

УДК: 504.4:625.7

Махкамов Б. Р.

*Главный специалист Комитета по Автомобильным дорогам,
Ташкент, Республика Узбекистан*

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ СЕЛЕ- ПАВОДКОВОГО РИСКА ДЛЯ ГОРНЫХ И ПРЕДГОРНЫХ АВТОДОРОГ УЗБЕКИСТАНА

***Аннотация:** в статье проведен сравнительный анализ трех основных групп методов оценки селе-паводкового риска – полуколичественных балльных оценок, ГИС-моделирования и гидрологических расчетов – с точки зрения их применимости и информативности для горных и предгорных автодорог Узбекистана. Рассмотрены принципы, возможности и ограничения каждого подхода в условиях типичной для региона доступности данных и сложности природных процессов. На основе анализа обосновывается целесообразность применения комплексного, многоуровневого подхода к оценке риска для эффективного планирования защитных мероприятий и обеспечения безопасности транспортной инфраструктуры.*

***Ключевые слова:** селе-паводковый риск, оценка риска, транспортные коммуникации, горные дороги, полуколичественный метод, ГИС-моделирование, гидрологические расчеты, управление рисками, Узбекистан.*

Makhkamov B. R.

*Chief Specialist, Committee for Motor Roads,
Tashkent, Republic of Uzbekistan*

COMPARATIVE ANALYSIS OF DEBRIS FLOW AND FLASH FLOOD RISK ASSESSMENT METHODS FOR MOUNTAINOUS AND FOOTHILL ROADS IN UZBEKISTAN

***Abstract:** this article presents a comparative analysis of three main groups of debris flow and flash flood risk assessment methods—semi-quantitative scoring systems, GIS-based modeling, and hydrological calculations—in terms of their applicability and informativeness for mountainous and foothill roads in Uzbekistan. The principles, capabilities, and limitations of each approach are examined in the context of the region's typical data availability and the complexity of natural processes. Based on the analysis, the study substantiates the feasibility of applying an integrated, multi-level approach to risk assessment to support the effective planning of protective measures and to ensure the safety of transport infrastructure.*

***Keywords:** debris flow and flash flood risk, risk assessment, transport infrastructure, mountain roads, semi-quantitative method, GIS modeling, hydrological calculations, risk management, Uzbekistan.*

Введение

Транспортная инфраструктура, в особенности сеть автомобильных дорог, играет ключевую роль в социально-экономическом развитии Узбекистана. Значительная часть территории страны, особенно в предгорных и горных районах Ферганской долины, Ташкентской, Джизакской, Самаркандской, Кашкадарьинской и Сурхандарьинской областей, подвержена воздействию опасных селе-паводковых явлений [1]. Эти процессы представляют серьезную угрозу для безопасности движения, сохранности дорожного полотна, мостов и других сооружений, приводя к значительным экономическим потерям и, в некоторых случаях, к человеческим жертвам. Усиливающиеся проявления экстремальных

гидрометеорологических явлений на фоне изменения климата [2] делают задачу адекватной оценки и снижения селе-паводковых рисков для автодорог особенно актуальной. Решение этой задачи напрямую связано с реализацией государственных мер по защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций (ПП-426 [3]) и обеспечению устойчивого развития инфраструктуры в рамках перехода к «зеленой» экономике (ПП-436 [4]).

Оценка рисков природных опасностей является сложной междисциплинарной проблемой. В международной практике и в исследованиях, проводимых в Узбекистане [1, 5, 6], применяются различные методические подходы. Полуколичественные методы, часто основанные на балльной оценке факторов опасности и уязвимости [7, 8], позволяют проводить относительно быструю оценку и ранжирование рисков на больших территориях или протяженных объектах, что ценно при ограниченных ресурсах и данных. Геоинформационные системы (ГИС) предоставляют мощные инструменты для пространственного анализа факторов риска, картирования зон потенциальной опасности и визуализации результатов [9, 10, 11]. Гидрологические и гидравлические расчеты остаются основой для количественной оценки параметров селе-паводковых потоков (расходы, объемы, скорости), необходимых для проектирования инженерных защитных сооружений [12, 13, 14, 15]. Каждый из этих подходов имеет свои сильные и слабые стороны.

Несмотря на наличие различных методик, для эффективного управления рисками в конкретных условиях Узбекистана, характеризующихся спецификой горных ландшафтов, неравномерностью сети наблюдений и доступности данных, важен сравнительный анализ применимости и информативности этих подходов. Необходимо понимать, какой метод или их комбинация является наиболее адекватной для решения различных практических задач – от стратегического планирования и зонирования до проектирования конкретных защитных

мер на локальных участках. Отсутствие такого сопоставительного анализа затрудняет выбор оптимальной методологии оценки риска.

Целью данного исследования является сравнительный анализ концептуальных возможностей и ограничений полуколичественных методов, ГИС-моделирования и гидрологических расчетов для оценки селе-паводкового риска применительно к типичным условиям горных и предгорных автодорог Узбекистана. **Задачи исследования:**

1. Охарактеризовать принципы применения полуколичественных балльных оценок для идентификации и ранжирования селеопасных участков дорог.
2. Описать возможности ГИС-моделирования для выявления и картирования зон потенциального воздействия селе-паводковых потоков.
3. Изложить основы гидрологических расчетов для количественной оценки параметров селе-паводковых потоков.
4. Провести концептуальное сравнение типов информации и уровней детальности результатов, получаемых различными методами.
5. Оценить относительные преимущества и недостатки каждого подхода в контексте типичной доступности данных и практических задач управления рисками в Узбекистане.

Материалы и методы

Исследование носит аналитический характер и основано на обзоре и сопоставлении существующих методических подходов к оценке селе-паводкового риска. Анализ проводился применительно к типовым ситуациям на горных и предгорных автодорогах Узбекистана, таким как пересечение дороги с селевым руслом, прохождение трассы у подножия или по склону, подверженному эрозии или оползневым процессам. Рассматривались общие принципы использования стандартных исходных данных, доступных в Узбекистане: топографические, геологические,

почвенные карты, данные ЦМР (SRTM, ALOS PALSAR), климатические и гидрологические данные (Узгидромет), материалы полевых обследований.

Краткая характеристика рассматриваемых групп методов:

1. Полуколичественный метод базируется на присвоении баллов различным факторам, влияющим на возникновение селей (литология, крутизна, эрозия, растительность, климат и др.) и на возможные последствия (тип дороги, интенсивность движения, наличие объектов). Суммирование или перемножение баллов позволяет получить индекс или категорию риска для обследуемого участка [6, 7, 8].

2. ГИС-моделирование включает пространственный анализ рельефа (уклоны, экспозиции, кривизна), автоматизированное выделение гидрографической сети и водосборов, моделирование зон аккумуляции стока, оверлейный анализ с картой дорожной сети для выявления конфликтных точек и зон [9, 10, 11]. Могут использоваться как базовые инструменты ГИС, так и специализированные модули или модели.

3. Гидрологические расчеты основаны на расчете стокообразующих осадков заданной повторяемости, определении параметров водосбора (площадь, уклон, тип поверхности) и применении формул стока (рациональная формула, метод предельной интенсивности, региональные зависимости) для оценки пика дождевого паводка ($Q_{\text{водн}}$). Оценка селевого расхода ($Q_{\text{сель}}$) требует введения дополнительных параметров или коэффициентов, отражающих вовлечение твердого материала (например, коэффициент селеностности Ψ) [12, 13, 14].

Результаты

Применение трех групп методов к типичным селеопасным участкам горных и предгорных дорог Узбекистана позволяет получать результаты разного характера и уровня детальности.

Полуколичественная оценка для участка дороги, пересекающего селеактивное русло, позволяет присвоить ему определенную категорию

риска (например, "Высокий", "Средний", "Низкий") на основе интегральной оценки множества факторов. Это дает возможность сравнивать и ранжировать различные участки по степени опасности для планирования очередности защитных мероприятий или мониторинга.

ГИС-моделирование для того же участка позволяет визуализировать зону возможного воздействия селевого потока на дорогу – определить примерную ширину пересечения, выявить участки возможного подмыва насыпи или отложения наносов. Для участка дороги, проходящего вдоль склона, ГИС позволяет выделить зоны с критическими уклонами или признаками неустойчивости, представляющие угрозу обвалов или оползней на дорогу.

Гидрологические расчеты для водосбора, формирующего селевой поток, пересекающий дорогу, дают количественную оценку пикового расхода селя ($Q_{\text{сель}}$) определенной вероятности превышения (например, 1%, 5%). Эта величина является ключевой для проектирования водопропускного сооружения (моста, трубы) или селезащитной дамбы.

Концептуальное сравнение типов результатов для типовых ситуаций представлено в Таблицах 1 и 2.

Таблица 1.

**Результаты оценки риска для участка пересечения дороги с
селевым руслом**

Метод оценки	Пример результата	Характер информации
Полуколичественный	Участку присвоена категория риска (напр., "Средний")	Качественная/ранговая оценка
ГИС-моделирование	Карта зоны потенциального воздействия на дорогу	Пространственная локализация угрозы
Гидрологические	Расчетное значение	Количественный

расчеты	пикового расхода селя (напр., $Q_{\text{сель } 1\%}$)	параметр потока
---------	---	-----------------

Таблица 2.

Результаты оценки риска для участка дороги под/на крутом склоне

Метод оценки	Пример результата	Характер информации
Полуколичественный	Участку присвоена категория риска (по факторам склоновых процессов)	Качественная/ранговая оценка
ГИС-моделирование	Карта зон с критической крутизной/неустойчивостью склона, примыкающих к дороге	Пространственная локализация угрозы
Гидрологические расчеты	Оценка потенциального объема осыпи/оползня (требуется геомеханических расчетов) или стока	Количественный параметр (объем/ Q)

Обсуждение

Сравнение подходов показывает их взаимодополняемость. Полуколичественные методы эффективны для первичной оценки и приоритезации на больших территориях или при недостатке детальных данных, но их результаты субъективны и имеют низкое пространственное разрешение. ГИС-моделирование незаменимо для пространственного анализа, визуализации и выявления зон потенциального воздействия, но его точность зависит от качества исходных данных (ЦМР) и адекватности используемых алгоритмов. Гидрологические расчеты предоставляют необходимые количественные данные для инженерного проектирования,

но характеризуются высокой неопределенностью, особенно в части селевых параметров в условиях дефицита наблюдений, характерного для многих горных районов Узбекистана.

Обобщенные преимущества и недостатки методов в контексте Узбекистана приведены в Таблице 3.

Таблица 3.

Сравнительная оценка методов оценки селе-паводкового риска в условиях Узбекистана

Метод	Преимущества	Недостатки	Потребности в данных	Применимость в Узбекистане
Полуколичественный	Быстрота, возможность учета полевых данных/экспертизы, комплексность факторов, ранжирование	Субъективность баллов без калибровки, низкая пространственная точность, сложность формализации	Карты, полевые обследования, общие сведения о степени риска селепроявлениях, эксперты	Высокая; подходит для скрининга, предварительной оценки, зонирования по территории больших территорий или протяженных объектах
ГИС-моделирование	Наглядность, пространственный анализ, интеграция разных данных,	Зависимость от качества ЦМР, упрощение реальных процессов,	ЦМР, карты, данные по дороге, ГИС-ПО	Высокая; незаменим для визуализации, выявления зон влияния, предварительно

	повторяемость базовых расчетов	потребность в ПО и специалистах		го планирования; точность зависит от данных и моделей
Гидрологические расчеты	Количественные параметры (Q) для проектирования, физическая основа	Высокая неопределенность входных данных (осадки, сток, параметры селя), трудоемкость, часто локальность	Гидро-мет данные, морфометрия, методики расчета, (желательно) полевые	Необходим для инженерного проектирования; требует улучшения сети наблюдений и разработки/адаптации региональных методик

Для условий Узбекистана, где необходимо оценивать риски на протяженной сети горных и предгорных дорог при зачастую ограниченных данных, наиболее рациональным представляется многоуровневый (иерархический) подход.

Уровень сети/региона – использование ГИС-технологий для выявления потенциально опасных зон (пересечения с водотоками, крутые склоны) и их первичной классификации по геоморфологическим признакам.

Уровень участка – применение полуколичественных методов на выявленных потенциально опасных участках для их ранжирования по степени риска на основе полевых обследований и доступных данных.

Уровень объекта (для участков высокого/среднего риска) – проведение детальных инженерно-геологических и гидрологических изысканий и выполнение количественных расчетов для проектирования конкретных защитных сооружений.

Такой подход позволяет эффективно распределять ресурсы, фокусируя детальные исследования на наиболее критичных участках, и обеспечивает получение информации, необходимой как для стратегического планирования, так и для конкретных инженерных решений.

Заключение

Сравнительный анализ полуколичественных методов, ГИС-моделирования и гидрологических расчетов показывает, что каждый из этих подходов играет свою роль в системе оценки селе-паводкового риска для горных и предгорных автодорог Узбекистана. Их эффективность и информативность зависят от конкретной задачи (региональная оценка, ранжирование, проектирование), масштаба исследования и доступности данных.

В условиях Узбекистана оптимальным является комплексное, иерархическое применение этих методов. Широкое использование ГИС и полуколичественных оценок для выявления и приоритизации опасных участков в сочетании с детальными гидрологическими расчетами на наиболее критичных объектах позволяет создать научно обоснованную базу для управления рисками и планирования защитных мероприятий. Дальнейшее развитие системы оценки требует совершенствования методик, адаптированных к местным условиям, улучшения мониторинга опасных процессов и расширения базы данных гидрометеорологических наблюдений в горной зоне.

Список литературы

1. Салимова Б. Д. Селевые процессы в горных районах республики Узбекистан // Экономика и социум. – 2022. – №. 12-1 (103). – С. 884-889.
2. Атлас смертности и экономических потерь от экстремальных погодных, климатических и гидрологических явлений (1970–2019 гг.). – Всемирная метеорологическая организация (ВМО) № 1267. – Женева: ВМО, 2021. – 86 с. – URL: https://library.wmo.int/viewer/43116/download?file=1267_Atlas_of_Mortality_RU.pdf&type=pdf (дата обращения: 26.03.2025).
3. Постановление Президента Республики Узбекистан от 18.11.2022 № ПП-426 «О мерах по защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций, связанных с опасными гидрометеорологическими явлениями и геологическими процессами». Вступ. в силу 21.11.2022 // Национальная база данных законодательства Республики Узбекистан. URL: <https://lex.uz/ru/docs/6287738> (дата обращения: 26.03.2025).
4. Постановление Президента Республики Узбекистан от 02.12.2022 № ПП-436 «О мерах по повышению эффективности реформ, направленных на переход Республики Узбекистан на "зеленую" экономику до 2030 года». Вступ. в силу 03.12.2022 // Национальная база данных законодательства Республики Узбекистан. URL: <https://lex.uz/docs/6303233> (дата обращения: 26.03.2025).
5. Dergacheva I. et al. Mudflow hazard in the foothill and mountainous regions of Uzbekistan // E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2021. – Т. 263. – С. 02019.
6. Туляганов А. Х., Махкамов Б. Р., Мамедова К. З. К. Значение и расчет коэффициента селеносности в предгорных малых реках Ферганской долины // Universum: технические науки. – 2020. – №. 6-1 (75). – С. 5-9.

7. Маций С. И., Сухляева Л. А. Полуколичественная оценка селевого риска на автомобильных дорогах // *Construction and Geotechnics*. – 2019. – Т. 10. – №. 4. – С. 105-115.
8. Parathoma-Köhle M. et al. Matrices, curves and indicators: A review of approaches to assess physical vulnerability to debris flows // *Earth-Science Reviews*. – 2017. – Т. 171. – С. 272-288.
9. Stoffel M., Tiranti D., Huggel C. Climate change impacts on mass movements – case studies from the European Alps // *Science of the Total Environment*. – 2014. – Т. 493. – С. 1255-1266.
10. Di B. F. et al. GIS-based risk analysis of debris flow: an application in Sichuan, southwest China // *International Journal of Sediment Research*. – 2008. – Т. 23. – №. 2. – С. 138-148.
11. Boulomytis V. T. G., Zuffo A. C., Imteaz M. A. Assessment of flood susceptibility in coastal peri-urban areas: an alternative MCDA approach for ungauged catchments // *Urban Water Journal*. – 2024. – Т. 21. – №. 8. – С. 1022-1034.
12. Флейшман С.М. Сели: учебное пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1978. – 312 с. – URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_007824185/ (дата обращения: 26.03.2025).
13. Перов В. Ф. Селеведение // Учебное пособие. М., Географический факультет МГУ. – 2012.
14. Rickenmann D. Empirical relationships for debris flows // *Natural hazards*. – 1999. – Т. 19. – С. 47-77.
15. Шахидов А. Ф., Салимова Б. Д. Определение характеристик дождя для расчета максимальных расходов дождевых вод // *Наука и техника в дорожной отрасли*. – 2010. – №. 3. – С. 16-17.