ГЕОФИЗИКА

УДК 550.34.013.2:551.2 (479-924.73)
DOI: 10.46698/VNC.2025.39.32.001

Оригинальная статья

Совершенствование мониторинга оползневых процессов горных склонов при наличии транспортной инфраструктуры

Р.В. Клюев[1], **В.С. Бригида**[2]

[1] Московский политехнический университет, Россия, 107023, г. Москва, ул. Б. Семеновская, 38, e-mail: kluev-roman@rambler.ru,

[2] Федеральный исследовательский центр «Субтропический научный центр Российской академии наук», Россия, 354002, г. Сочи, ул. Я. Фабрициуса, 2/28, e-mail: 1z011@inbox.ru

Статья поступила: 12.08.2025, доработана: 15.09.2025, принята к публикации: 19.09.2025

Резюме: Актуальность работы. Изменение климата и усиление экстремальных гидрометеорологических явлений, таких как оползни, создают существенные угрозы для устойчивости транспортной инфраструктуры на Черноморском побережье Кавказа. Особую опасность представляют собой деградированные склоновые системы, находящиеся под воздействием антропогенной нагрузки, на которых расположены автомобильные дороги. Они являются элементами критической инфраструктуры для горных территорий юга России. Визуальные наблюдения остаются основным первичным методом геотехнического мониторинга состояния дорожной сети. В то же время наличие резко изменяющихся горно-геологических и гидрогеологических условий, а также отсутствие информации о состоянии подповерхностных слоев пород не позволяет выявить особенности кинематики деформационных процессов оползневых тел. В связи с этим актуализируется необходимость совершенствования методологии выбора параметров геофизических методов геоэкологического мониторинга. **Цель исследований** – совершенствование методов геофизического мониторинга оползневых процессов склоновых систем в условиях горных территорий Кавказа. **Методика исследований** включала анализ отечественных и зарубежных источников в области классификации факторов, которые инициируют появление оползней; оценку эффективности использования геофизических методов мониторинга, а также возможности использования искусственных нейронных сетей для обработки массивов больших данных. **Результаты исследования** показали, что комбинация ERT и сейсмических исследований позволяет сформировать высококачественные пространственные модели изучаемого массива почвенного покрова и горных пород, что в сочетании с ANN позволяет повысить точность прогностического анализа.

Ключевые слова: оползни, горные территории, склоны, геологические опасности, транспортная инфраструктура, геофизический мониторинг.

Для цитирования: Клюев Р.В., Бригида В.С. Совершенствование мониторинга оползневых процессов горных склонов при наличии транспортной инфраструктуры. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(3): 66-78. DOI: 10.46698/VNC.2025.39.32.001

GEOPHYSICS

DOI: 10.46698/VNC.2025.39.32.001

Original paper

Improving monitoring of landslide processes on mountain slopes in the presence of transport infrastructure

R.V. Klyuev[1], V.S. Brigida[2]

[1] Moscow Polytechnic University, 38 B. Semenovskaya, Moscow 107023, Russian Federation, e-mail: kluev-roman@rambler.ru,

[2] Federal Research Centre the Subtropical Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, 2/28 Ya. Fabriciusa Str.,Sochi 354002, Russian Federation, e-mail:1z011@inbox.ru

Received: 12.08.2025, revised: 15.09.2025, accepted: 19.09.2025

Abstract: Relevance. Climate change and the intensification of extreme hydrometeorological events, such as landslides, pose significant threats to the sustainability of transport infrastructure on the Black Sea coast of the Caucasus. Correspond the particular danger are degraded slope systems under the influence of anthropogenic load, on which highway are located, which are elements of critical infrastructure for mountainous areas of southern Russia. Visual observations remain the main primary method of geotechnical monitoring of the road network condition. At the same time, the presence of sharply changing mining and geological and hydrogeological conditions, as well as the lack of information on the condition of subsurface layers of rocks, do not allow identifying the features of the kinematics of deformation processes of landslide bodies. In this regard, the need to improve the methodology for selecting parameters of geophysical methods of geoecological monitoring is becoming more urgent. **The aim** of the research is to improve the methods of geophysical monitoring of landslide processes of slope systems in the mountainous areas of the Caucasus. **The research methodology** included an analysis of Russian and foreign sources in the field of classification of factors that initiate the occurrence of landslides; an assessment of the effectiveness of using geophysical monitoring methods, as well as the possibility of using artificial neural networks to process big data arrays. **The results** of the study showed that the combination of ERT and seismic studies allows for the formation of high-quality spatial models of the studied soil cover and rock massif, which, in combination with ANN, improves the accuracy of predictive analysis.

Keywords: landslides, mountainous areas, slopes, geological hazards, transport infrastructure, geophysical monitoring.

For citation: Klyuev R.V., Brigida V.S. Improving monitoring of landslide processes on mountain slopes in the presence of transport infrastructure. *Geologiya I Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(3): 66-78. DOI: 10.46698/VNC.2025.39.32.001

Введение

Склоновые системы, на которых расположены автомобильные дороги, являются элементами критической инфраструктуры для горных территорий юга России, особенно Черноморского побережья Кавказа [Свалова, 2022; Яицкая, Бригида, 2022; Бурдзиева и др., 2024а, б;Tutberidze et al., 2025; Zakharikhina et al., 2024; Jaiswal, van Westen, 2013]. Деградация склоновых систем, усугубляемая глобальными климатическими процессами, является существенной угрозой для обеспечения устойчивого социально-экономического развития Южного и Северо-Кавказского федеральных округов. Разрушение склонов вблизи транспортной инфраструктуры проявляется в виде

оползней различных типов, селей или формированием техногенно или естественно обусловленных трещиноватых структур на дорожном полотне. Одним из ярких примеров последствий отказа транспортной инфраструктуры при обеспечении устойчивой мобильности в туристских территориях является сход оползня в ноябре 2024 г. на 189-м км трассы А-147 Джубга – Сочи (в Хостинском районе г. Сочи) [Brigida et al., 2024]. В связи с этим отдельным вопросом остается идентификация и оценка основных «запускающих факторов» (triggering), а также степени их выраженности для конкретных условий эксплуатации опасных участков дорог [Wei et al., 2024].

Для снижения рисков потери устойчивости склоновых систем транспортной инфраструктуры (СТИ) необходимо совершенствование методологии геоэкологического мониторинга, а также систем ранней диагностики состояния геосреды. Кроме того важным аспектом является развитие системы раннего предупреждения на основе интегрированного подхода к оценке риска, прогнозной аналитики и непрерывного мониторинга текущей ситуации [Whiteley et al., 2019; Идармачев, 2022, 2025]. Современная нормативная оценка оползневой опасности основана на «комбинированном» способе, в котором на основании ретроспективного статистического анализа для каждого фактора влияния приведена балльная оценка вероятности смещения. Тем не менее, одновременная реализация нескольких запускающих факторов оползня сложно поддается прогнозу на основе нормативных методов.

Визуальные наблюдения остаются основным первичным методом геотехнического мониторинга состояния дорожной сети. Периодичность осмотров, в отличие от иностранных аналогов [Highland, Bobrowsky, 2008] где частота осмотра варьируется от 2-х до 10-ти лет, для каждого случая определяется индивидуально. В дополнение к визуальным оценкам, чаще используют непрерывные измерения ключевых показателей стабильности почвы. А в случае интеграции с системами раннего предупреждения – геофизические, геотехнические, а также методы дистанционного зондирования земли (ДЗЗ). Тем не менее, чаще всего используются непрерывные изменения отдельных геотехнических параметров, датчиков или точек наблюдений (реперные точки). В условиях субтропической зоны Кавказа, с наличием резкоизменяющихся горногелогических и гидрогеологических условий, при помощи такого подхода сложно выявить особенности кинематики деформационных процессов склоновых систем. Это усугубляет проблемы формирования достоверных моделей «медленных смещений» при использовании пространственно-рассредоточенных геодезических сетей. При использовании геостатистического анализа космических снимков или данных с беспилотных летательных аппаратов также существует ряд ограничений: высокая цена снимков с высоким пространственным разрешением; проблема наличия облачного покрова; проблема обработки больших данных, особенно для мультиспектральных изображений. Кроме того, для целей оценки оползневой опасности, только использование ДЗЗ невозможно вследствие оценки только поверхностной составляющей (без учета типа и характеристик почв, почвенной влаги и воздействия осадков) [Xu et al., 2024]. При условиях максимального влияния залповых ливней (Черноморское побережье Кавказа) идентификация опасного участка дороги невозможна напрямую по данным об объеме осадков без учета эвапотранспирации и условий дренирования подземных вод [Kaya, Midilli, 2020].

Для преодоления данных ограничений геотехнических и дистанционных методов мониторинга наиболее представительным является использование геофизических исследований в сочетании с обработкой данных на основе искусственных нейронных сетей. Главным преимуществом геофизических методов является получение пространственных моделей подповерхностных слоев в масштабе оползнево-

го тела при минимальных затратах на бурение геологических скважин. Геофизические подходы к геоэкологическому мониторингу оползневых структур обсуждались многими исследователями [Whiteley et al., 2019; Tsai, Lin, 2022; Керимов, Эльжаев, 2024; Uyanik, 2019]. Тем не менее, комплексный анализ их использования для целей обеспечения надежности транспортной инфраструктуры остается недостаточно изученным. В связи с тем, что устойчивость склоновых систем обуславливает наличие существенных техногенных рисков потери транспортной доступности отдаленных или горных территорий, смягчение проявлений климатических изменений на Кавказе, является важной научной задачей.

Цель работы – совершенствование методов геофизического мониторинга оползневых процессов склоновых систем в условиях горных территорий Кавказа при наличии транспортной инфраструктуры. Для ее достижения решались следующие задачи: анализировались геофизические методы и факторы, инициирующие появление оползневых процессов в склоновых системах; классифицировались алгоритмы искусственных нейронных сетей используемых при оценке оползневых процессов.

Методы исследования

Методология исследований включала анализ отечественных и зарубежных источников в области классификации факторов, которые инициируют появление оползней; оценку эффективности использования геофизических методов мониторинга геосреды, а также возможности использования искусственных нейронных сетей для обработки массивов больших данных при решении геоэкологических задач.

Результаты и обсуждение

Анализ геофизических методов и факторов инициирующих появление оползневых процессов в склоновых системах

Из анализа зарубежной литературы [Highland, Bobrowsky, 2008] следует, что, например, американский подход подразумевает разделение триггеров оползневой опасности на 3-и типа: естественные, физические и человеческие (антропогенные). К первому типу относятся: влияние осадков и таяние снега, выветривание, а также наводнение. Ко второму типу – влияние геологических причин (типы и физико-механические свойства геоматериалов, их жесткость, трещиноватость, сланцеватость и др.) и морфологических причин (тектоника, различного рода эрозии, осадконакопление, наличие растительности). К третьему типу относятся: наличие орошения или использование нестабильных земляных насыпей, вырубка леса, наличие отходов, искусственное отклонение речного течения и др. В свою очередь к нормативным для формирования оползня в нашей стране относят факторы I-го и II-го типов. К первому (наиболее значимому) типу относятся только: геологическое строение, рельеф и экспозиция склона. Ко второму же – осадки, режим грунтовых вод, растительность, сейсмическая активность, воздействие речного потока, антропогенное действие и процессы выветривания [Prapolski, Romanovski, 2025]. Исходя из этого, следует, что фотометрические и дистанционные методы не могут диагностировать наличие опасности всех факторов первой группы как отечественной, так и зарубежной классификации, что обуславливает необходимость подбора рациональных параметров геофизического мониторинга [Yaitskaya et al., 2023].

Геофизические методы, основанные на неразрушающем контроле состояния подповерхностного слоя техногенно трансформированных ландшафтов представ-

ляют существенные преимущества при оценке индикаторов оползневой опасности. Сейсмические методы или, например, томография электрического удельного сопротивления (ERT) довольно эффективно применяются для оценки нарушений внутренней структуры почв обусловленных зарождением и реализацией деформационных процессов. Кроме того, они расширяют горизонты косвенной оценки гидрологического режима и механических свойств почвенного покрова. Сейсмические методы довольно часто используются для оценки подземной структуры массива, наличия неоднородностей или трещиноватых структур. Обнаружение сейсмических сигналов обеспечивается за счет геофонов, которые преобразуют звуковые сигналы различной амплитуды в непрерывный поток цифровой информации. Методы поверхностных волн (многоканальный анализ поверхностных волн – MASW) продемонстрировали высокую производительность при обнаружении мелких трещиноватых структур и оценке скорости сдвиговых волн [Tsai, Lin, 2022]. Благодаря использованию регрессионного анализа стало возможным установление взаимосвязей между сейсмическими волнами и свойствами почв (пористость, уровень насыщения водой) [Uyanik, 2019]. Кроме того, пространственные модели распространения P-волн позволяют достоверно характеризовать уровень содержания влаги или прочность на сдвиг [Uyanik, 2019]. Одним из наиболее современных направлений в данной области является применение распределенного акустического зондирования (DAS), которое позволяет повысить качество пространственно-временных моделей при экономии средств на проведение исследований [Zhu et al., 2023].

Георадиолокационный метод базируется на использовании георадаров для просвечивания почвенных профилей и коренных пород. Метод реализуется посредством генерации электромагнитных волн и последующего поглощения отраженных сигналов. Отражаемые сигналы характеризуют поверхности ослабления, трещиноватые структуры или водные объекты. Полученные геопространственные модели могут отображать изменения гидрологического режима подземных вод, что является существенным для инициирования оползней на горных склонах [Wu et al., 2019]. Использование одновременно нескольких антенн с различной частотой генерации импульсов позволяет получать профили различных глубин с соответствующей степенью детализации. Одним из основных существенных ограничений метода является невозможность его использования для автоматического мониторинга в режиме реального времени, а также сложность при отсутствии резкой разницы в градиентах (например, после дождя), когда массив выглядит как неконтрастные слои с одинаковой отражательной способностью [Kara et al., 2025].

Электрические методы разделяют на три основные группы: само потенциальная томография или SPT, электротомография (ERT) и индуцированная поляризационная томография (IPT). При этом ERT является наиболее перспективной для исследуемых вопросов, поскольку хорошо подходит для оценки наиболее критичных для развития оползней параметров исследуемого массива. В нем сначала измеряется кажущееся удельное сопротивление пород, а затем на основе инверсии рассчитывается истинное распределение. Преимуществом данного метода является возможность определения пространственной динамики почвенной влаги и водоносных горизонтов, пористости пород, солености подземных вод [Slater, Binley, 2021]. Это обусловило широкое использование данного метода для задач гидрогеологии и детального определения параметров залегания слоев пород. Использование недорогих электродов, высокая степень масштабируемости, а также проведение повторных измерений с использованием инверсии по времени, позволяет осуществить геоэкологический мониторинг в пространстве-времени (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

Достоинства и недостатки основных геофизических методов мониторинга / Advantages and disadvantages of the main geophysical monitoring methods

Методы/ Methods	Достоинства/Advantages	Недостатки/Disadvantages
Сейсмические /Seismic	К достоинствам стоит отнести универсальность и чувствительность данных методов при обнаружении поверхности оползневого тела в слоях почвы. Также способность DAS обеспечивать непрерывный пространственный охват больших территорий и обнаруживать незначительные смещения точек. Кроме того, преимуществом является получение достоверных величин мощности отдельных стратиграфических пластов пород. / The advantages include the versatility and sensitivity of these methods in detecting the surface of a landslide body in soil layers. Also, the ability of DAS to provide continuous spatial coverage of large areas and detect minor point shifts. In addition, the advantage is obtaining reliable values of the thickness of individual stratigraphic layers of rocks.	Высокие эксплуатационные расходы и объемы полученных данных являются существенными ограничениями для их широкого развертывания в условиях местности со сложным ландшафтом. В городской местности наличие посторонних шумов и фоновых помех усложняет сбор и интерпретацию полученных сигналов. Сезонная изменчивость может внести существенные коррективы, что может повлиять на надежность и точность геопространственных моделей и локализации опасных областей. / High operating costs and volumes of data obtained are significant limitations for their widespread deployment in areas with complex terrain. In urban areas, the presence of extraneous noise and background interference complicates the collection and interpretation of the received signals. Seasonal variability can make significant adjustments, which can affect the reliability and accuracy of geospatial models and the localization of hazardous areas.
Электрические/Electrical	Методы эффективны при мониторинге изменений влажности почв, а также картировании поверхностных неоднородностей. Возможность развёртывания относительно недорогих электродных сетей для долгосрочного мониторинга склоновых систем с высоким разрешением способствует предпочтительности использования данного метода при обследовании больших площадей. Инверсия удельного сопротивления и электротомография имеют наибольшее разрешение, что делает их универсальными для целого ряда геотехнических и гидрологических задач. Быстрый сбор и обработка данных позволяют формировать геомодели в минимальные сроки./ The methods are effective in monitoring changes in soil moisture, as well as in mapping surface heterogeneities. The possibility of deploying relatively inexpensive electrode networks for long-term monitoring of slope systems with high resolution contributes to the preference for using this method when surveying large areas. Inversion of specific resistance or electrical tomography have the highest resolution, which makes them universal for a number of geotechnical and hydrological problems. Rapid data collection and processing allow the formation of geomodels in minimal time.	К основным недостаткам метода стоит отнести трудности с калибровкой, низким разрешением на большой глубине просвечивания массива, а также сложности в интерпретации инверсионных решений. Также сложности сопровождают просвечивание обводненных или глинистых массивов горных пород. / The main disadvantages of the method include difficulties with calibration, low resolution at a large depth of massif transillumination, as well as difficulties in interpreting inversion solutions. Difficulties are also accompanied by transillumination of waterlogged or clayey rock massifs.

Георадары/Ground penetrating radars	Сильными сторонами метода являются быстрота развертывания и экономичность проведения экспериментальных работ. Отдельным положительным моментом является возможность обнаружения водоносных горизонтов, и возможность проведения исследований в режиме реального времени. Также гибкость и мобильность переносных георадаров, а в некоторых случаях (критична для дорожной инфраструктуры) возможность проведения исследований без непосредственного контакта с дорожным покрытием. / The strengths of the method are the speed of deployment and the cost-effectiveness of conducting experimental work. A separate positive point is the ability to detect aquifers and the ability to conduct research in real time. Also the flexibility and mobility of portable ground penetrating radars, and in some cases (critical for road infrastructure) the ability to conduct research without direct contact with the road surface.	Проблема сложности интерпретации полученных данных при апробировании относится и к данному типу геофизических методов. Кроме того, для радиолокационного метода чувствительным аспектом остается проблема ложных отражений и ослабления сигнала с глубиной. / The problem of the complexity of interpreting the data obtained during testing also applies to this type of geophysical methods. In addition, for the radar method, the sensitive aspect remains the problem of false reflections and signal attenuation with depth.

Для получения синергетического эффекта необходимо разумное сочетание нескольких типов геофизических методов, например ERT и сейсмоакустических [Lu et al., 2025]. Сейсмические методы могут предоставить информацию с высоким разрешением о характере и динамике смещений, а также характере и пространственной ориентации системы трещин, в то время как ERT позволяет детализировать флюидодинамику и особенности залегания грунтовых вод [Pang et al., 2025].

Использование искусственных нейронных сетей при оценке оползневых процессов

В последнее десятилетие развитие интеллектуального анализа способствовало бурному развитию нейро-сетевых алгоритмов [Kapanski et al., 2025; Bhowmik et al., 2025; Hristova et al., 2023] (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

Достоинства и недостатки использования основных искусственных нейронных сетей / Advantages and disadvantages of the main uses of artificial neural networks

Методы ANN/ ANN Methods	Достоинства / Advantages	Недостатки / Disadvantages
Многослойные персептроны /Multilayer Perceptrons (MLP)	Возможность реализации нелинейного моделирования позволяет аппроксимировать сложные функциональные зависимости. Гибкая архитектура позволяет настраивать скрытые слои, оптимизируя производительность для задач построения регрессии. Высокая адаптивность позволяет осуществлять эффективное обобщение на неизвестные данные. / The ability to implement nonlinear modeling allows you to approximate complex functional dependencies. Flexible architecture allows you to configure hidden layers to optimize performance for regression problems. High adaptability allows you to effectively generalize to unknown data.	Модели усложняясь, становятся очень чувствительными к переобучению. Ограниченная способность фиксировать пространственные зависимости ограничивает использование метода при обработке последовательных данных. / Models become more complex and become very sensitive to pretraining. Limited ability to capture spatial dependencies limits the use of the method when processing sequential data.

Графовые нейронные сети /Graph Neural Networks (GNN)	Операторы свертки графов агрегируют информацию о соседстве данных. Инвариантность к перестановкам позволяет обеспечить согласованность прогнозов, независимо от порядка узлов. Возможность производства топографического анализа для повышения эффективности вычислений. / Graph convolution operators aggregate information about the neighborhood of data. Permutation invariance ensures consistency of predictions regardless of node order. Possibility of topographic analysis to improve computational efficiency.	Узкие места в памяти возникают при обработке больших или графов разных размеров. Ограниченная эффективность при обработке неоднородных графов. / Memory bottlenecks occur when processing large or different sized graphs. Limited efficiency when processing heterogeneous graphs.
Свёрточные нейронные сети / Convolutional Neural Networks (CNN)	Распределение весов сокращает количество параметров, что повышает эффективность вычислений. Хорошо себя зарекомендовали в задачах обработки изображений в связи с иерархическим обучением признакам с помощью сверточных фильтров. / Weight distribution reduces the number of parameters, which increases computational efficiency. They have proven themselves well in image processing tasks due to hierarchical feature learning using convolutional filters.	Структурная специализация для распределенных сеточных данных (например, пикселей в растрах) ограничивает применимость метода. Также метод имеет ограниченную интерпретируемость данных, а также сложности при оценке экстремальных явлений. / Structural specialization for distributed grid data (e.g. pixels in rasters) limits the applicability of the method. The method also has limited interpretability of data, as well as difficulties in assessing extreme events.
Длинная цепь элементов краткосрочной памяти / Long Short-Term Memory networks (LSTM)	Компоненты памяти обеспечивают избирательное долговременное сохранение информации, что позволяет улучшить обобщение информации на новые данные. / Memory components provide selective long-term storage of information, which improves the generalization of information to new data.	Избыточность ячеек памяти увеличивают ресурсоемкость на параметризацию более чем в 2 раза по сравнению с рекуррентными нейронными сетями. Сложности в обеспечении эффективной обработки протяженных временных рядов данных или последовательностей. / Redundancy of memory cells increases the resource intensity for parameterization by more than 2 times compared to recurrent neural networks. Difficulties in ensuring efficient processing of extended time series of data or sequences.
Глубокие нейронные сети /Deep Neural Networks (DNN)	Эффективно подходит к задачам распознавания образов. Возможность автоматизированного извлечения признаков при сохранении адаптивности к различным типам данных. / Effectively approaches pattern recognition tasks. Possibility of automated feature extraction while maintaining adaptability to different types of data.	Статистическая природа этих сетей затрудняет работу с редкими событиями или граничными случаями, недостаточно представленными в обучающих распределениях. / The histological nature of these networks makes it difficult to work with rare events or edge cases that are underrepresented in training distributions.

Искусственные нейронные сети или ANN представляют собой вычислительные алгоритмы, напоминающие биологические нейроны. Lucchese [Lucchese et al., 2021] успешно использовал метод многослойных персептронов для построения литологии, цифровой модели местности, расстояния до проезжей части и уклонов элементов склоновых систем. Также этот метод может быть использован при определении количества осадков, нормализованного индекса разности растительности (NDVI) или определении геологических особенностей местности [Ikram et al.,

2023]. При исследовании оползневых процессов алгоритм ANN (свёрточные нейронные сети) эффективно применялся для оценки неблагоприятных геологических и гидрологических условий, а также уровня сейсмичности местности [Aslam et al., 2023]. В работе Ma метод «глубокие нейронные сети» показал хорошие результаты при определении геопространственного расположения водоразделов и разломных структур [Ma et al., 2023].

Из проведенного анализа следует, что общим ограничением для большинства алгоритмов нейронных сетей является проблема обоснования параметров «качества-соответствия» при выборе конкретного алгоритма [Zaalishvili et al., 2022]. Следующим немаловажным аспектом является энергоёмкость и, следовательно, дороговизна вычислений. Необходимость наличия ретроспективных наборов больших данных и высокое потребление ресурсов становится вызовом для многих развитых стран (с высокой долей проникновения методов искусственного интеллекта). Разрозненность не агрегированных данных из датчиков различных типов также обуславливает невозможность формирования в отдельных случаях обобщенных дата-сетов и дата-кубов.

Выводы

Учитывая негативные последствия климатических изменений, вопросы интенсификации деформационных процессов склоновых систем в условиях горных территорий имеют ключевое значение при обеспечении устойчивого развития Черноморского побережья Кавказа. Это имеет решающее значение для сохранения и приумножения рекреационной привлекательности туристских дестинаций в городе-курорте Сочи. Традиционные методы мониторинга не всегда адекватно отражают влияние гидрологических и геологических условий инициирования оползневых процессов. Из проведенного анализа следует, что необходима интеграция геопространственного анализа космических снимков с геофизическими методами (сейсмоакустический и электротомография), которая позволит получить дуальные цифровые двойники, как ландшафтных, так и подповерхностных частей склоновых систем. Обработка агрегированных данных протяженных временных рядов из разрозненных датчиков и растровых снимков должна проводиться с использованием нейросетевых методов, в зависимости от выбранной совокупности критериев «качества подгонки».

В связи с использованием методов интеллектуального анализа для прогнозной аналитики остается пока недостаточно решенной проблема высокой вычислительной стоимости исследований, а также сложности агрегирования и формирования типизированных наборов больших данных. Дальнейшие исследования стоит сфокусировать на оптимизации и обосновании рациональных параметров отдельных алгоритмов ANN для их интеграции в системы оповещения населения о возможности наступления опасных геологических процессов.

Литература

1. Бригида В.С., Мишулина С.И., Стась Г.В. Перспективные направления экологизации структурных элементов туристского продукта Краснодарского края (на примере транспортной составляющей). // Устойчивое развитие горных территорий. – 2020. – Т. 12. № 1. – С. 18–25. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-1-18–25.

2. Бурдзиева О.Г., Мельков Д.А., Ревазов М.О., Кортиев А.Л. Активизация оползневых процессов, обусловленная урбанизацией горных территорий. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2024а. – Т. 16. № 4. – С. 1646–1658. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-4-1646-1658.

3. Бурдзиева О.Г., Ревазов М.О., Кортиев А.Л., Гогичев Р.Р. Влияние воздействия геодинамических процессов на геоэкологическую нагрузку горного региона. // Геология и геофизика Юга России. – 2024б. – Т. 14. № 4. – С. 166–179. DOI: 10.46698/VNC.2024.50.44.014.

4. Идармачев Ш.Г. Система непрерывного мониторинга параметров трещин в горном массиве на основе резистивных датчиков. // Геология и геофизика Юга России. – 2025. – Т. 15. № 1. – С. 82–91. DOI: 10.46698/VNC.2025.78.66.007.

5. Идармачев Ш.Г., Черкашин В.И., Алиев И.А., Идармачев И.Ш. Изучение динамики ширины трещины потенциально обвального скального массива струнным датчиком на горе Гуниб (Дагестан). // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. № 2. – С. 78–88. DOI: 10.46698/VNC.2022.70.64.006.

6. Керимов И.А., Эльжаев А.С. Применение геофизических методов при изучении оползневых процессов. // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 4. – С. 66–83. DOI: 10.46698/ VNC.2024.91.39.007.

7. Свалова В.Б. Управление геоэкологическим риском и проблемы устойчивого развития горных территорий. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. № 1. – С. 129–147. DOI: 10.46698/VNC.2022.48.61.010.

8. Яицкая Н.А., Дзагания Л.М., Бригида В.С. Геоэкологические опасности в условиях климатических изменений территорий субтропической зоны Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 2. – С. 118–132. DOI: 10.46698/VNC.2023.54.85.010.

9. Aslam B., Zafar A., Khalil U. Comparative analysis of multiple conventional neural networks for landslide susceptibility mapping. Natural Hazards. 2023. Vol. 115. pp. 673–707. DOI: 10.1007/s11069-022-05570-x.

10. Bhowmik A., Kumar R., Ranganathaswamy M.K., Kumar, Y.K., Samal P., Mahapatro A. et al. Predictive modeling of the mechanical behavior of 3D-printed polylactic acid/wood composite: Comparison of GEP and ANN methods. AIP Advances. 2025. Vol. 15. Issue 4. DOI: 10.1063/5.0268653.

11. Highland L.M., Bobrowsky P. The landslide handbook – A guide to understanding landslides: Reston, Virginia, U.S. Geological Survey Circular. 2008. Vol. 1325. 129 p.

12. Hristova T., Savov N., Yanev N. Municipal solid waste and non-hazardous waste processing for sustainable circular economy through blockchain. Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2023. Vol. 58. Issue 3. pp. 513–521. DOI: 10.59957/jctm.v58i3.81.

13. Ikram R.M.A., Dehrashid A.A., Zhang B., Chen Z., Le B.N., Moayedi H. A novel swarm intelligence: Cuckoo optimization algorithm (COA) and SailFish optimizer (SFO) in landslide susceptibility assessment. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. 2023. Vol. 37. pp. 1717–1743.

14. Jaiswal P., van Westen C.J. Use of quantitative landslide hazard and risk information for local disaster risk reduction along a transportation corridor: A case study from Nilgiri district, India. Natural Hazards. 2013. Vol. 65. pp. 887–913DOI: 10.1007/s11069-012-0404-1.

15. Kapanski A., Hruntovich N.V., Klyuev R.V., Brigida V.S. Identification of easily accessible urban water consumption factors for energy-efficient management of pumping stations. Water Conservation Science and Engineering. 2025. Vol. 10. Art. No. 46. DOI: 10.1007/s41101-025-00372-1.

16. Kara M.E., Seren A., Koroglu F., Alemdag H. Ground-penetrating radar (GPR) tomographic imaging and estimation of the volumetric water content of a viaduct pillar using the simultaneous iterative reconstruction technique algorithm. NDT & E International. 2025. Vol. 156. Art. No. 103448. DOI: 10.1016/j.ndteint.2025.1034481.

17. Kaya A., Midilli U.M. Slope stability evaluation and monitoring of a landslide: A case study from NE Turkey. Journal of Mountain Science. 2020. Vol. 17. pp. 2624–2635. DOI: 10.1007/s11629-020-6306-x.

18. Lu K., Li K., Li F. et al. Using electrical resistivity techniques (ERT and SP) for nondestructive detection of seepage channels at the Leitai heritage site, China. Scientific Reports. 2025. Vol. 15. Art. No. 904. DOI: 10.1038/s41598-025-85368-6.

19. Lucchese L.V., de Oliveira G.G., Pedrollo O.C. Investigation of the influence of nonoccurrence sampling on landslide susceptibility assessment using Artificial Neural Networks. Catena. 2021. Vol. 198. Art. No. 105067. DOI: 10.1016/j.catena.2020.105067.

20. Ma W., Dong J., Wei Z., Peng L., Wu Q., Wang X., Wu Y. Landslide susceptibility assessment using the certainty factor and deep neural network. Frontiers in Earth Science. 2023. Vol. 10. Art. No. 1091560. DOI: 10.3389/feart.2022.1091560.

21. Pang Y., Yu Z., Xie Z. et al. Study of 3D electrical resistivity tomography in offshore waters. Doklady Earth Sciences. 2025. Vol. 523. Art. No. 19. DOI: 10.1134/S1028334X24605698.

22. Prapolski D., Romanovski V. Resent advances in underground water deironing and demanganization: Comprehensive review. Journal of Water Process Engineering. 2025. Vol. 70. Art. No. 107089. DOI: 10.1016/j.jwpe.2025.107089.

23. Slater L., Binley A. Advancing hydrological process understanding from long-term resistivity monitoring systems. Wiley Interdisciplinary Reviews Water 2021. Vol. 8. Issue 3. Art. No. e1513. DOI: 10.1002/wat2.1513.

24. Tsai C.C., Lin C.H. Review and future perspective of geophysical methods applied in nearshore site characterization. Journal of Marine Science and Engineering. 2022. Vol. 10. Art. No. 344. DOI: 10.3390/jmse10030344.

25. Tutberidze T.V., Ryndin A.V., Besedin T.D. et al. Interrelation between growing conditions in caucasus subtropics and actinidia deliciosa ‘Hayward’ yield for the sustainable agriculture. Sustainability. 2025. Vol. 17. Art. No. 6499DOI: 10.3390/su17146499.

26. Uyanik O. Estimation of the porosity of clay soils using seismic P- and S-wave velocities. Journal of Applied Geophysics. 2019. Vol. 170. Art. No. 103832DOI: 10.1016/j.jappgeo.2019.103832.

27. Wei L., Zeng Z., Yan J. Factors affecting the stability of Loess Landslides: A review. Applied Sciences. 2024. Vol. 14. Issue 7. Art. No. 2735. DOI: 10.3390/app14072735.

28. Whiteley J.S., Chambers J.E., Uhlemann S., Wilkinson P.B., Kendall J.M. Geophysical monitoring of moisture-induced landslides: A review. Reviews of Geophysics. 2019. Vol. 57. Issue1. pp. 106–145. DOI: 10.1029/2018RG000603.

29. Wu K., Rodriguez G.A., Zajc M., Jacquemin E., Clement M., De Coster A., Lambot S. A new drone-borne GPR for soil moisture mapping. Remote Sensing of Environment. 2019. Vol. 235. Art. No. 111456. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111456.

30. Xu H., Shu B., Zhang Q., Du Y., Zhang J., We T., Xiong G.H., Dai X.L., Wang L. Site selection for landslide GNSS monitoring stations using InSAR and UAV photogrammetry with analytical hierarchy process. Landslides. 2024. Vol. 21. pp. 791–805. DOI: 10.1007/s10346-023-02188-31.

31. Zaalishvili V., Burdzieva O., Kanukov A., Zaks T. Eco-Geophysical and Geoecological Factors in Assessing the State of the Geological Environment Based on the Analysis of Spatial Databases of the Territory of the Republic of North Ossetia-Alania. Applied Sciences. 2022. Vol. 12. Art. No. 2644. DOI: 10.3390/app12052644.

32. Zakharikhina L., Lesnikova P., Rogozhina E., Kerimzade V., Gorbunova D. Influence of wind direction on the elemental composition of atmospheric deposition on the Black Sea coast of Sochi, Russia. Environment and Ecology Research. 2024. Vol. 12. Issue 5. pp. 514–536. DOI: 10.13189/eer.2024.120505.

33. Zhu W., Biondi E., Li J. et al. Seismic arrival-time picking on distributed acoustic sensing data using semi-supervised learning. Nature Communications. 2023. Vol. 14. Art. No. 8192. DOI: 10.1038/s41467-023-43355-3.

References

1. Brigida V.S., Mishulina S.I., Stas G.V. Perspective directions of “Ecologisation” of structural elements of a tourist product of Krasnodar Region (case study of transportation component). Sustainable Development of Mountain Territories. 2020. Vol. 12 No. 1. pp. 18–25. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-1-18–25. (In Russ.)

2. Burdzieva O.G., Melkov D.A., Revazov M.O., Kortiev A.L. Activation of landslide processes caused by urbanization of mountainous areas. Sustainable Development of Mountain Territories. 2024a. Vol. 16. No. 4. pp. 1646–1658. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-4-1646-1658. (In Russ.)

3. Burdzieva O.G., Revazov M.O., Kortiev A.L., Gogichev R.R. Influence of geodynamic processes on the geoecological load of mountain region. Geology and Geophysics of Russian South. 2024b. Vol. 14. No. 4. pp. 166–179. DOI: 10.46698/VNC.2024.50.44.014. (In Russ.)

4. Idarmachev Sh.G., Cherkashin V.I., Aliyev I.A., Idarmachev I.Sh. Studying the dynamics of the crack width of a potentially collapsing rock massif with a string sensor on Mount Gunib (Dagestan). Geology and Geophysics of Russian South. 2022. Vol. 12. No. 2. pp. 78–88. DOI: 10.46698/VNC.2022.70.64.006. (In Russ.)

5. Idarmachev Sh.G. The system of continuous monitoring of parameters of cracks in a mountain range on the basis of resistive sensors. Geology and Geophysics of Russian South. 2025. Vol. 15. No. 1. pp. 82–91. DOI: 10.46698/VNC.2025.78.66.007. (In Russ.)

6. Kerimov I.A., Elzhaev A.S. Application of geophysical methods in the study of landslide processes. Geology and Geophysics of Russian South. 2024. Vol. 14. No. 4. pp. 66–83. DOI: 10.46698/VNC.2024.91.39.007. (In Russ.)

7. Svalova V.B. Geoecological risk management and problems of sustainable development of mountain territories. Geology and Geophysics of Russian South. 2022. Vol. 12. No. 1. pp. 129–147. DOI: 10.46698/VNC.2022.48.61.010. (In Russ.)

8. Yaitskaya N.A., Dzaganiia L.M., Brigida V.S. Geoecological hazards in context of climate change of territories of Caucasus subtropical zone. Geology and Geophysics of Russian South. 2023. Vol. 13. No. 2. pp. 118–132. DOI: 10.46698/VNC.2023.54.85.010. (In Russ.)

9. Aslam B., Zafar A., Khalil U. Comparative analysis of multiple conventional neural networks for landslide susceptibility mapping. Natural Hazards. 2023. Vol. 115. pp. 673–707. DOI: 10.1007/s11069-022-05570-x.

10. Bhowmik A., Kumar R., Ranganathaswamy M.K., Kumar, Y.K., Samal P., Mahapatro A. et al. Predictive modeling of the mechanical behavior of 3D-printed polylactic acid/wood composite: Comparison of GEP and ANN methods. AIP Advances. 2025. Vol. 15. Issue 4. DOI: 10.1063/5.0268653.

11. Highland L.M., Bobrowsky P. The landslide handbook – A guide to understanding landslides: Reston, Virginia, U.S. Geological Survey Circular. 2008. Vol. 1325. 129 p.

12. Hristova T., Savov N., Yanev N. Municipal solid waste and non-hazardous waste processing for sustainable circular economy through blockchain. Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2023. Vol. 58. Issue 3. pp. 513–521. DOI: 10.59957/jctm.v58i3.81.

13. Ikram R.M.A., Dehrashid A.A., Zhang B., Chen Z., Le B.N., Moayedi H. A novel swarm intelligence: Cuckoo optimization algorithm (COA) and SailFish optimizer (SFO) in landslide susceptibility assessment. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. 2023. Vol. 37. pp. 1717–1743.

14. Jaiswal P., van Westen C.J. Use of quantitative landslide hazard and risk information for local disaster risk reduction along a transportation corridor: A case study from Nilgiri district, India. Natural Hazards. 2013. Vol. 65. pp. 887–913DOI: 10.1007/s11069-012-0404-1.

15. Kapanski A., Hruntovich N.V., Klyuev R.V., Brigida V.S. Identification of easily accessible urban water consumption factors for energy-efficient management of pumping stations. Water Conservation Science and Engineering. 2025. Vol. 10. Art. No. 46. DOI: 10.1007/s41101-025-00372-1.

16. Kara M.E., Seren A., Koroglu F., Alemdag H. Ground-penetrating radar (GPR) tomographic imaging and estimation of the volumetric water content of a viaduct pillar using the simultaneous iterative reconstruction technique algorithm. NDT & E International. 2025. Vol. 156. Art. No. 103448. DOI: 10.1016/j.ndteint.2025.1034481.

17. Kaya A., Midilli U.M. Slope stability evaluation and monitoring of a landslide: A case study from NE Turkey. Journal of Mountain Science. 2020. Vol. 17. pp. 2624–2635. DOI: 10.1007/s11629-020-6306-x.

18. Lu K., Li K., Li F. et al. Using electrical resistivity techniques (ERT and SP) for nondestructive detection of seepage channels at the Leitai heritage site, China. Scientific Reports. 2025. Vol. 15. Art. No. 904. DOI: 10.1038/s41598-025-85368-6.

19. Lucchese L.V., de Oliveira G.G., Pedrollo O.C. Investigation of the influence of nonoccurrence sampling on landslide susceptibility assessment using Artificial Neural Networks. Catena. 2021. Vol. 198. Art. No. 105067. DOI: 10.1016/j.catena.2020.105067.

20. Ma W., Dong J., Wei Z., Peng L., Wu Q., Wang X., Wu Y. Landslide susceptibility assessment using the certainty factor and deep neural network. Frontiers in Earth Science. 2023. Vol. 10. Art. No. 1091560. DOI: 10.3389/feart.2022.1091560.

21. Pang Y., Yu Z., Xie Z. et al. Study of 3D electrical resistivity tomography in offshore waters. Doklady Earth Sciences. 2025. Vol. 523. Art. No. 19. DOI: 10.1134/S1028334X24605698.

22. Prapolski D., Romanovski V. Resent advances in underground water deironing and demanganization: Comprehensive review. Journal of Water Process Engineering. 2025. Vol. 70. Art. No. 107089. DOI: 10.1016/j.jwpe.2025.107089.

23. Slater L., Binley A. Advancing hydrological process understanding from long-term resistivity monitoring systems. Wiley Interdisciplinary Reviews Water 2021. Vol. 8. Issue 3. Art. No. e1513. DOI: 10.1002/wat2.1513.

24. Tsai C.C., Lin C.H. Review and future perspective of geophysical methods applied in nearshore site characterization. Journal of Marine Science and Engineering. 2022. Vol. 10. Art. No. 344. DOI: 10.3390/jmse10030344.

25. Tutberidze T.V., Ryndin A.V., Besedin T.D. et al. Interrelation between growing conditions in caucasus subtropics and actinidia deliciosa ‘Hayward’ yield for the sustainable agriculture. Sustainability. 2025. Vol. 17. Art. No. 6499DOI: 10.3390/su17146499.

26. Uyanik O. Estimation of the porosity of clay soils using seismic P- and S-wave velocities. Journal of Applied Geophysics. 2019. Vol. 170. Art. No. 103832DOI: 10.1016/j.jappgeo.2019.103832.

27. Wei L., Zeng Z., Yan J. Factors affecting the stability of Loess Landslides: A review. Applied Sciences. 2024. Vol. 14. Issue 7. Art. No. 2735. DOI: 10.3390/app14072735.

28. Whiteley J.S., Chambers J.E., Uhlemann S., Wilkinson P.B., Kendall J.M. Geophysical monitoring of moisture-induced landslides: A review. Reviews of Geophysics. 2019. Vol. 57. Issue1. pp. 106–145. DOI: 10.1029/2018RG000603.

29. Wu K., Rodriguez G.A., Zajc M., Jacquemin E., Clement M., De Coster A., Lambot S. A new drone-borne GPR for soil moisture mapping. Remote Sensing of Environment. 2019. Vol. 235. Art. No. 111456. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111456.

30. Xu H., Shu B., Zhang Q., Du Y., Zhang J., We T., Xiong G.H., Dai X.L., Wang L. Site selection for landslide GNSS monitoring stations using InSAR and UAV photogrammetry with analytical hierarchy process. Landslides. 2024. Vol. 21. pp. 791–805. DOI: 10.1007/s10346-023-02188-31.

31. Zaalishvili V., Burdzieva O., Kanukov A., Zaks T. Eco-Geophysical and Geoecological Factors in Assessing the State of the Geological Environment Based on the Analysis of Spatial Databases of the Territory of the Republic of North Ossetia-Alania. Applied Sciences. 2022. Vol. 12. Art. No. 2644. DOI: 10.3390/app12052644.

32. Zakharikhina L., Lesnikova P., Rogozhina E., Kerimzade V., Gorbunova D. Influence of wind direction on the elemental composition of atmospheric deposition on the Black Sea coast of Sochi, Russia. Environment and Ecology Research. 2024. Vol. 12. Issue 5. pp. 514–536. DOI: 10.13189/eer.2024.120505.

33. Zhu W., Biondi E., Li J. et al. Seismic arrival-time picking on distributed acoustic sensing data using semi-supervised learning. Nature Communications. 2023. Vol. 14. Art. No. 8192. DOI: 10.1038/s41467-023-43355-3.