная ЦМР (4 м/пикс)
 - Восстановленная ЦМР (1 м/пикс)

Границы и номера водосборов, построенных на основе ЦМР SRTM

- 10 Границы и номера водосборов, построенных на основе ЦМР SRTM
 - ▲ Вершины
 - Грунтовые дороги
 - Тальвеги
 - Портал тоннеля пропуска р. Гижигит
- Фон основной карты: снимок Sentinel-2 от 16.07.2021, 10 м
 Фон карты-врезки: снимок по результатам БПЛА-съёмки 2023 г., 0,2 м



Обобщенное геологическое строение по данным ГГК (2004)



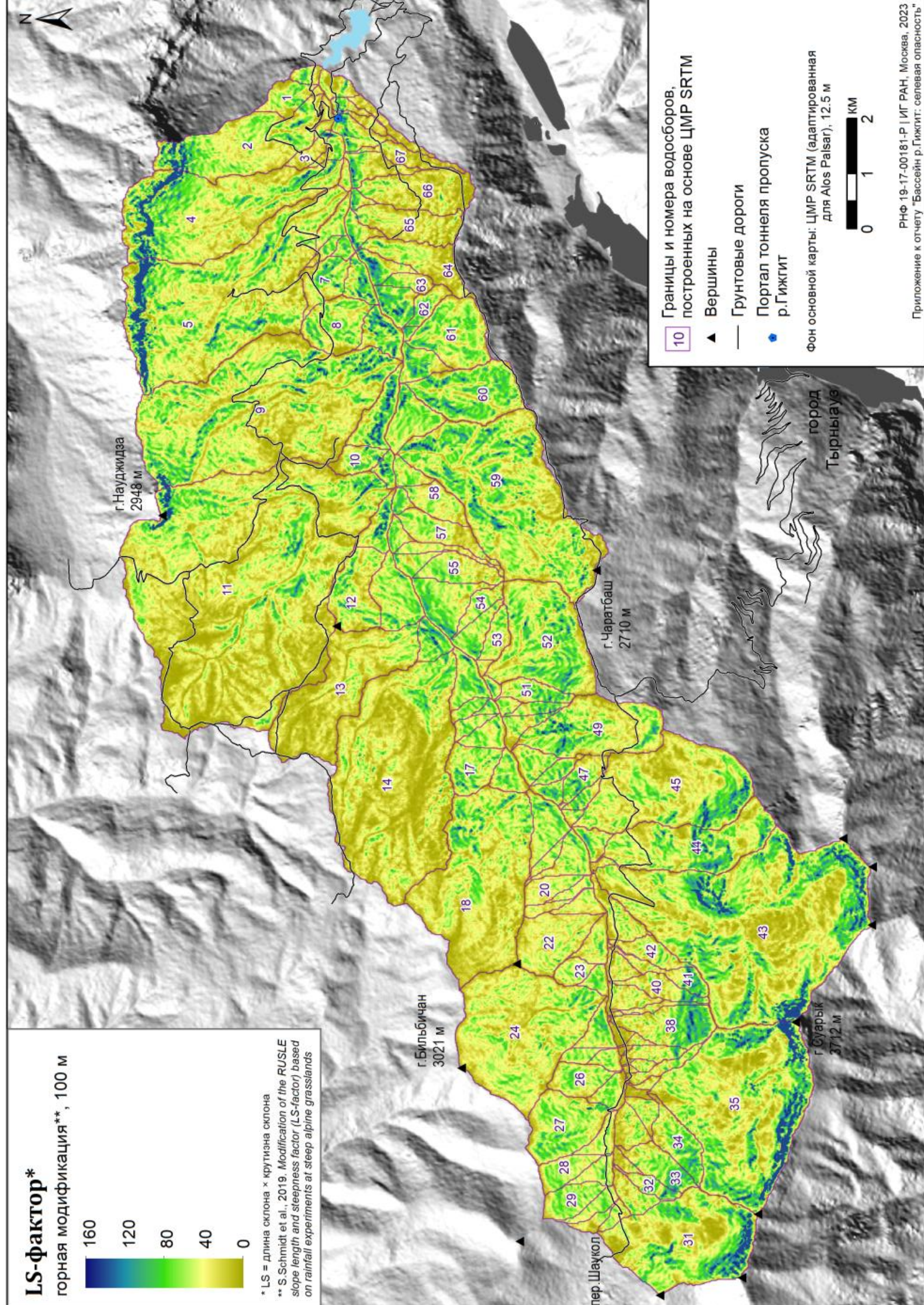
LS-фактор*

горная модификация**, 100 м



* LS = длина склона × крутизна склона

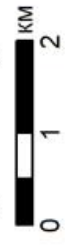
** S. Schmidt et al., 2019. Modification of the RUSLE slope length and steepness factor (LS-factor) based on rainfall experiments at steep alpine grasslands



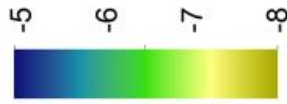
Границы и номера водосборов, построенных на основе ЦМР SRTM

- 10
- ▲ Вершины
- Грунтовые дороги
- Портал тоннеля пропуск р. Гижигит

Фон основной карты: ЦМР SRTM (адаптированная для Alos Palsar), 12.5 м

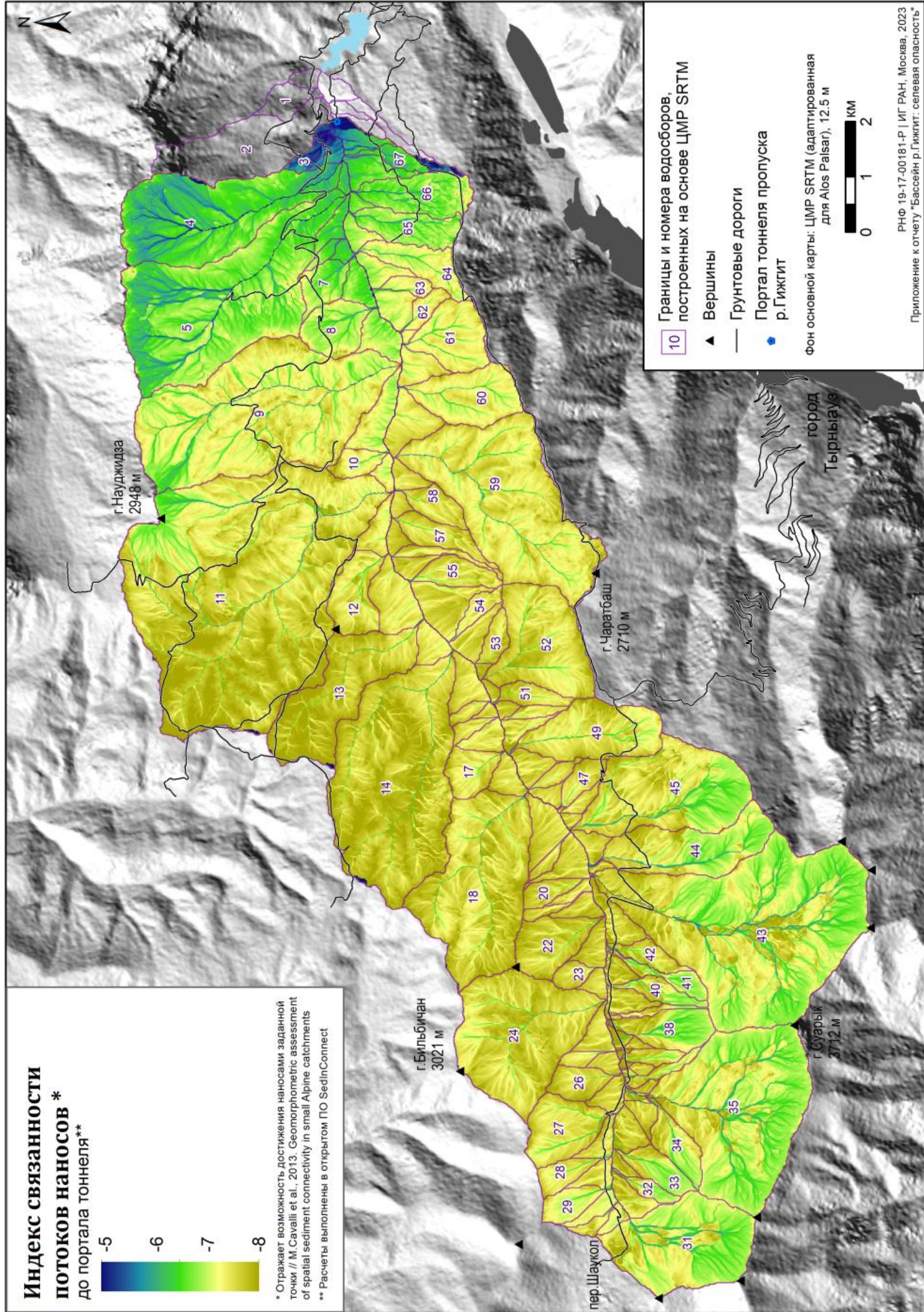


Индекс связанности потоков наносов * до портала тоннеля**



* Отражает возможность достижения наносами заданной точки // M. Cavalli et al., 2013. Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments

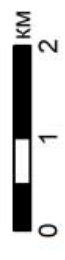
** Расчеты выполнены в открытом ПО SedInConnect



Границы и номера водосборов, построенных на основе ЦМР SRTM

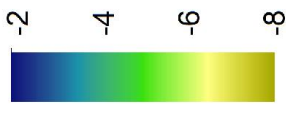
- ▲ Вершины
- Грунтовые дороги
- Портал тоннеля пропуска р. Гижигит

Фон основной карты: ЦМР SRTM (адаптированная для Alos Palsar), 12.5 м

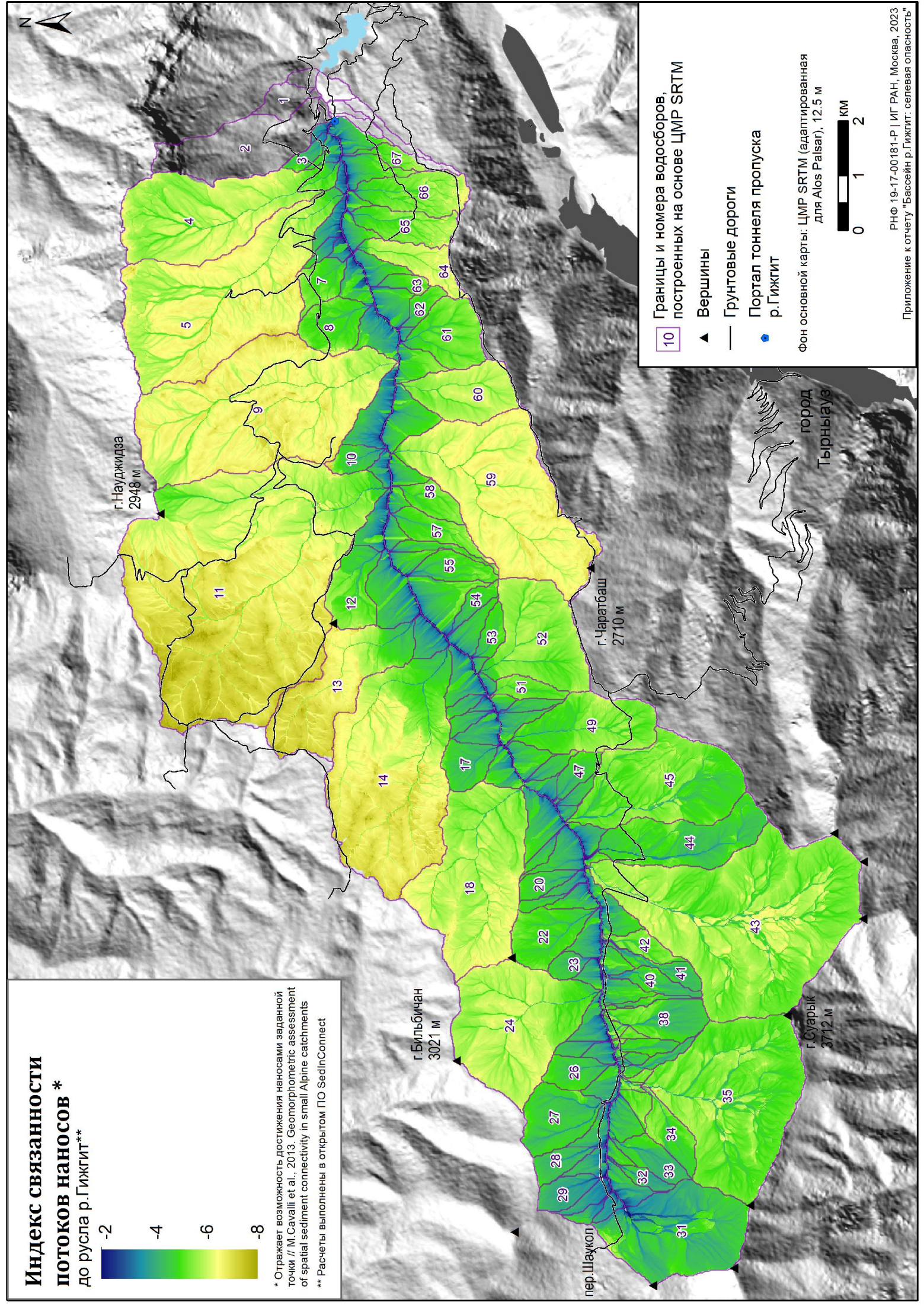


Индекс связанности ПОТОКОВ НАНОСОВ *

до русла р. Гижгит**



* Отражает возможность достижения наносами заданной точки // M. Cavalli et al., 2013. Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments
 ** Расчеты выполнены в открытом ПО SedInConnect



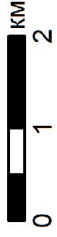
Границы и номера водосборов,
построенных на основе ЦМР SRTM

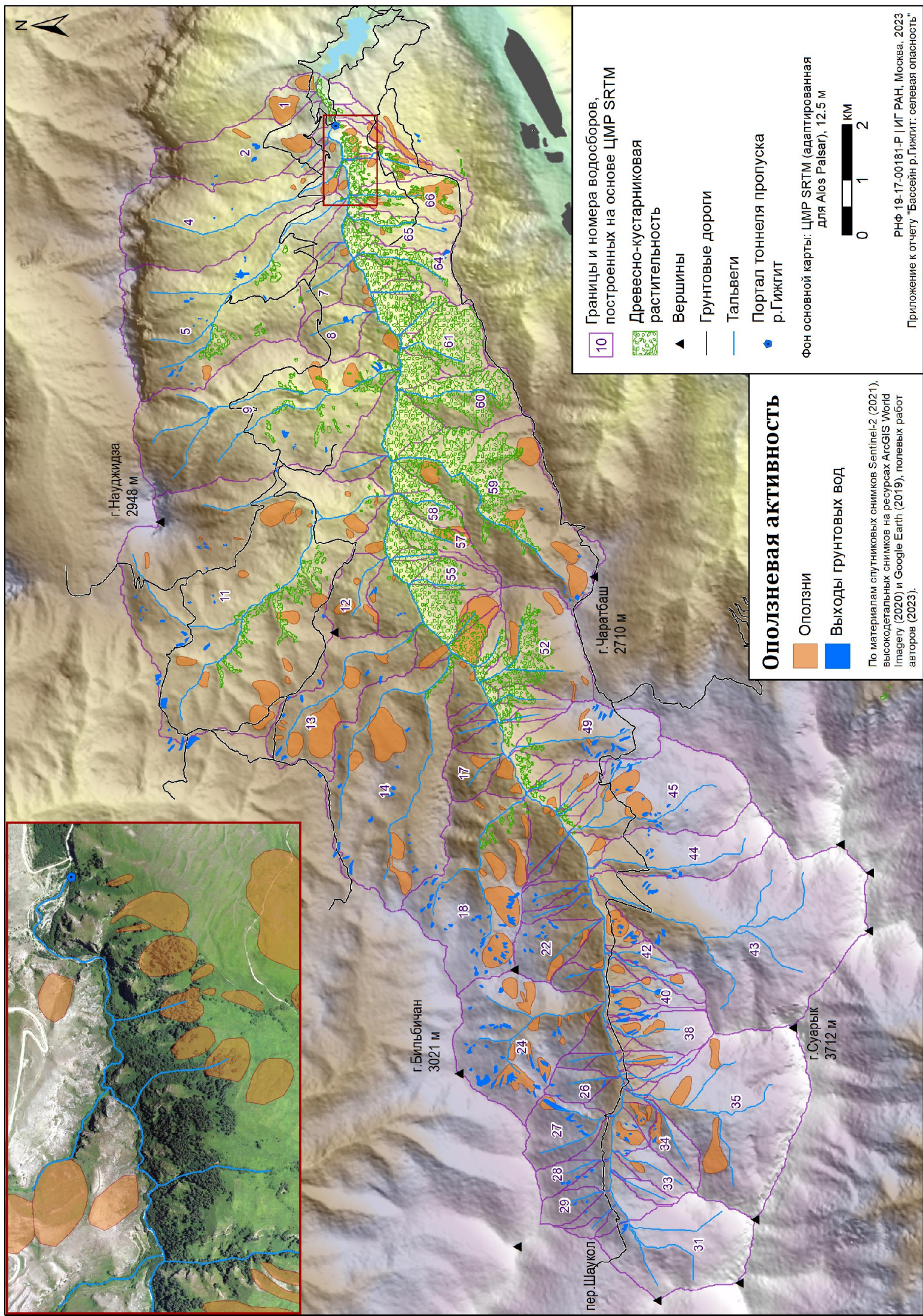
▲ Вершины

— Грунтовые дороги

Портал тоннеля пропуска
р. Гижгит

Фон основной карты: ЦМР SRTM (адаптированная
для Alos Pass), 12.5 м





Границы и номера водосборов, построенных на основе ЦМР SRTM

Древесно-кустарниковая растительность

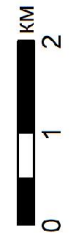
Вершины

Грунтовые дороги

Тальвеги

Портал тоннеля пропуска р. Гижигит

Фон основной карты: ЦМР SRTM (адаптированная для Alos Palsar), 12.5 м



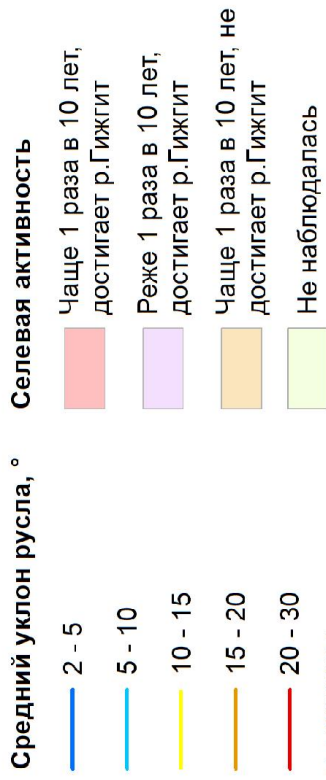
Оползневая активность

Оползни

Выходы грунтовых вод

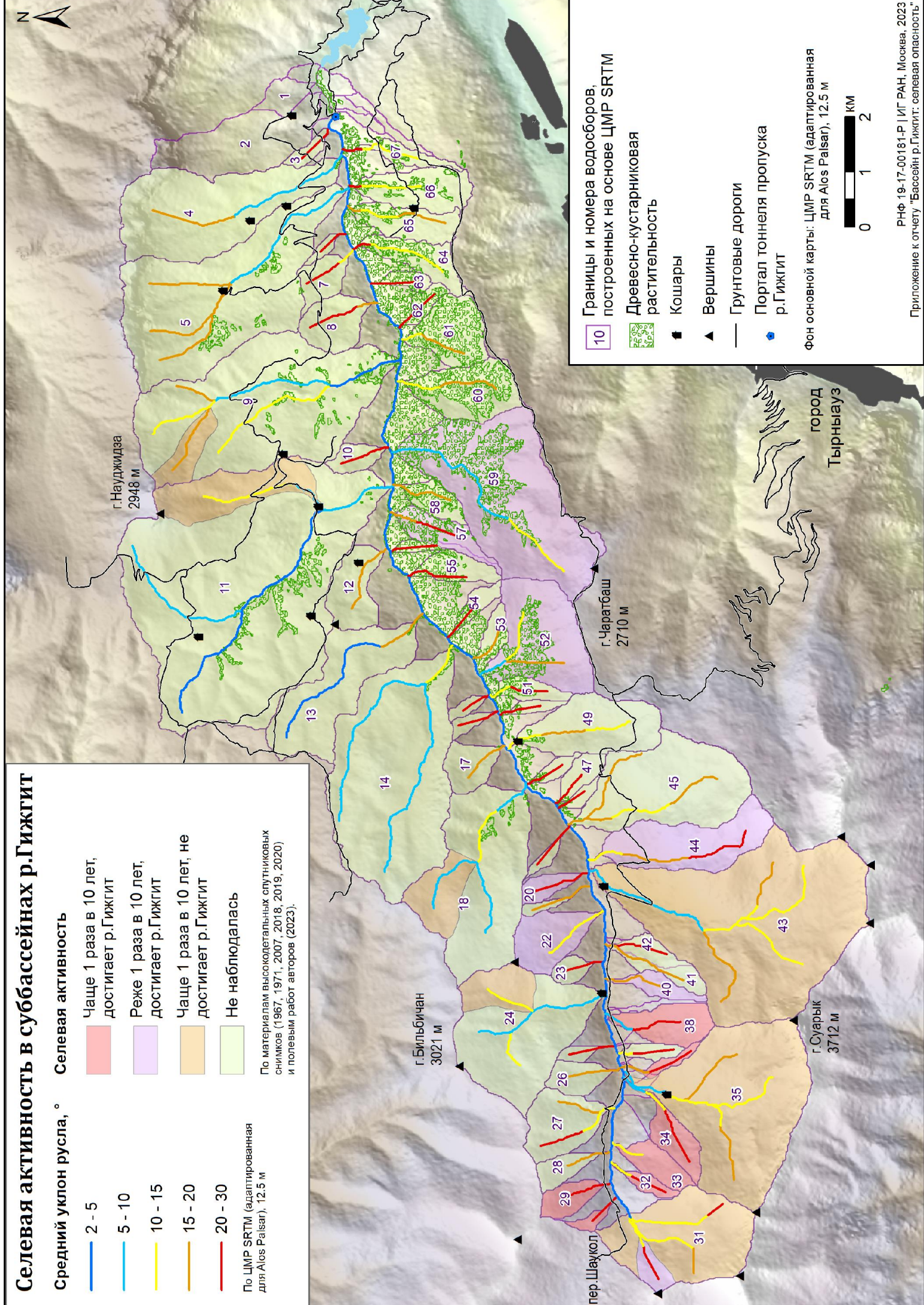
По материалам спутниковых снимков Sentinel-2 (2021), высокодетальных снимков на ресурсах ArcGIS World Imagery (2020) и Google Earth (2019), полевых работ авторов (2023).

Селевая активность в суббассейнах р. Гижигит



По материалам высокоточных спутниковых снимков (1967, 1971, 2007, 2018, 2019, 2020) и полевым работ авторов (2023).

По ЦМР SRTM (адаптированная для Alos Palsar), 12,5 м



Границы и номера водосборов, построенных на основе ЦМР SRTM

Древесно-кустарниковая растительность

Кошары

Вершины

Грунтовые дороги

Портал тоннеля пропуска р. Гижигит

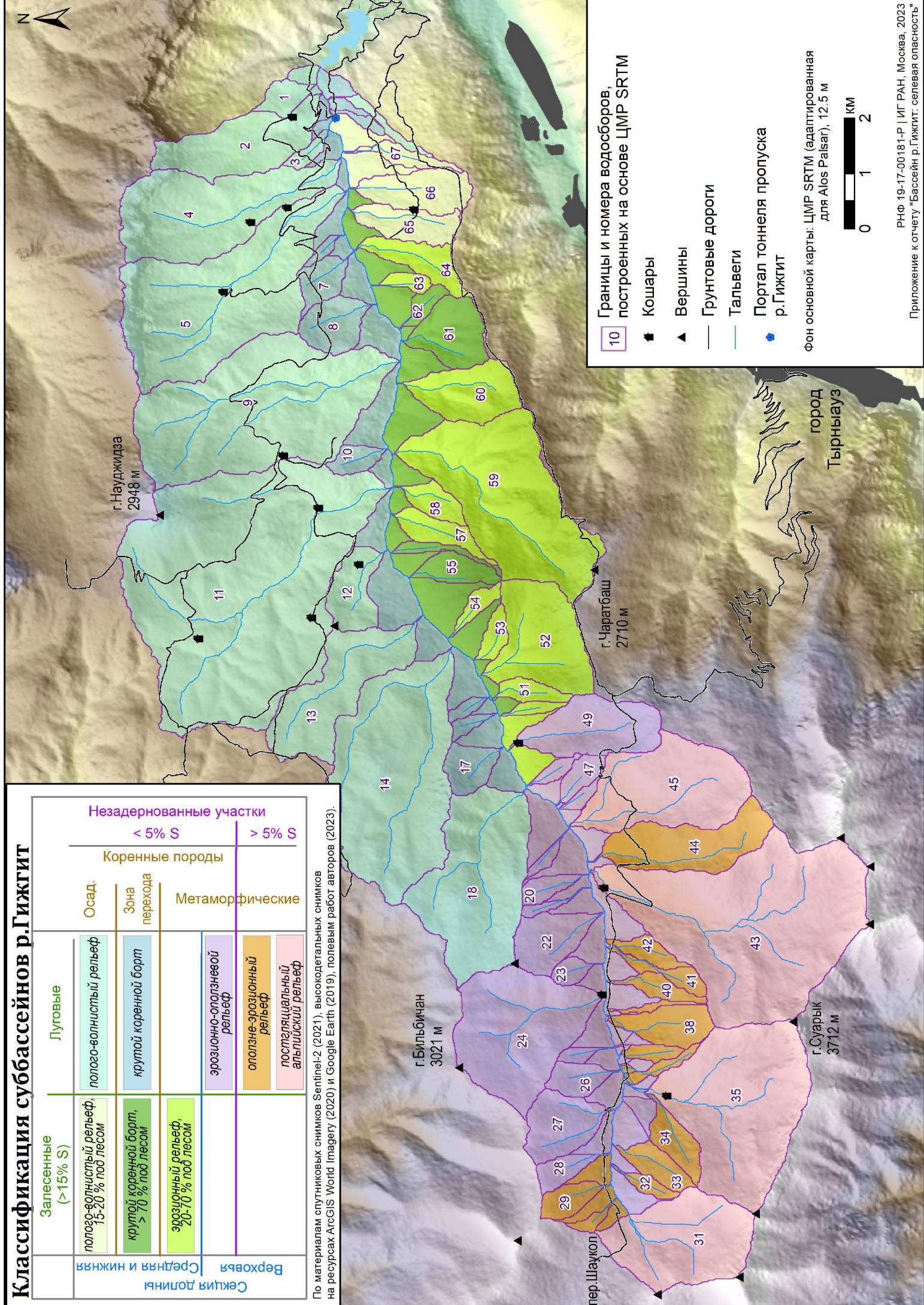
Фон основной карты: ЦМР SRTM (адаптированная для Alos Palsar), 12,5 м

0 1 2 км

Классификация суббассейнов р. Гижигит

| Залесенные (>15% S) | Луговые | |
|--|--|-------------------------|
| | полого-волнистый рельеф, 15-20 % под лесом | полого-волнистый рельеф |
| крутой коренной борт, > 70 % под лесом | крутой коренной борт | > 5% S |
| эрозионный рельеф, 20-70 % под лесом | эрозионно-оползневой рельеф | Коренные породы |
| | оползне-эрозионный рельеф | Осад. |
| | постгляциальный альпийский рельеф | Зона перехода |
| | | Метаморфические |

По материалам спутниковых снимков Sentinel-2 (2021), высокодетальных снимков на ресурсах ArcGIS World Imagery (2020) и Google Earth (2019), полевым работ авторов (2023).



Границы и номера водосборов, построенных на основе ЦМР SRTM

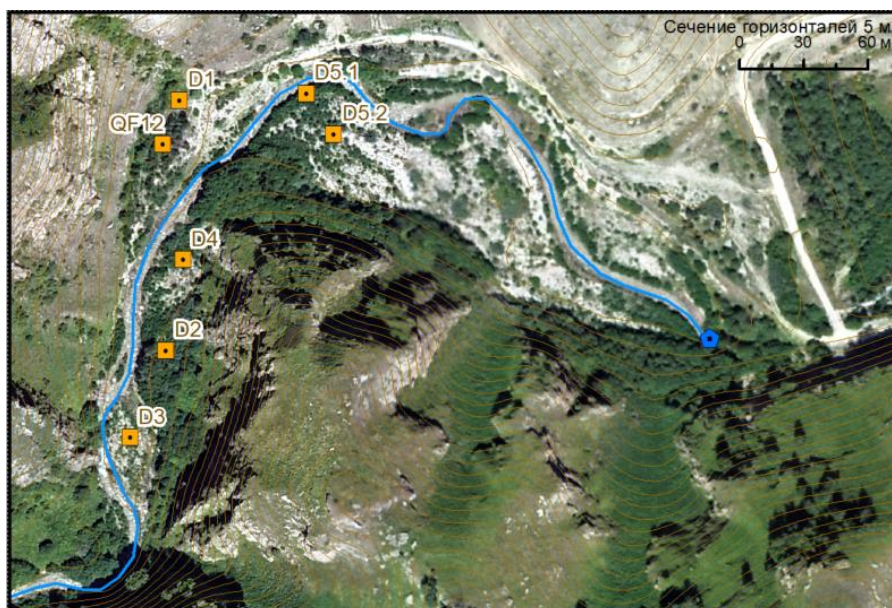
- 10 Границы и номера водосборов, построенных на основе ЦМР SRTM
- Кошары
- Вершины
- Грунтовые дороги
- Тальвеги
- Портал тоннеля пропуска р. Гижигит

Фон основной карты: ЦМР SRTM (адаптированная для Alos Palsar), 12.5 м

0 1 2 км

РНФ 19-17-00181-Р | ИГ РАН, Москва, 2023
Приложение к отчету "Бассейн р. Гижигит: селевая опасность"

П2. Дендрохронологические образцы



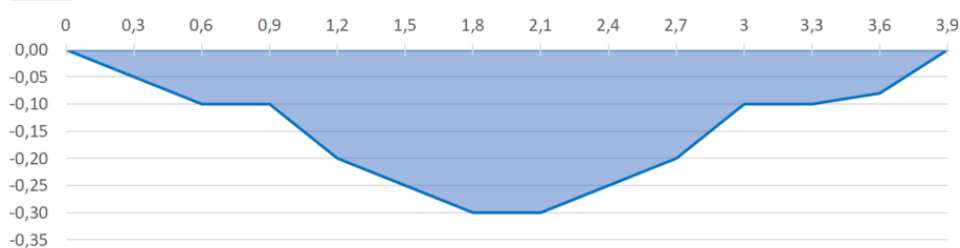
Рыжие маркеры - места отбора образцов, синий маркер - портал тоннеля.
Фон: ортофотоснимок от 30.07.2023

| Точка | Описание | Возраст методом подсчета годовых колец на спице, лет / Диаметр, см |
|-------|---|--|
| QF12 | Высокая селевая терраса с выраженным валом, заросшая мелколиственными породами. | 16 / 8 Береза |
| D1 | Высокая селевая терраса с выраженным валом, заросшая мелколиственными породами. | 21 / 15 Береза |
| D2 | Высокая селевая терраса с выраженным валом, заросшая сомкнутым березово-ольховым молодняком. Отмечаются мох на грунте, лишайники на камнях, облепиха, можжевельник. | 15 / 14 Береза |
| D3 | Речной осередок, заливаемый в половодье. | 4, 5 / 3.5, 4 Ива, ива |
| D4 | Низкая селевая терраса, заросшая более высокими деревьями по микровалу вдоль реки и менее заросшая за валом. | 11 / 8 Ольха |
| D5.1 | Прирусловой вал низкой селевой террасы (основного правобережного поля аккумуляции), плотно заросший взрослыми деревьями. | 16 / 6 Ольха |
| D5.2 | Низкая селевая терраса, основное правобережное поле аккумуляции за прирусловым валом. Наблюдаются признаки регулярного обводнения. | 15 / 6.5 Ольха |

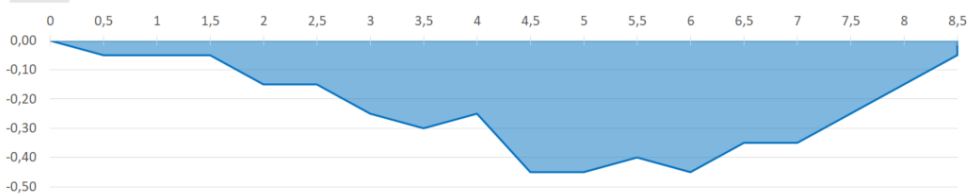
ПЗ. Измерения расходов воды в р.Гижгит

| Точка | V _{измер.} , м/с | | | V _{сред.} , м/с | S _{попер.} , м | Q, м ³ /с |
|---|---------------------------|------|------|--------------------------|-------------------------|----------------------|
| | | | | | | |
| QF9, верхне-среднее течение, 28.07.2023 г. | 1,50 | 1,17 | 0,80 | 1,15 | 0,61 | 0,7 |
| QF10, нижнее течение, непосредственно перед входом в портал сливного тоннеля, 29.07.2023 г. | 1,17 | 0,78 | 1,21 | 1,05 | 2,06 | 2,2 |
| QF11, нижнее течение, перед полем аккумуляции у портала сливного тоннеля, 29.07.2023 г. | 1,54 | 1,33 | 1,44 | 1,44 | 2,11 | 3 |

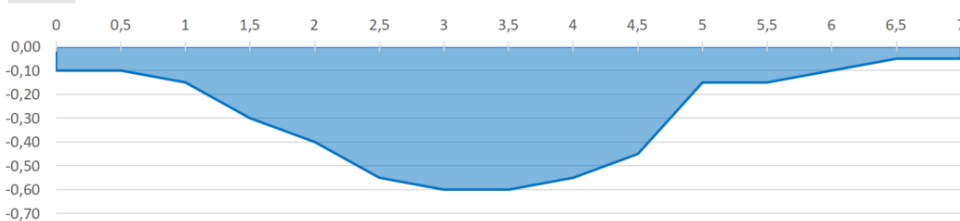
QF9



QF10



QF11



П4. Лабораторные испытания грунтов

Образцы нарушенной и ненарушенной структуры отбирались из различных точек (см. Приложение П1-3), дата отбора и полевое описание приведены в Таблице П4-1.

Таблица П4-1. Даты отбора и полевое описание образцов

| Образец | Дата отбора | Состояние | Комментарий |
|---------|-------------|-----------|--|
| QF4 | 26.07.2023 | наруш. | из селевой гряды (рыхлый, много обломков) |
| QF5 | 26.07.2023 | монолит | из оползня (переувлажненный, вязкий суглинок) |
| QF7 | 27.07.2023 | наруш. | из селевого конуса (очень плотный) |
| QF8 | 27.07.2023 | монолит | микротеррасы (супесь темно-серая, почва) |
| QF15 | 30.07.2023 | наруш. | из тела оползня (легкий суглинок/супесь серая, почва) |
| QF16 | 30.07.2023 | монолит | из оползня (суглинок светлый переувлажненный, пластичный - зеркало скольжения оползня, элювий) |
| QF13 | 29.07.2023 | наруш. | из селевых отложений, днище долины |

Испытания образцов проводились на базе лаборатории механики грунтов кафедры Инженерной и экологической геологии Геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, а также ООО «Геоцентр МГУ».

Для представленных образцов были проведено определение параметров физических и физико-механических свойств. Для образцов, представленных несвязными грунтами, определялся гранулометрический состав методом промывки по ГОСТ 12536-2014 и параметры сопротивления сдвигу методом одноплоскостного среза по ГОСТ 12248.1-2020. Для образцов, представленных пылевато-глинистыми грунтами, определялись естественная влажность и плотность, пределы пластичности по ГОСТ 5180-2015, параметры сопротивления сдвигу по ГОСТ 12248.1-2020 и максимальная молекулярная влагоемкость по РСН 51-84.

Результаты определения гранулометрического состава для образцов несвязного грунта представлены в Таблице П4-2.

Таблица П4-2. Результаты определения гранулометрического состава

| Образец / Фракция | 10> | 10-5 | 5-2 | 2-1 | 1-0,5 | 0,5-0,25 | 0,25-0,1 | <0,1 |
|---------------------------|--------|--------|--------|--------|-------|----------|----------|--------|
| QF4 Дресвяный грунт | 31,59% | 17,92% | 16,20% | 12,45% | 7,04% | 5,21% | 6,52% | 3,31% |
| QF7 Дресвяный грунт | 30,12% | 16,19% | 13,53% | 12,31% | 7,92% | 6,85% | 5,67% | 7,41% |
| QF13 Гравелистый песок | 16,99% | 9,42% | 13,25% | 15,43% | 7,95% | 4,33% | 2,12% | 30,51% |
| QF15 Супесь пылеватая | 3,32% | 1,91% | 2,40% | 2,05% | 1,40% | 1,35% | 7,61% | 79,95% |

Плотность образцов нарушенной структуры при сборке принималась условно по средней плотности сложения.

Определение параметров прочности выполнялось методом одноплоскостного среза в консолидированно-дренированном режиме с кинематическим приложением деформации сдвига в приборах АСИС ГТ 1.2.11 производства ООО «НПП Геотек». Для всех образцов приняты нормальные напряжения 50, 100 и 150 кПа, исходя из глубины отбора образцов и природного напряженного состояния. Скорость деформации среза была принята равной 0,03 мм/мин. На Рисунке П4-1 представлены полученные диаграммы прочности.

Для образцов QF7 и QF8 параметры сопротивления сдвигу однозначно определить не удалось из-за недостаточного количества материала и значительного разброса значений.

Для этих образцов сцепление было принято равным нулю, и определялся только угол внутреннего трения.

Для образца QF13 были получены значения сцепления 30 кПа и угла внутреннего трения 10° , что не соответствует гравелистому песку. При высокой плотности сложения и давлениях обжатия больше 200-300 кПа гравелистые пески могут проявлять зацепление, однако в данном случае полученные значения скорее всего являются следствием заклинивания обойм прибора. В связи с этим сцепление было принято равным нулю, определялся только угол внутреннего трения.

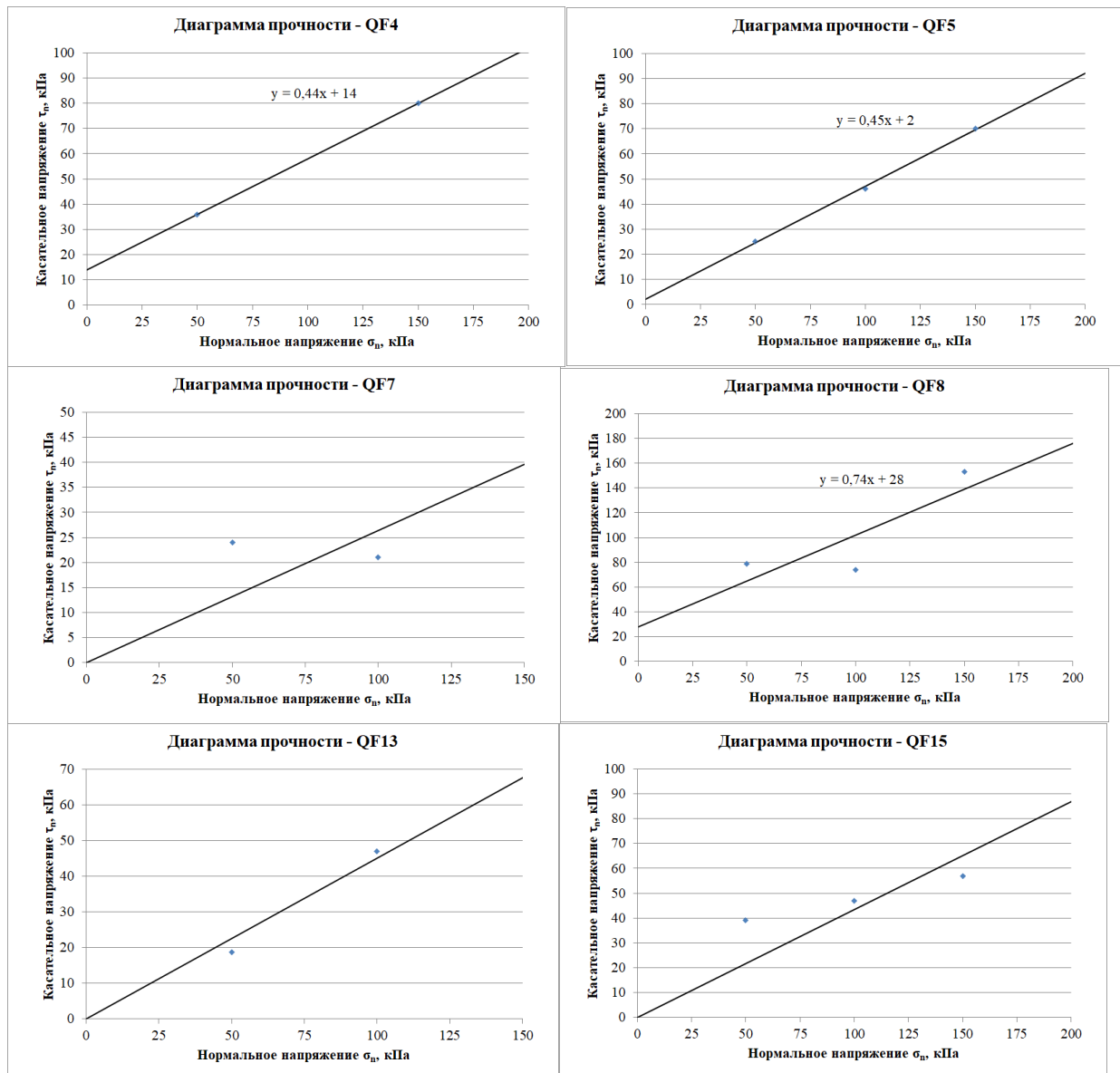


Рисунок П4-1. Диаграммы прочности, полученные методом одноплоскостного среза

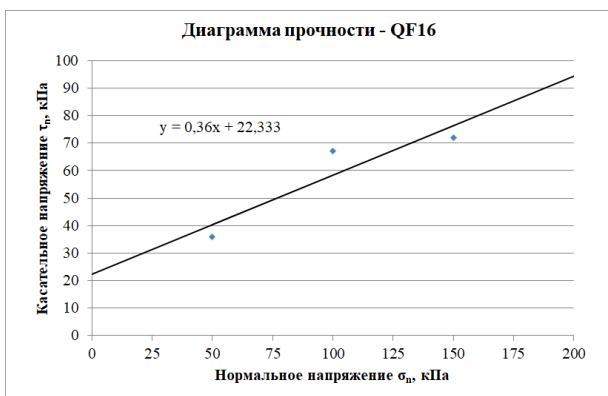


Рисунок П4-1 (продолжение). Диаграммы прочности, полученные методом одноплоскостного среза

Дополнительно для образцов QF5 и QF16 были выполнены испытания трехосного сжатия в приборах АСИС ГТ 1.3.2 производства ООО «НПП Геотек». Испытания проводились в консолидированно-дренированном режиме, с изотропной консолидацией при давлениях 50 и 150 кПа. Скорость вертикального нагружения была принята 0,03 мм/мин.

Образец QF5 при водонасыщении значительно снижает жесткость и сильно уплотняется при минимальных нагрузках – этим объясняются очень низкие значения модуля деформации.

Образец QF16 также имеет крайне низкую жесткость, и водонасыщенном состоянии относится к слабым грунтам.

Малое количество образцов не позволяет уверенно определить параметры сопротивления сдвигу. Тем не менее, полученные для образца QF5 значения хорошо коррелируют с результатами испытаний одноплоскостного среза. Для образца QF16 по результатам трехосного сжатия получена меньшая прочность, что может объясняться нарушенной структурой образца.

Сводные диаграммы прочности по двум методам представлены на Рисунке П4-2. Результаты испытаний трехосного сжатия представлены в Таблице П4-3.

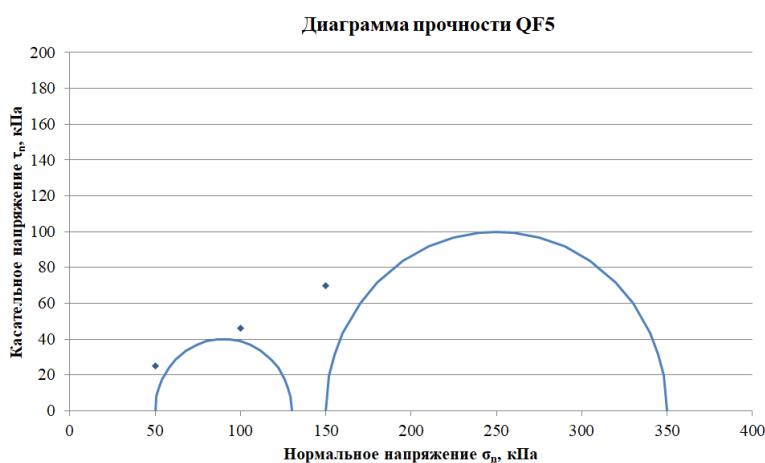


Рисунок П4-2. Сводная диаграмма прочности. Точками отмечены результаты испытаний одноплоскостного среза, круги Мора отражают результаты испытаний трехосного сжатия.



Рисунок П4-2 (продолжение). Сводная диаграмма прочности. Точками отмечены результаты испытаний одноплоскостного среза, круги Мора отражают результаты испытаний трехосного сжатия.

Таблица П4-3. Результаты испытаний трехосного сжатия

| Образец | Давление в камере | Давление при разрушении | Модуль общей деформации | Модуль деформации разгрузки | Коэффициент относительного поперечного расширения | Коэффициент Пуассона | Угол внутреннего трения | удельное сцепление |
|---------|-------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|---|----------------------|-------------------------|--------------------|
| | σ_3 , кПа | σ_1 , кПа | E_0 , МПа | E_{ur} , МПа | ν | ν_{ur} | ϕ , ° | |
| QF5 | 50 | 130 | 2,7 | - | 0,18 | - | 22,0 | 6,7 |
| | 150 | 350 | 3,5 | 50,0 | 0,24 | 0,31 | | |
| QF16 | 50 | 90 | 0,7 | - | 0,36 | - | - | - |

Итоговые значения параметров физических и физико-механических свойств приведены в Таблице П4-4. Для QF5 через дробь указаны параметры прочности, полученные методом одноплоскостного среза и трехосного сжатия.

Все представленные образцы содержат в себе большое количество крупных обломков, что значительно осложняет определение их параметров в лабораторных условиях. Весьма вероятно, что параметры сопротивления сдвигу в массиве будут выше, чем полученные в ходе испытаний.

При этом все образцы, включая и те, которые классифицируются как несвязные содержат достаточно высокое количество пылеватых и глинистых частиц, снижающих их сопротивление сдвигу.

Большинство образцов характеризуется очень высокой пористостью и, как следствие, низкой плотностью, чем также косвенно объясняются невысокие значения параметров сопротивления сдвигу.

Таблица П4-4. Параметры физических и физико-механических свойств.

| | Место отбора и полевое описание | Классификация | Влажность природная | Максимальная молекулярная влагоемкость | Влажность на границе пластичности | Влажность на границе текучести | Число пластичности | Число текучести | Плотность природная | Коэффициент пористости | Угол внутреннего трения | Удельное сцепление |
|-------|--|---|---------------------|--|-----------------------------------|--------------------------------|--------------------|-----------------|------------------------------------|------------------------|-------------------------|--------------------|
| | | | W, % | W _{ММВ} , % | W _Р , % | W _Л , % | I _р | I _Л | ρ _s , г/см ³ | e | φ, ° | c, кПа |
| QF 4 | из селевой гряды (рыхлый, много обломков) | Дресвяный грунт с супесчаным заполнителем | 12 | - | - | - | - | - | 1,31 | 1,308 | 24 | 14 |
| QF 5 | из оползня (переувлажненный, вязкий суглинок) | Суглинок легкий тугопластичный | 34 | 15 | 30 | 39 | 0,09 | 0,44 | 2,17 | 0,667 | 24 22 | 2 7 |
| QF 7 | из селевого конуса (очень плотный) | Дресвяный грунт | 10 | - | - | - | - | - | 1,85 | 0,605 | - | - |
| QF 8 | микротеррасы (супесь темно-серая, почва) | Суглинок тяжелый | 74 | 9 | 65 | 77 | 0,12 | 0,75 | 1,24 | 2,789 | 37 | 28 |
| QF 13 | из селевых отложений, днище долины | Гравелистый песок | 13 | - | - | - | - | - | 1,76 | 0,734 | 24 | 0 |
| QF 15 | из тела оползня (легкий суглинок/супесь серая, почва) | Супесь пылеватая | 14 | - | 13 | 18 | 5 | 0,20 | 1,22 | 1,523 | 23,5 | 0 |
| QF 16 | из оползня (суглинок светлый переувлажненный, пластичный - зеркало скольжения оползня, элювий) | суглинок легкий тугопластичный | 24 | 9 | 21 | 28 | 0,09 | 0,43 | 1,65 | 1,029 | 20 | 22 |

П5. Фотографии местности

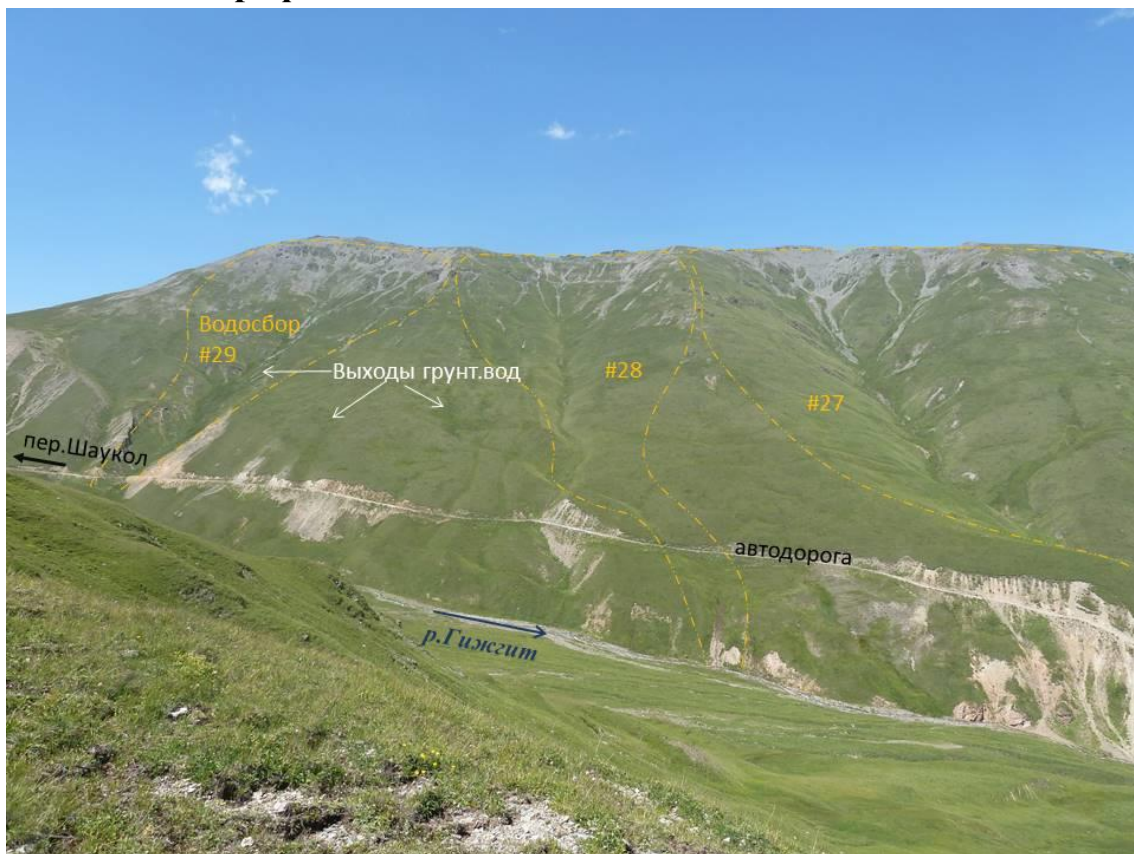


Рисунок П5-1. Верховья долины р.Гижигит, суббассейны № 27,28, 29



Рисунок П5-2. Верховья долины р.Гижигит, суббассейны №31, 32



Рисунок П5-3. Верховья долины р.Гижгит, основное русло

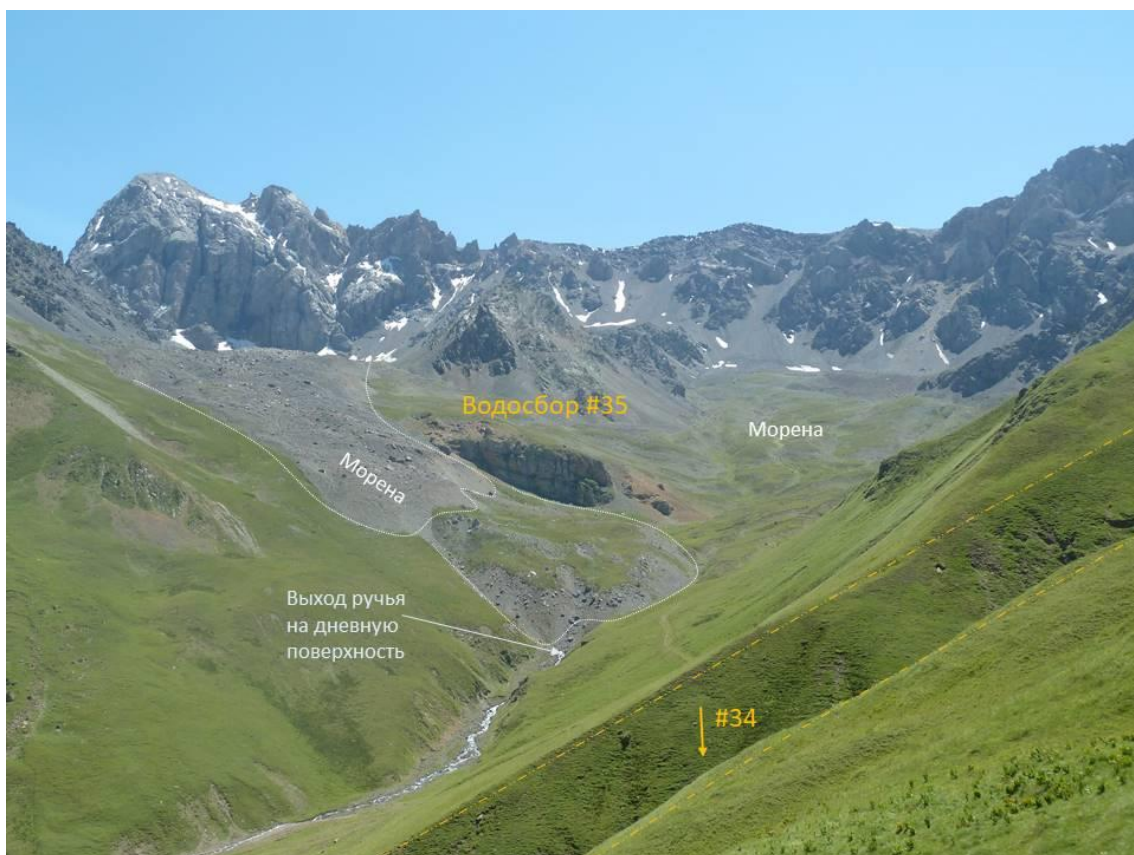


Рисунок П5-4. Верховья долины р.Гижгит, суббассейн № 35



Рисунок П5-5. Низовья суббассейна №34 с активными селевыми процессами



Рисунок П5-6. Низовья долины р.Гижигит, вид с БПЛА вверх по течению



Рисунок П5-7. Низовья долин р.Гижигит, вид с БПЛА вниз по течению

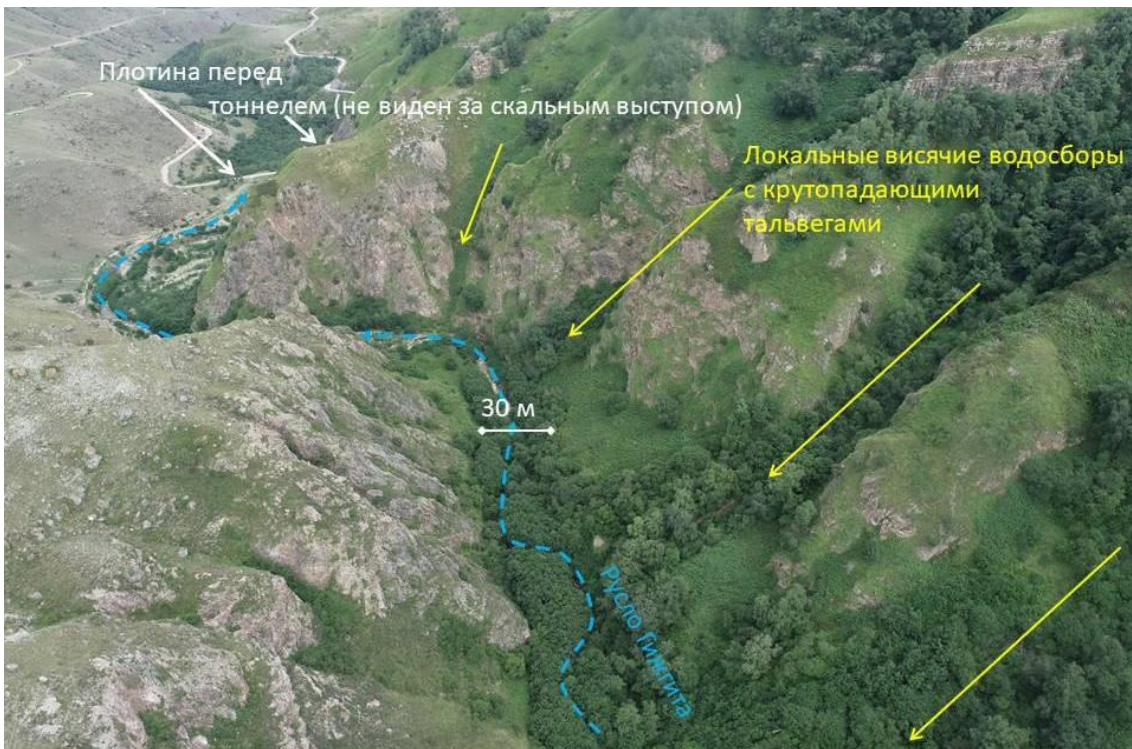


Рисунок П5-8. Участок русла р. Гижигит перед порталом водопропускного тоннеля, вид с БПЛА вниз по течению

Пб. Расчет времени начала перелива оз. Гижгит через плотину

Если оценить, какой дополнительный объем воды способна вместить чаша озера Гижгит, то можно рассчитать время до начала перелива через плотину хвостохранилища при высоких расходах различной обеспеченности.

Приведенные ниже расчеты сделаны для расхода **100 м³/с**.

Перелив через плотину около портала тоннеля №2

Плотина, очерчивающая припортальный аварийный пруд-накопитель, находится чуть ниже по течению портала водопропускного тоннеля. В ее теле устроен бетонированный лоток аварийного сброса, который при достижении критического уровня позволяет воде уходить в сторону хвостохранилища по старому руслу р. Гижгит.

На основании ЦМР с разрешением 1 м/пикс, восстановленной из ЦММ от 2023 г., которая была получена съемкой с БПЛА, превышение кромки лотка над уровнем русла у портала было принято как **8 м**.

Объем водоема, умеющего урез воды, необходимый для начала сброса воды через аварийный лоток, и рассчитанный инструментарием ПО ArcGIS по ЦМР составляет порядка **67867 м³ - 72667 м³**.

В наиболее неблагоприятной ситуации полной закупорки портала тоннеля, при расходе р. Гижгит **100 м³/с** заполнение указанного резервуара произойдет за **11-12 мин** (без учета возможного заполнения данного объема наносами). В наиболее благоприятной ситуации, при сохранения полной пропускной способности тоннеля (**65 м³/с**), эффективный расход составит **Q = 35 м³/с** и время заполнения увеличится до **32-34 мин**.

Перелив через основную плотину хвостохранилища

На основании ЦММ от 2022 г., полученной съемкой с БПЛА (6 см/пикс, Рисунок 4), можно ожидать, что начало стока будет локализовано в вершине недостроенного водопропускного канала, расположенного на правом краю пляжа. В настоящее время он не оформлен инженерными сооружениями и слабо выражен в рельефе. Превышение этой точки над урезом воды на дату съемки составило **7.5 м**.

Изменение береговой линии при росте уровня воды можно оценить по архивным снимкам, когда уровень был выше современного, а также по характеру растительности и химически-обусловленному цветовому переходу коренных пород в бортах. Ввиду крутых бортов вмещающей долины площадь зеркала воды изменится примерно на 1/5: с **301835 м²** (по космическому снимку 2019 г.) до **362199 м²** при достижении уровня начала перелива.

Задачу расчета “дополнительного” объема чаши озера, между двумя указанными уровнями воды, можно аппроксимировать усеченным конусом:

$$r = 310 \text{ м}, R = 339.5 \text{ м}, h = 7.5 \text{ м}$$

$$V_{\text{доп.озера}} = 2\,486\,934 \text{ м}^3$$

Тогда при полной потере водопропускной способности ГТС (т.е. весь указанный расход накапливается в озере), без учета возможного стока с прилегающих склонов, и при расходе р. Гижгит **Q = 100 м³/с**, заполнение указанного объема и начало перелива произойдет через **414 мин (7 ч)** после начала поступления воды в озеро. Другим крайним случаем можно принять сохранение полной расчетной пропускной способности

тоннеля №2 ($65 \text{ м}^3/\text{с}$); тогда при расходе р. Гижигит в $100 \text{ м}^3/\text{с}$, поступающий в озеро расход составит $Q = 35 \text{ м}^3/\text{с}$, что приведет к началу перелива через **1184 мин (19 ч)**.

Так как достоверная информация о состоянии и пропускной способности шахты аварийного сброса, расположенной непосредственно в озере, отсутствует, она не учитывается в приведенных расчетах.