



Научная статья

УДК 624.131.31

EDN: ERLVOT

DOI: 10.21285/2686-9993-2026-49-1-8

Сравнительная оценка информативности спутниковых данных и данных с беспилотных летательных аппаратов при решении задач картирования оползневой опасности

С.А. Гантимурова^a, А.В. Паршин^b✉, Г. Хуан^c,
Ц. Ли^d, Ц. Цзин^e, В.Т. Залуцкий^f

^{a,b,f}Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Иркутск, Российская Федерация

^bИнститут геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук,
Иркутск, Российская Федерация

^{c-e}Чанъаньский университет, Сиань, Китай

Резюме. Использование методов дистанционного зондирования Земли позволяет быстро изучать большие по площади и труднодоступные территории, в пределах которых могут происходить опасные гравитационные геологические процессы (оползни, камнепады). Картирование оползневых зон на основе спутниковых данных в региональном масштабе на сегодняшний день уже хорошо развито на практике. В последние десятилетия стремительно развиваются теория и практика применения технологий беспилотных летательных аппаратов для дистанционного зондирования Земли. В обоих случаях для анализа георисков используются мультиспектральные данные и цифровые модели рельефа. Целью данного исследования является сравнительный анализ результатов картирования оползневой опасности, полученных на основе общедоступных спутниковых данных и данных с беспилотных летательных аппаратов, и выявление преимуществ и ограничений обеих методик. Ключевые предикторы (углы уклона склонов, профильная кривизна, нормализованный относительный индекс растительности, индекс влажности и коэффициент длины-уклона) для спутниковых данных были получены из цифровых моделей рельефа ALOS AW3D30 и данных Sentinel-2. Данные с беспилотных летательных аппаратов были получены фотограмметрическим методом с помощью мультиспектральных фотокамер. Для определения весов факторов применялся метод аналитической иерархии через попарные сравнения. Средствами QGIS построены карты рисков оползневых процессов для одного и того же участка территории. Сравнительный анализ наглядно показал, как различие в разрешении входных данных и методике съемки влияет на прогностическую ценность результатов. Основной вывод: из-за генерализации по разрешению (в случае спутниковых съемок) небольшие неустойчивые скальные блоки могут либо искусственно увеличивать уязвимость прилегающих склонов, либо оставаться полностью незамеченными. В то же время показано, что данные высокого разрешения с беспилотных летательных аппаратов не заменяют данные спутниковых дистанционных зондирований Земли, а дополняют их, методы служат разным пространственным масштабам работ и исследовательским задачам. Результаты подтверждают, что спутниковые данные и данные с беспилотных летательных аппаратов должны быть комплементарны. Спутниковые данные подходят для регионального картирования модели поверхности земли (Landslide Susceptibility Mapping), а данные с беспилотных летательных аппаратов необходимы для детальных исследований отдельных участков, выделенных по спутниковым данным. Рекомендуется гибридная методология: космические данные – для первичного зонирования опасных зон, а беспилотные летательные аппараты – для детального изучения опасных участков.

Ключевые слова: картирование оползневой опасности, спутниковое дистанционное зондирование Земли, беспилотный летательный аппарат, дистанционное зондирование Земли

Для цитирования: Гантимурова С.А., Паршин А.В., Хуан Г., Ли Ц., Цзин Ц., Залуцкий В.Т. Сравнительная оценка информативности спутниковых данных и данных с беспилотных летательных аппаратов при решении задач картирования оползневой опасности // Науки о Земле и недропользование. 2026. Т. 49. № 1. С. 96–110. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2026-49-1-8>. EDN: ERLVOT.



Original article

Comparative assessment of satellite and unmanned aerial vehicles data for landslide susceptibility mapping

Svetlana A. Gantimurova^a, Alexander V. Parshin^b, Guanwen Huang^c
Junyuan Li^d, Ce Jing^e, Vyacheslav T. Zalutskii^f

^{a,b,f}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

^bA.P. Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation

^{c-e}Chang'an University, Xi'an, China

Abstract. Remote sensing methods enable the rapid study of large, hard-to-reach areas prone to hazardous gravitational geological processes (landslides, rockfalls). Regional mapping of high-risk landslide areas based on satellite remote sensing data is already well-developed. In recent decades, the theory and practice of using unmanned aerial vehicle (UAV) technologies for remote sensing have rapidly evolved. In both cases, multispectral survey data and digital elevation models are used to analyze geological risks. The purpose of the presented research is to compare the results of landslide susceptibility mapping based on available satellite data and unmanned aerial vehicles data and to identify the advantages and limitations of both methods. The key predictors for satellite data (slope angles, profile curvature, normalized difference vegetation index, wetness index and length-slope factor) were derived from ALOS AW3D30 digital elevation models and Sentinel-2 data. Unmanned aerial vehicle data were obtained using a photogrammetric method with multispectral cameras. To determine the weights of factors, the analytical hierarchy process was used through pairwise comparisons. Landslide susceptibility maps were generated for the same area using QGIS. The comparative analysis has clearly demonstrated how differences in input data resolution and survey methodology impact the predictive value of the results. The major finding is that due to resolution generalization (in the case of satellite imagery) small, unstable rock blocks can artificially increase the vulnerability of adjacent slopes, on the other hand, some small, but hazardous rocks can remain completely unnoticed. At the same time, it is shown that high-resolution data from unmanned aerial vehicles do not replace satellite remote sensing data, but rather complement it. The methods serve different spatial scales and research objectives. The results confirm that satellite data and data from unmanned aerial vehicles should be complementary. Satellite data are suitable for regional landslide susceptibility mapping, while data from unmanned aerial vehicles are essential for detailed studies of individual areas identified using satellite data. Therefore, a hybrid methodology is recommended: satellite data for the initial zoning of hazardous areas, and data from unmanned aerial vehicles for the detailed study of hazardous areas.

Keywords: landslide susceptibility mapping, satellite remote sensing, unmanned aerial vehicle, remote sensing

For citation: Gantimurova S.A., Parshin A.V., Huang G., Li J., Jing C., Zalutskii V.T. Comparative assessment of satellite and unmanned aerial vehicles data for landslide susceptibility mapping. *Earth sciences and subsoil use*. 2026;49(1): 96-110. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2026-49-1-8>. EDN: ERLVOT.

Введение

Оползни – это экзогенные геологические процессы, представляющие серьезную опасность не только для инфраструктуры, но зачастую и для жизни или здоровья людей. Оползни, обвалы и камнепады в хозяйственно освоенных районах могут привести к значительным финансовым потерям. Обнаружение и картирование оползневых процессов в разных масштабах – важное направление фундаментальных и прикладных исследований. Картирование оползневой опасности LSM (Landslide Susceptibility Mapping) – важный метод выделения оползнеопасных территорий, основанный на факторном анализе вклада различных топографических, геологических, гидрологических, ландшафтно-географических параметров территории [1, 2]. Итоговые карты позволяют разрабатывать упреждающие стратегии

по снижению экономических потерь и угроз населению.

Основными источниками данных для LSM являются инвентаризационные данные об уже известных оползнях, данные обуславливающих факторов (геолого-географические и топографические признаки) и триггерных факторов (осадки, сейсмическая активность). Эти данные можно получить в результате полевых обследований, используя существующие геопространственные базы данных, или средствами дистанционного зондирования Земли.

Традиционное картирование оползневой опасности опирается на полевые инженерно-геологические обследования и ручную интерпретацию топографических данных. Проведение пешеходных полевых работ обеспечивает высокую точность и детальность обследований, но весьма затруднено на больших участках, особенно в труднодоступных районах [3].



Ряд преимуществ перед наземными обследованиями неустойчивых склонов представляют методы дистанционного зондирования Земли [3–5]. Так, спутниковые данные широко применяются для LSM благодаря большому охвату, мультитемпоральности изображений и доступности бесплатных данных до 10 м пространственного разрешения (например, Sentinel-2) [6–9]. Доступны и глобальные цифровые модели рельефа, содержащие геоморфологическую информацию; к наиболее часто используемым относятся ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) и SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) [10]. Наибольшую из открытых глобальных цифровых моделей рельефа (ЦМР) детальность представляет набор данных AW3D30 с пространственным разрешением 30 м. Эта ЦМР получена на основе данных стереокартирования сенсором PRISM (Panchromatic Remote sensing Instrument for Stereo Mapping) с борта спутника ALOS (Advanced Land Observing Satellite) [10, 11]. При этом следует отметить, что, хотя изменения рельефа происходят медленно, изучение экзогенных геологических процессов, которые могут протекать быстро, требует актуальных данных. Кроме того, данные спутникового дистанционного зондирования Земли имеют ряд других ограничений – атмосферные помехи, ограниченная периодичность сбора данных [12].

Мультиспектральные и радиолокационные спутниковые данные дистанционного зондирования часто используются для изучения опасных гравитационных процессов на региональном уровне масштаба исследований, поскольку их главное преимущество заключается в доступности данных на любую территорию. Однако очевидно ограничение таких данных, связанное с невысоким пространственным разрешением, и оно наиболее существенно для участков с очень крутыми склонами. Поэтому для повышения качества и точности карт рисков и минимизации будущих последствий необходимы детализирующие инструменты прогнозного моделирования и проверки. Безусловно, существует множество коммерческих спутниковых снимков высокого и сверхвысокого пространственного разрешения, которые могут обеспечить необходимую пространственную детализацию. Существенной проблемой использования таких данных (разрешением 0,3–0,5 м) является

так называемый избыточный объем данных: данные дистанционного зондирования Земли распространяются не в виде отдельных небольших полигонов, а в виде минимальных сцен – например 25 или даже 100 км². В результате, если интересующий участок с опасной зоной представляет собой линейный объект (например, оползневой склон или борозду) площадью всего 0,5 км², оплата в любом случае требуется за всю сцену, независимо от фактической площади области интереса, что приводит к сильному удорожанию данных – в 50–200 раз по сравнению с фактической стоимостью площади обследования [13]. Это еще один очевидный недостаток данных спутниковых систем в сравнении с обследованиями отдельных участков – пешеходных, или же обследованиями с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), при которых оператор несет расходы только на точно определенную область интереса.

В последние годы произошло быстрое развитие недорогих и малогабаритных БПЛА в сочетании со снижением стоимости и размеров традиционных датчиков (фотокамер, приемников спутниковых координат, лидаров), что привело к появлению инновационных и перспективных направлений в области дистанционного зондирования окружающей среды, моделирования поверхности и мониторинга [4] – теперь не спутниковых. Дистанционное зондирование Земли с использованием БПЛА предлагает ряд очевидных преимуществ, включая возможность съемки в любое нужное время, гибкое планирование проектов обследований, самое высокое пространственное разрешение и возможность сбора информации на сложнопроходимые участки и даже в опасных для людей условиях без рисков для них и для окружающей среды [5]. БПЛА эффективны для проведения детальных исследований небольших территорий, но менее пригодны для регионального картирования. Однако для линейных объектов, таких как трубопроводы, дороги или береговые линии, БПЛА могут быть весьма подходящим и эффективным инструментом для мониторинга и инспекции.

Таким образом, оба источника данных о поверхности Земли имеют ряд потенциальных преимуществ и ограничений. Выбор зависит от многих факторов и целей исследования, и в этом отношении в современных литературных источниках существует определенный



пробел. Так, хотя многие исследования посвящены качеству данных и межсистемному сравнению между несколькими космическими системами (например, ASTER, SRTM, ALOS AW3D30), подавляющее большинство сосредоточено на спутниковых снимках среднего или высокого разрешения [10, 11]. Еще менее разработанной темой является сравнение спутниковых данных с данными БПЛА высокого разрешения. Исследования, в которых такое сравнение осуществляется в рамках единого методологического подхода к картированию подверженности оползням, остаются исключительно редкими. В связи с этим авторы надеются, что данная работа может быть полезна широкому кругу специалистов, поскольку в ней приведены результаты сравнения наиболее доступных на практике спутниковых данных среднего разрешения и данных БПЛА-мультиспектральной аэрофотосъемки высокого разрешения в типичном кейсе оценки рисков оползней на реальном объекте.

Материалы и методы исследования

Область исследования. Кругобайкальская железная дорога расположена в Иркутской области России; ее строительство началось в конце XIX в. В настоящее время она используется преимущественно в туристических целях. Железнодорожные пути проложены на узком, частично природном, частично антропогенном откосе над озером Байкал, с другой стороны путей находятся крутые склоны, достигающие угла в 80°. При строительстве Кругобайкальской железной дороги применялись взрывные работы, которые нарушали естественный рельеф и увеличивали вероятность оползней и лавин.

Байкальский регион в целом характеризуется сложными инженерно-геологическими условиями. Так, непосредственно вдоль берегов озера Байкал, на 80-километровом участке Кругобайкальской железной дороги расположен Иркутский блок Шарыжалгайского выступа Сибирской платформы. Он сложен метаморфизованными магматическими и осадочными породами: гнейсами, метабазитами, сланцами, мраморами и кварцитами. Степень метаморфизма варьируется от амфиболитовой до гранулитовой фации. Возраст архейских пород составляет 3,9–2,9 млрд лет, а палеопротерозойских – 3,1–2,4 млрд лет. Для региона характерно полициклическое развитие эндогенных процессов. Байкальский регион расположен

в зоне вечной мерзлоты (толщина мерзлого грунта на побережье достигает 10 м). Рельеф эрозионно-денудационный, с узкими долинами и ущельями, а побережье структурно-абразивное. Здесь активно развиваются опасные геоморфологические процессы: линейная эрозия и гравитационно-склоновые явления.

Климат умеренный, резко континентальный: зимы холодные и длинные (6–7 месяцев, со средней температурой января минус 25–30 °С и абсолютным минимумом минус 61 °С), а лето теплое, но короткое (от 15 до 20 °С). Переходные сезоны короткие. Весна и начало лета сухие, большая часть осадков выпадает во второй половине лета (в 2–3 раза больше летом, чем зимой). Много солнечных дней. Снежный покров к началу марта не превышает 20 см, а на подветренных склонах – более 50 см.

Почвы разнообразные: преобладают мерзлотные таежные и горные подзолистые почвы, а в верхних горах встречаются каменистые альпийские тундровые почвы. Растительность состоит преимущественно из хвойных и мелколиственных лесов (лиственница, сосна, кедр, ель, пихта и береза).

Ранее картирование современных оползневых процессов на исследуемой территории проводилось преимущественно в мелком масштабе. Имеются государственные инженерно-геологические карты селеопасных районов южной оконечности Байкала масштаба 1:200000 (листы М-48-2, М-48-3, М-48-4, 2008 г.), а также тематическая интерпретация данных Landsat, выполненная в рамках научных исследований с разрешением 30 м [14]. Такой уровень детализации картирования может быть достаточным для целей регионального планирования. Однако для изучения небольших опасных зон и точного картирования пространственного распределения оползней, как будет показано далее, необходимы исследования в более крупном масштабе.

Спутниковые данные. В данной работе использовался типичный набор актуальных открыто распространяемых данных спутниковых съемок. Морфометрические данные для интересующей области были получены из ЦМР AW3D30 с разрешением 30 м, созданной на основе стереоизображений сенсора PRISM спутника ALOS (рис. 1). Кроме того, для расчета спектральных индексов и визуальной интерпретации исследуемой области использовались изображения спутниковой системы Sentinel-2 с разрешением до 10 м, включая



красный, синий, зеленый и ближний инфракрасный диапазоны (композит Red-Green-Blue, RGB-композит) (рис. 2).

Данные с беспилотных летательных аппаратов. Для получения детальных геопространственных данных, необходимых для создания ЦМР и расчета параметров, связанных с риском оползней, использовался гексакоптер с установленными мультиспектральными камерами семейства MAPIR 2. Съемка проводилась на высоте 125 м над землей с двух углов съемки: 45 и 90 (надир). Полученные изображения имеют разрешение 5 см на пиксель. Съемка проводилась по сети параллельных маршрутов, обеспечивая продольное перекрытие 70–80 % и поперечное перекрытие 60–70 % между кадрами. Такой подход обеспечил корректную 3D-реконструкцию местности. После первоначальной обработки данных съемки с БПЛА была проведена фотограмметрическая обработка полученных изображений с использованием алгоритма Structure

from Motion в среде OpenDroneMap. Полученные результаты включают: ЦМР (рис. 3), ортомозаику в видимом (рис. 4) диапазоне спектра и дополнительно в инфракрасном (808 нм), облако точек, текстурированную модель (рис. 5).

Методы. Картирование оползневой опасности (LSM) с использованием метода аналитической иерархии (АНР, Analytic Hierarchy Process) является популярным и надежным методом принятия решений на основе технологий геоинформационных систем, основанным на многокритериальном анализе, используемом для выявления районов, подверженных оползням [3, 15–18]. Метод АНР определяет относительные веса причинных факторов посредством попарных сравнений. Типичными переменными для моделей LSM являются высота над уровнем моря, угол наклона склона, экспозиция, профильная кривизна, литология, расстояние до дорог, расстояние до рек и параметры ландшафтной обстанов-

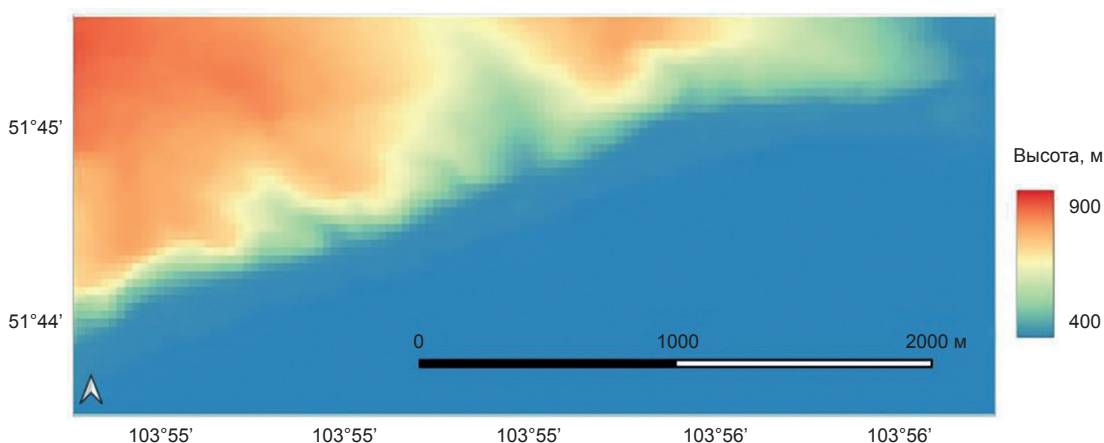


Рис. 1. Цифровая модель рельефа участка по данным AW3D30
Fig. 1. Digital elevation model of the study area based on AW3D30 data

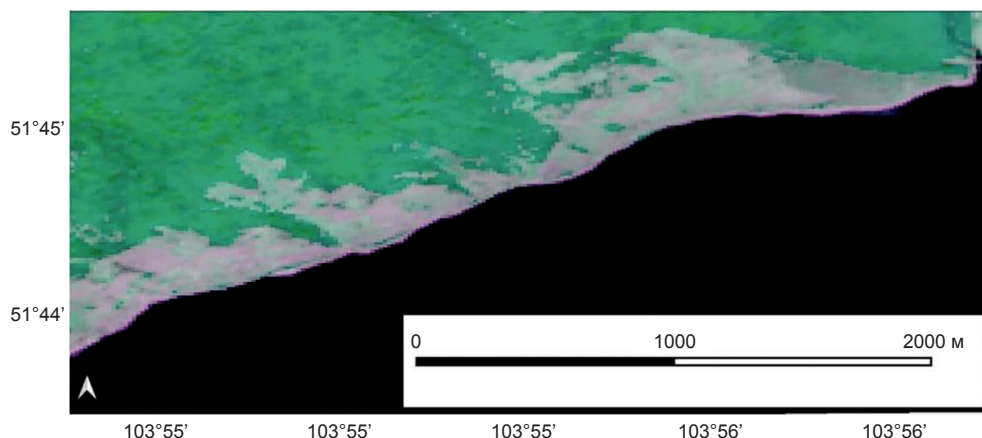


Рис. 2. RGB-композит по данным спутниковой системы Sentinel-2
Fig. 2. RGB composite based on Sentinel-2 satellite system data

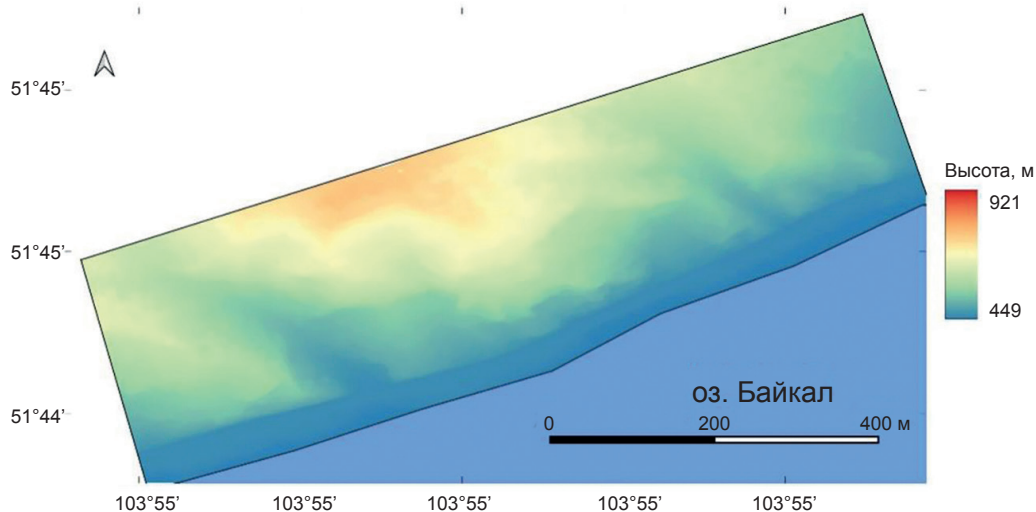


Рис. 3. Цифровая модель рельефа по данным съемки с беспилотного летательного аппарата
Fig. 3. Digital elevation model derived from unmanned aerial vehicle imagery

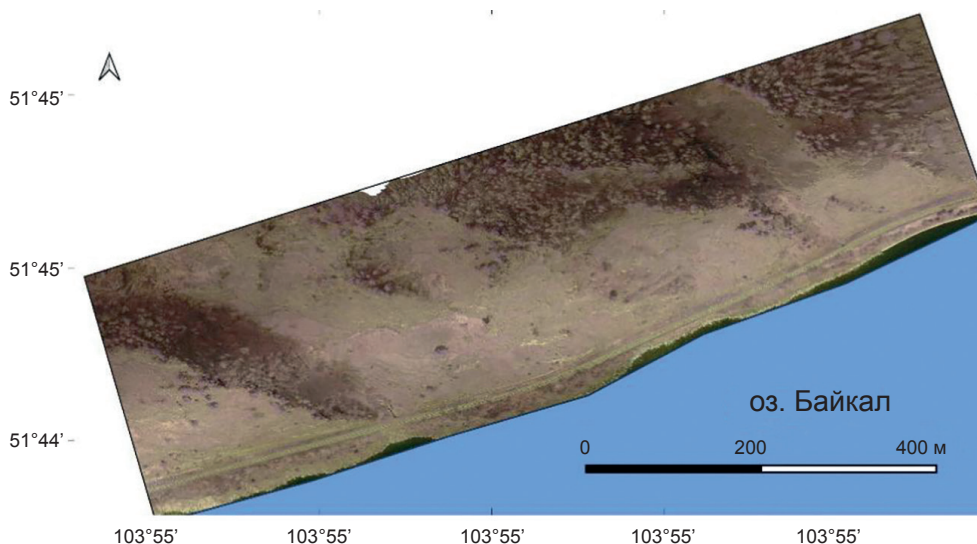


Рис. 4. Ортофотоплан (по данным съемки с беспилотного летательного аппарата)
Fig. 4. Orthomosaic (derived from unmanned aerial vehicle imagery)

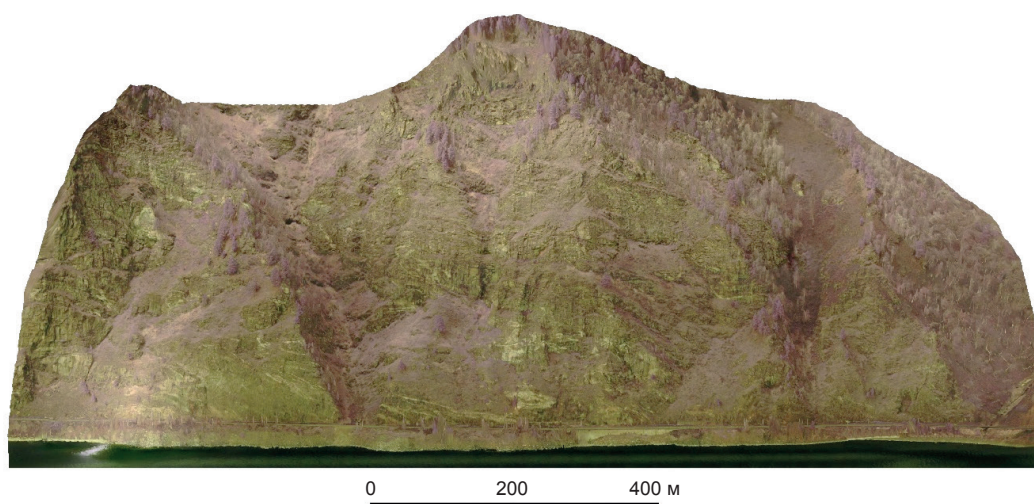


Рис. 5. Вид спереди на текстурированную модель участка работ
(по данным съемки с беспилотного летательного аппарата)
Fig. 5. Front view of the textured site model (derived from unmanned aerial vehicle imagery)



ки [19]. В данной работе для реализации LSM было вычислено пять факторов, влияющих на устойчивость, на основе данных одинаково вычисляемых полученных и на основе данных космических дистанционных зондирований, а также на основе данных БПЛА-дистанционных зондирований (рис. 6, 7):

1. Параметр «Угол уклона рельефа» напрямую влияет на гравитационное сдвиговое напряжение, скорость стока и устойчивость грунта/горных пород [17]. Возникновение камнепадов и оползней напрямую связано с крутизной склона, поэтому угол уклона склона является ключевым фактором в моделировании. По мере увеличения угла наклона склона возрастает и сила гравитации, действующая на горные породы, что повышает вероятность обрушения.

2. Параметр «Вертикальная (профильная) кривизна» отрицателен при увеличении уклона вниз по склону (выпуклый профиль потока, типичный для верхних участков склонов) и положителен при уменьшении уклона вниз по склону (вогнутый, типичный для нижних участков склонов). Исследования показывают, что, хотя вогнутые склоны могут быть зонами меньшей нестабильности, камнепады чаще встречаются на выпуклых склонах. Для склонов выпуклой формы поворотный угол обычно оказывает негативное влияние на стабиль-

ность, особенно когда угол относительно невелик, а более тонкая открытая масса склона значительно снижает его стабильность [20].

3. Параметр «LSF (Коэффициент длины-уклона)» отражает силу поверхностного стока и влияние топографии на риск эрозии почвы. Он обычно используется в моделях оценки эрозии почвы (например, USLE и RUSLE). Чем длиннее и круче склон, тем выше скорость и объем поверхностного стока и тем больше теряется почвы [21].

4. Параметр «WI (Индекс влажности)» служит индикатором насыщенности почвы; он рассчитывается как натуральный логарифм отношения площади водосбора к уклону. Более высокое значение индекса коррелирует с увеличением содержания влаги в почве. Кроме того, индекс влажности указывает направления дренажа, которые совпадают с предпочтительными путями оползней [3].

5. Параметр «NDVI (Нормализованный относительный индекс растительности)» – популярный индекс биомассы растительности, который используется для определения участков, покрытых растительностью, и выделения голый почвы. Фактор растительного покрова имеет важное значение, поскольку прочность почвы повышается за счет наличия корней и связывания слоев почвы. Таким образом, по-

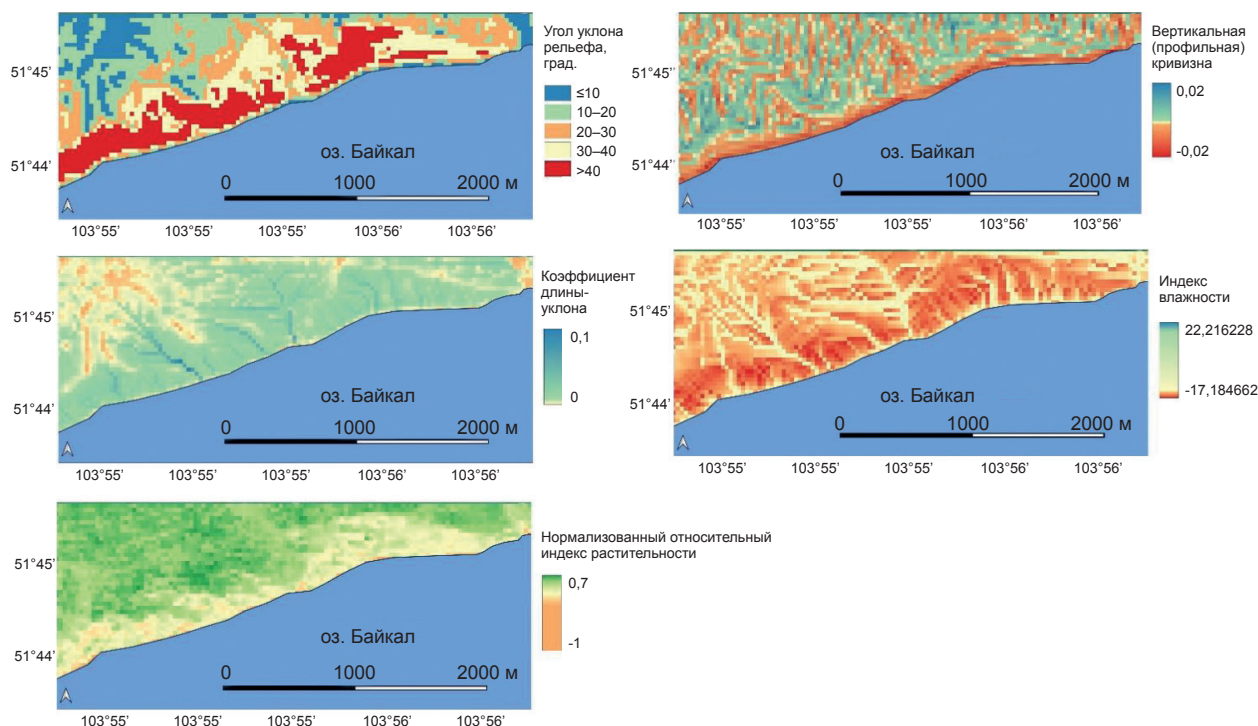


Рис. 6. Карты факторов, влияющих на условия окружающей среды, полученные на основе спутниковых данных
Fig. 6. Satellite-derived maps of environmental factors

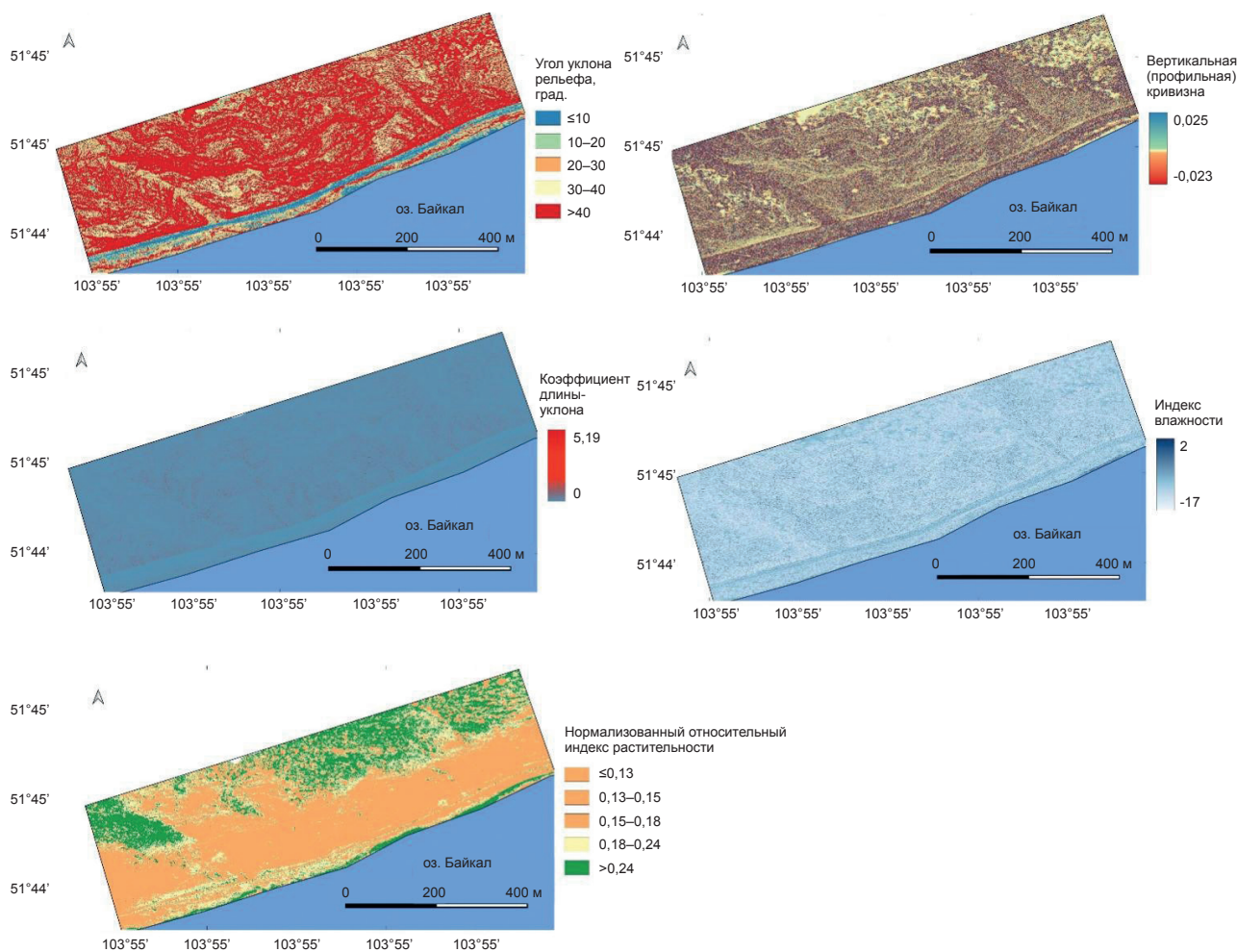


Рис. 7. Карты факторов, влияющих на условия полета, полученные на основе данных съемки с беспилотного летательного аппарата
Fig. 7. UAV-derived maps of flight environment factors

верхности, не покрытые растительностью, более подвержены оползням [22].

Авторы использовали одни и те же модели АНР для анализа данных, полученных со спутников и с помощью БПЛА-съемки. Для

определения того, насколько один фактор важнее другого, было проведено попарное сравнение (табл. 1).

Учитываемые факторы имеют разные шкалы, и перед расчетом взвешенной суммы

Таблица 1. Матрица попарного сравнения и весовые коэффициенты факторов
Table 1. Pairwise comparison matrix and factor weighting coefficients

Фактор	Угол уклона рельефа	Нормализованный относительный индекс растительности	Индекс влажности	Вертикальная (профильная) кривизна	Коэффициент длины-уклона	Весовой коэффициент	Отношение, %
Угол уклона рельефа	1,00	3,00	4,00	5,00	6,00	0,48	48
Нормализованный относительный индекс растительности	0,33	1,00	2,00	3,00	4,00	0,21	21
Индекс влажности	0,25	0,50	1,00	2,00	3,00	0,13	13
Вертикальная (профильная) кривизна	0,20	0,33	0,50	1,00	2,00	0,09	9
Коэффициент длины-уклона	0,17	0,25	0,33	0,50	1,00	0,06	6



необходимо нормализовать значения. Для этого была проведена переклассификация в соответствии с табл. 2.

Окончательный расчет был выполнен в системе QGIS с использованием следующего уравнения:

$$\begin{aligned} \text{Susceptibility Index} = & (\text{Slope}_{\text{Weight}} \times \text{Slope}_{\text{Reclass}}) + \\ & + (\text{LSF}_{\text{Weight}} \times \text{LSF}_{\text{Reclass}}) + \\ & + (\text{Curvature}_{\text{Weight}} \times \text{Curvature}_{\text{Reclass}}) + \\ & + (\text{Wetness}_{\text{Weight}} \times \text{Wetness}_{\text{Reclass}}) + \\ & + (\text{NDVI}_{\text{Weight}} \times \text{NDVI}_{\text{Reclass}}). \end{aligned}$$

Результаты исследования и их обсуждение

Была создана тематическая карта пространственного распределения оползневой опасности, которую затем разделили на пять классов (рис. 8, 9).

При сравнении двух итоговых карт оползневой опасности (построенных по данным спутниковой съемки и БПЛА-съемки) было выявлено, что зоны, выделенные как опасные, пространственно расположены аналогично, но их площадь существенно отличается. Очевидно, причиной этого несоответствия является разное разрешение ЦМР. Недостаточное пространственное разрешение спутниковых данных ограничивает точное определение границ опасных зон, спутниковая ЦМР не позволяет выявлять резкие изменения рельефа, которые обычно указывают на нестабильные участки склонов, поскольку она усредняет истинные значения отметок рельефа в пределах участка 30×30 м на один пиксель итогового раstra.

Таким образом, доступные глобальные спутниковые ЦМР, имеющие разрешение не

Таблица 2. Принципы переклассификации
Table 2. Principles of reclassification

Фактор	Диапазон классов	Показатель восприимчивости (1–5)
Угол уклона рельефа	0–10° (равнина)	1 (низкий риск)
	10–20°	2
	20–30°	3
	30–40°	4
	>40° (крутой)	5 (высокий риск)
Нормализованный относительный индекс растительности	Высокая степень озеленения (густой лес)	1 (низкий риск – защита)
	Низкая степень озеленения / голая почва	5 (высокий риск)
Индекс влажности	Низкий (сухо)	1 (низкий риск)
	Высокий (насыщенность влагой)	5 (высокий риск – нестабильность)
Вертикальная (профильная) кривизна	Выпуклый (расходящийся поток)	1
	Равнина	3
	Вогнутый (сходящийся поток / эрозия)	5 (высокий риск)
Коэффициент длины-уклона	Низкие значения (экономичный)	1
	Высокие значения (высокозатратный)	5 (высокий риск)

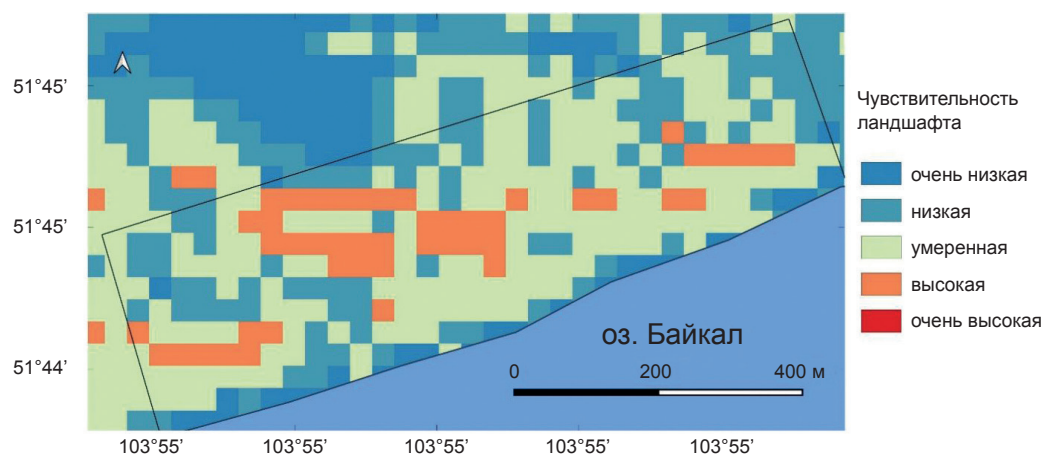


Рис. 8. Карта рисков оползневой опасности на основе спутниковых данных
Fig. 8. Satellite-derived landslide susceptibility map

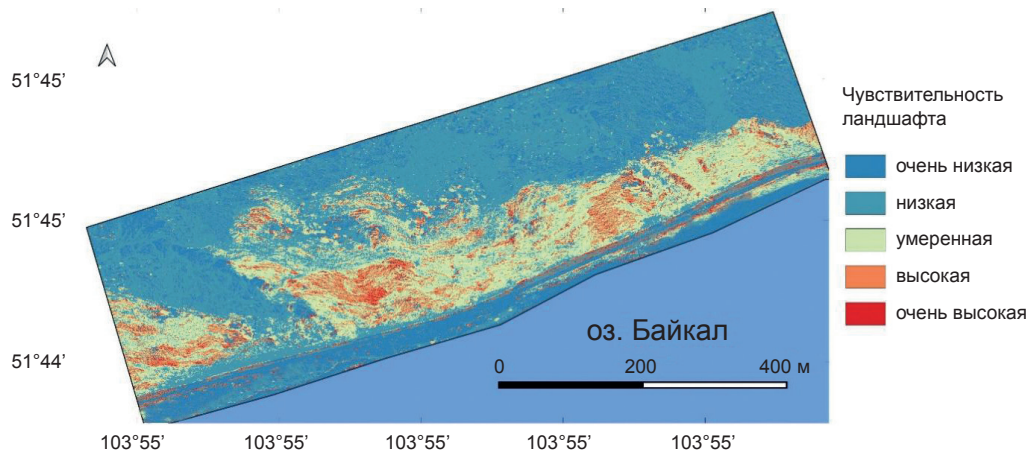


Рис. 9. Карта рисков оползневой опасности на основе данных с беспилотного летательного аппарата
Fig. 9. UAV-derived landslide susceptibility map

лучше 30 м на пиксель, вполне достаточны для выделения опасных участков в региональном масштабе, они позволяют достоверно картировать опасные склоны, занимающие площадь в несколько пикселей. Но они недостаточно детальны для изучения опасных участков и выделения в их пределах конкретных опасных зон. Из-за обобщения, связанного с разрешением, небольшие нестабильные блоки горных пород могут зависеть оценку опасности прилегающей области склона или, наоборот, пропустить опасную зону. В то же время на рис. 9 отлично видны небольшие структуры и даже отдельные глыбы, формирующие опасность камнепадов.

Также на основе спутниковых данных невозможно проектировать защитные сооружения, поскольку для этого требуется расчет точных траекторий падающих блоков, что возможно по представленной в работе БПЛА-ЦМР с разрешением не менее 0,5 м. Аналогично оценка объема предупредительных обороток каменного материала требует точных измерений объемов во избежание ненужных затрат.

Получение высокоточных данных с БПЛА вполне оправдано, когда необходимо не только определить риски развития опасных процессов на склоне в целом, но и точно установить пространственные границы зон риска и предоставить исчерпывающие надежные данные для проектирования мер по предотвращению оползней.

Еще одним преимуществом БПЛА-фотограмметрии является возможность создания детальной 3D-модели склона. Наблюдение за склоном не только с надира, но и с других плоскостей позволяет идентифицировать неустойчивые каменные блоки, осыпи и обломки

горных пород у подножия склона, что указывает на прошлые камнепады. Фронтальный вид склона также позволяет рассчитать степень растрескивания горных пород – важный показатель при оценке нестабильности скалисто-го склона [23]. Кроме того, когда необходимо определить потенциальную траекторию камнепадов, необходима подробная и точная модель склона. Следовательно, в то время как спутниковые данные служат инструментом предварительной оценки, данные БПЛА необходимы для любой последующей фазы проектирования мер по предотвращению оползней.

Таким образом, наглядно показано, что спутниковые данные среднего разрешения и данные БПЛА высокого разрешения не являются взаимоисключающими, а, скорее, служат для разных пространственных масштабов и исследовательских вопросов. Спутниковые данные отлично подходят для региональных исследований и зонирования, в то время как данные БПЛА полезны для детального картирования в локальном масштабе.

Заключение

В данном исследовании представлено сравнение доступных спутниковых данных невысокого пространственного разрешения (ALOS AW3D30, Sentinel-2) с данными высокого разрешения, полученными с помощью БПЛА, на примере реального кейса картирования оползневой опасности (LSM). Как и ожидалось, разрешение данных сильно влияет на результаты LSM.

Ключевой вывод заключается в том, что, хотя оба метода корректно пространственно определяют схожие опасные зоны, площадь



и границы этих зон существенно различаются из-за обобщения, связанного с недостаточным разрешением доступных спутниковых данных. В частности, данные цифровой модели рельефа с разрешением 30 м переоценивают зоны умеренной подверженности и пропускают небольшие опасные участки, которые четко видны при обследовании с помощью БПЛА.

В целом полученные результаты подтверждают мнение о том, что спутниковые данные и данные БПЛА дополняют друг друга. В связи с этим можно рекомендовать гибридные подходы, при которых данные, полученные из космоса, используются для первичного зонирования, а данные БПЛА – для точного исследования локальных участков.

Список источников

1. Ado M., Amitab K., Maji A.K., Jasińska E., Gono R., Leonowicz Z., et al. Landslide susceptibility mapping using machine learning: a literature survey // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14. Iss. 13. P. 3029. <https://doi.org/10.3390/rs14133029>. EDN: WPDGQC.
2. Sarkar S., Kanungo D. An integrated approach for landslide susceptibility mapping using remote sensing and GIS // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 2004. Vol. 70. Iss. 5. P. 617–625. <https://doi.org/10.14358/PERS.70.5.617>.
3. Gantimurova S., Parshin A., Erofeev V. GIS-based landslide susceptibility mapping of the Circum-Baikal railway in Russia using UAV data // *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13. Iss. 18. C. 3629. <https://doi.org/10.3390/rs13183629>. EDN: RHIFUT.
4. Casagli N., Frodella W., Morelli S., Tofani V., Ciampalini A., Intrieri E., et al. Spaceborne, UAV and ground-based remote sensing techniques for landslide mapping, monitoring and early warning // *Geoenvironmental Disasters*. 2017. Vol. 4. Iss. 1. P. 1–23. <https://doi.org/10.1186/s40677-017-0073-1>. EDN: XBSOCI.
5. Rossi G., Tanteri L., Tofani V., Vannocci P., Moretti S., Casagli N. Multitemporal UAV surveys for landslide mapping and characterization // *Landslides*. 2018. Vol. 15. Iss. 5. P. 1045–1052. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-0978-0>. EDN: KNTROI.
6. Ghorbanzadeh O., Didehban K., Rasouli H., Kamran K.V., Feizizadeh B., Blaschke T. An application of Sentinel-1, Sentinel-2, and GNSS data for landslide susceptibility mapping // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2020. Vol. 9. Iss. 10. P. 561. <https://doi.org/10.3390/ijgi9100561>. EDN: IASVNL.
7. Kyriou A., Nikolakopoulos K. Assessing the suitability of Sentinel-1 data for landslide mapping // *European Journal of Remote Sensing*. 2018. Vol. 51. Iss. 1. P. 402–411. <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1444944>.
8. Lu P., Shi W., Wang Q., Li Z., Qin Y., Fan X. Co-seismic landslide mapping using Sentinel-2 10-m fused NIR narrow, red-edge, and SWIR bands // *Landslides*. 2021. Vol. 18. Iss. 6. P. 2017–2037. <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01636-2>. EDN: HYQURY.
9. Novellino A., Pennington C., Leeming K., Taylor S., Alvarez I.G., McAllister E., et al. Mapping landslides from space: a review // *Landslides*. 2024. Vol. 21. Iss. 5. P. 1041–1052. <https://doi.org/10.1007/s10346-024-02215-x>. EDN: URVNZQ.
10. Uuemaa E., Ahi S., Montibeller B., Muru M., Kmoch A. Vertical accuracy of freely available global digital elevation models (ASTER, AW3D30, MERIT, TanDEM-X, SRTM, and NASADEM) // *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12. Iss. 21. P. 3482. <https://doi.org/10.3390/rs12213482>. EDN: BPXCMY.
11. González-Moradas M.R., Viveen W., Vidal-Villalobos R.A., Villegas-Lanza J.C. A performance comparison of SRTM v. 3.0, AW3D30, ASTER GDEM3, Copernicus and TanDEM-X for tectonogeomorphic analysis in the South American Andes // *Catena*. 2023. Vol. 228. Iss. 3. P. 107160. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107160>. EDN: OHTWNG.
12. Sun J., Yuan G., Song L., Zhang H. Unmanned aerial vehicles (UAVs) in landslide investigation and monitoring: a review // *Drones*. 2024. Vol. 8. Iss. 1. P. 30. <https://doi.org/10.3390/drones8010030>. EDN: ZURRVW.
13. Sozzi M., Kayad A., Gobbo S., Cogato A., Sartori L., Marinello F. Economic comparison of satellite, plane and UAV-acquired NDVI images for site-specific nitrogen application: observations from Italy // *Agronomy*. 2021. Vol. 11. Iss. 11. P. 2098. <https://doi.org/10.3390/agronomy11112098>. EDN: UYXWVG.
14. Абрамова З.В., Литвинцева З.О. Картографирование современных экзогенных процессов центральной экологической зоны Байкальской природной территории // *Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле*. 2023. Т. 44. С. 3–17. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2023.44.3>. EDN: YNLLHJ.
15. Chandra N., Elizabeth, Choudhury S., Vaidya H. Integrated spatial landslide risk assessment for population and infrastructure in Tehri, Garhwal Himalayas, India // *Geological Journal*. 2026. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/gj.70251>.
16. Das M., Gautam G.K., Jain S., Bhat M.F., Mankar A.K., Koner R. A comparative analysis of AHP, FR, AHP-FR and LR models for landslide susceptibility mapping in Sikkim Himalaya, India // *Earth Surface Processes and Landforms*. 2026. Vol. 51. Iss. 2. P. e70257. <https://doi.org/10.1002/esp.70257>.
17. Sisay T., Tesfaye G., Jothimani M., Reda T.M., Tadese A. Landslide susceptibility mapping using combined geospatial, FR and AHP models: a case study from Ethiopia's highlands // *Discover Sustainability*. 2024. Vol. 5. Iss. 1. P. 474. <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00730-4>. EDN: QFZAIK.
18. Sutawane S., Mitra S. Landslide susceptibility analysis for Irshalwadi, Maharashtra by using analytical hierarchy process on satellite image // *Urbanisation and climate change: strategies for sustainable cities through geospatial technologies: 18th DGS International conference*. Hyderabad: Osmania University, 2023.



19. Mohd M.H., Azman F.N.U.Z., Jusoh A., Rahman M.A.A. Landslide susceptibility mapping at Lebir and Galas River Basins after extreme flood event using weights of evidence // *Journal of Sustainability Science and Management*. 2019. Vol. 14. Iss. 2. P. 103–115.
20. Zhou Y., Qi S.-C., Fan G., Chen M.-L., Zhou J.-W. Topographic effects on three-dimensional slope stability for fluctuating water conditions using numerical analysis // *Water*. 2020. Vol. 12. Iss. 2. P. 615. <https://doi.org/10.3390/w12020615>. EDN: CICDCT.
21. 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. Vol. 6. P. 219–229. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.01.004>. EDN: QIUVXR.
22. Kalsnes B., Capobianco V. Use of vegetation for landslide risk mitigation // *Climate adaptation modelling*. Cham: Springer, 2022. P. 77–85. https://doi.org/10.1007/978-3-030-86211-4_10.
23. Gantimurova S., Parshin A. Combined methodology for rockfall susceptibility mapping using UAV imagery data // *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16. Iss. 1. P. 177. <https://doi.org/10.3390/rs16010177>. EDN: PIEXRI.

References

1. Ado M., Amitab K., Maji A.K., Jasińska E., Gono R., Leonowicz Z., et al. Landslide susceptibility mapping using machine learning: a literature survey. *Remote Sensing*. 2022;14(13):3029. <https://doi.org/10.3390/rs14133029>. EDN: WPDGQC.
2. Sarkar S., Kanungo D. An integrated approach for landslide susceptibility mapping using remote sensing and GIS. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 2004;70(5):617-625. <https://doi.org/10.14358/PERS.70.5.617>.
3. Gantimurova S., Parshin A., Erofeev V. GIS-based landslide susceptibility mapping of the Circum-Baikal railway in Russia using UAV data. *Remote Sensing*. 2021;13(18):3629. <https://doi.org/10.3390/rs13183629>. EDN: RHIFUT.
4. Casagli N., Frodella W., Morelli S., Tofani V., Ciampalini A., Intrieri E., et al. Spaceborne, UAV and ground-based remote sensing techniques for landslide mapping, monitoring and early warning. *Geoenvironmental Disasters*. 2017;4(1):1-23. <https://doi.org/10.1186/s40677-017-0073-1>. EDN: XBSOCI.
5. Rossi G., Tanteri L., Tofani V., Vannocci P., Moretti S., Casagli N. Multitemporal UAV surveys for landslide mapping and characterization. *Landslides*. 2018;15(5):1045-1052. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-0978-0>. EDN: KNTROI.
6. Ghorbanzadeh O., Didehban K., Rasouli H., Kamran K.V., Feizizadeh B., Blaschke T. An application of Sentinel-1, Sentinel-2, and GNSS data for landslide susceptibility mapping. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2020;9(10):561. <https://doi.org/10.3390/ijgi9100561>. EDN: IASVNL.
7. Kyriou A., Nikolakopoulos K. Assessing the suitability of Sentinel-1 data for landslide mapping. *European Journal of Remote Sensing*. 2018;51(1):402-411. <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1444944>.
8. Lu P., Shi W., Wang Q., Li Z., Qin Y., Fan X. Co-seismic landslide mapping using Sentinel-2 10-m fused NIR narrow, red-edge, and SWIR bands. *Landslides*. 2021;18(6):2017-2037. <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01636-2>. EDN: HYQURY.
9. Novellino A., Pennington C., Leeming K., Taylor S., Alvarez I.G., McAllister E., et al. Mapping landslides from space: a review. *Landslides*. 2024;21(5):1041-1052. <https://doi.org/10.1007/s10346-024-02215-x>. EDN: URVNZQ.
10. Uuemaa E., Ahi S., Montibeller B., Muru M., Knoch A. Vertical accuracy of freely available global digital elevation models (ASTER, AW3D30, MERIT, TanDEM-X, SRTM, and NASADEM). *Remote Sensing*. 2020;12(21):3482. <https://doi.org/10.3390/rs12213482>. EDN: BPXCMY.
11. González-Moradas M.R., Viveen W., Vidal-Villalobos R.A., Villegas-Lanza J.C. A performance comparison of SRTM v. 3.0, AW3D30, ASTER GDEM3, Copernicus and TanDEM-X for tectonogeomorphic analysis in the South American Andes. *Catena*. 2023;228(3):107160. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107160>. EDN: OHTWNG.
12. Sun J., Yuan G., Song L., Zhang H. Unmanned aerial vehicles (UAVs) in landslide investigation and monitoring: a review. *Drones*. 2024;8(1):30. <https://doi.org/10.3390/drones8010030>. EDN: ZURRVW.
13. Sozzi M., Kayad A., Gobbo S., Cogato A., Sartori L., Marinello F. Economic comparison of satellite, plane and uav-acquired NDVI images for site-specific nitrogen application: observations from Italy. *Agronomy*. 2021;11(11):2098. <https://doi.org/10.3390/agronomy11112098>. EDN: UYXWVG.
14. Abramova Z.V., Litvintseva Z.O. Mapping of modern exogenous processes of the central ecological zone of the Baikal natural territory. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series: Earth Sciences*. 2023;44:3-17. (In Russ.). <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2023.44.3>. EDN: YNLLHJ.
15. Chandra N., Elizabeth, Choudhury S., Vaidya H. Integrated spatial landslide risk assessment for population and infrastructure in Tehri, Garhwal Himalayas, India. *Geological Journal*. 2026. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/gj.70251>.
16. Das M., Gautam G.K., Jain S., Bhat M.F., Mankar A.K., Koner R. A comparative analysis of AHP, FR, AHP-FR and LR models for landslide susceptibility mapping in Sikkim Himalaya, India. *Earth Surface Processes and Landforms*. 2026;51(2):e70257. <https://doi.org/10.1002/esp.70257>.
17. Sisay T., Tesfaye G., Jothimani M., Reda T.M., Tadese A. Landslide susceptibility mapping using combined geospatial, FR and AHP models: a case study from Ethiopia's highlands. *Discover Sustainability*. 2024;5(1):474. <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00730-4>. EDN: QFZAIK.
18. Sutawane S., Mitra S. Landslide susceptibility analysis for Irshalwadi, Maharashtra by using analytical hierarchy process on satellite image. In: *Urbanisation and climate change: strategies for sustainable cities through geospatial technologies: 18th DGSi International conference*. Hyderabad: Osmania University; 2023.



19. Mohd M.H., Azman F.N.U.Z., Jusoh A., Rahman M.A.A. Landslide susceptibility mapping at Lebir and Galas River Basins after extreme flood event using weights of evidence. *Journal of Sustainability Science and Management*. 2019;14(2):103-115.

20. Zhou Y., Qi S.-C., Fan G., Chen M.-L., Zhou J.-W. Topographic effects on three-dimensional slope stability for fluctuating water conditions using numerical analysis. *Water*. 2020;12(2):615. <https://doi.org/10.3390/w12020615>. EDN: CICDCT.

21. 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;6:219-229. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.01.004>. EDN: QIUVR.

22. Kalsnes B., Capobianco V. Use of vegetation for landslide risk mitigation. *Climate adaptation modelling*. Cham: Springer; 2022, p. 77-85. https://doi.org/10.1007/978-3-030-86211-4_10.

23. Gantimurova S., Parshin A. Combined methodology for rockfall susceptibility mapping using UAV imagery data. *Remote Sensing*. 2024;16(1):177. <https://doi.org/10.3390/rs16010177>. EDN: PIEXRI.

Информация об авторах / Information about the authors

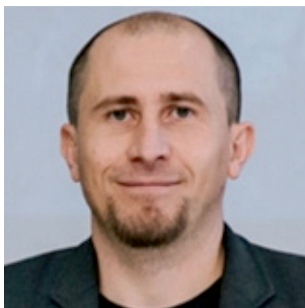


Гантимурова Светлана Анатольевна,

младший научный сотрудник департамента геоинформатики,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Российская Федерация,
lanagant@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0009-0005-5978-7869>

Svetlana A. Gantimurova,

Junior Researcher of the Geoinformatics Department,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russian Federation,
lanagant@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0009-0005-5978-7869>



Паршин Александр Вадимович,

кандидат геолого-минералогических наук,
проректор по геологии, наукам о Земле и окружающей среде,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Российская Федерация,
старший научный сотрудник лаборатории геохимии рудообразования
и геохимических методов поисков,
Институт геохимии им. А.П. Виноградова
Сибирского отделения Российской академии наук,
г. Иркутск, Российская Федерация,

✉ sarhin@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0003-3733-2140>

Alexander V. Parshin,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Vice-Rector for Geology, Earth and Environmental Sciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russian Federation,
Senior Researcher of the Laboratory of Geochemistry of Ore Formation
and Geochemical Prospecting Methods,
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russian Federation,

✉ sarhin@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0003-3733-2140>

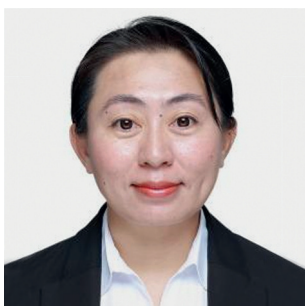


Хуан Гуаньвэнь,

профессор в области геодезии и мониторинга стихийных бедствий,
Школа инженерной геологии и геоматики,
Чанъаньский университет,
г. Сиань, Китай,
guanwen@chd.edu.cn
<https://orcid.org/0000-0001-5584-5885>

Guanwen Huang,

Professor in Geodesy and Disaster Monitoring,
School of Geological Engineering and Geomatics,
Chang'an University,
Xi'an, China,
guanwen@chd.edu.cn
<https://orcid.org/0000-0001-5584-5885>



Ли Цзюньюань,

доктор наук в области гидрогеологии,
Школа водных ресурсов и окружающей среды,
Чанъаньский университет,
г. Сиань, Китай,
ljiy@@chd.edu.cn
<https://orcid.org/0009-0001-1531-2192>

Junyuan Li,

PhD (Hydrogeology),
School of Water and Environment,
Chang'an University,
Xi'an, China,
ljiy@@chd.edu.cn
<https://orcid.org/0009-0001-1531-2192>



Цзин Це,

доктор наук в области геодезии и мониторинга стихийных бедствий,
Школа инженерной геологии и геоматики,
Чанъаньский университет,
г. Сиань, Китай,
jingce@chd.edu.cn
<https://orcid.org/0000-0002-1796-1962>

Ce Jing,

PhD (Geodesy and Disaster Monitoring),
School of Geological Engineering and Geomatics,
Chang'an University,
Xi'an, China,
jingce@chd.edu.cn
<https://orcid.org/0000-0002-1796-1962>



Залуцкий Вячеслав Трофимович,

кандидат технических наук,
заведующий лабораторией цифровой геодезии,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Российская Федерация,
zalutskyvt@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-7318-2429>

Vyacheslav T. Zalutskii,

Cand. Sci. (Eng.),
Head of the Laboratory of Digital Geodesy,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russian Federation,
zalutskyvt@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-7318-2429>



Вклад авторов / Contribution of the authors

С.А. Гантимурова – проведение исследования, визуализация, написание черновика рукописи.
А.В. Паршин – разработка концепции, разработка методологии, написание черновика рукописи, редактирование рукописи.
Г. Хуан – разработка методологии, проведение исследования, написание черновика рукописи.
Ц. Ли – проведение исследования, написание черновика рукописи.
Ц. Цзин – проведение исследования, написание черновика рукописи.
В.Т. Залуцкий – курирование данных, валидация результатов.
Svetlana A. Gantimurova – investigation, visualization, writing – original draft.
Alexander V. Parshin – conceptualization, methodology, writing – original draft, writing – editing.
Guanwen Huang – methodology, investigation, writing – original draft.
Junyuan Li – investigation, writing – original draft.
Ce Jing – investigation, writing – original draft.
Vyacheslav T. Zalutskii – data curation, validation.

Конфликт интересов / Conflict of interests

А.В. Паршин является членом редакционной коллегии журнала «Науки о Земле и недропользование» с 2023 года, но не имеет отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах авторы не заявляли.

Alexander V. Parshin has been a member of the editorial board of the Earth Sciences and Subsoil Use journal since 2023, but he did not take part in making decision about publishing the article under consideration. The article was peer reviewed following the journal's review procedure. The authors do not report any other conflicts of interests.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 04.02.2026; одобрена после рецензирования 17.02.2026; принята к публикации 25.02.2026.

The article was submitted 04.02.2026; approved after reviewing 17.02.2026; accepted for publication 25.02.2026.