



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. 2024. Т. 24, вып. 4. С. 259–268

*Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences*, 2024, vol. 24, iss. 4, pp. 259–268

<https://geo.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1819-7663-2024-24-4-259-268>, EDN: SEEUUV

Научная статья

УДК 551.435.627:528.94:004.942



## Применение математико-картографического моделирования для комплексной оценки оползневой опасности методом анализа иерархий на территории г. Саратова

В. А. Данилов, В. А. Морозова<sup>✉</sup>, Д. С. Моисеев

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

Данилов Владимир Анатольевич, кандидат географических наук, доцент кафедры геоморфологии и геоэкологии, [kohavi@yandex.ru](mailto:kohavi@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-6971-9860>

Морозова Валерия Андреевна, старший преподаватель кафедры геоморфологии и геоэкологии, [riukarin@gmail.com](mailto:riukarin@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-5768-1201>

Моисеев Денис Сергеевич, лаборант учебной лаборатории геоинформатики и тематического картографирования, [dan.moiseeff2016@yandex.ru](mailto:dan.moiseeff2016@yandex.ru), <https://orcid.org/0009-0007-8383-5239>

**Аннотация.** Город Саратов подвержен оползневым процессам, которые занимают значительную часть его территории. Антропогенные факторы, такие как нерациональное использование земель, усиливают активизацию оползания территории. В статье рассматриваются природные факторы как совокупность, влияющая на формирование оползней на территории г. Саратова и проводится их оценка. Применение метода анализа иерархий (Analytic Hierarchy Process – АНП) в сочетании с технологиями ГИС позволило выявить корреляционные зависимости между природными и антропогенными факторами, влияющими на возникновение и активизацию оползней. Весовые коэффициенты факторов риска помогли оценить уязвимость различных участков города. Одним из основных методов исследования стало использование статистических алгоритмов и методов математико-картографического моделирования для создания интегральной карты устойчивости территории к оползневым процессам. Полученные данные важны для планирования городских территорий и разработки мер по предотвращению оползней. Созданная база данных может быть использована для систематического мониторинга и накопления данных об экзогенных процессах.

**Ключевые слова:** оползни, оползневые процессы, мониторинг, оползнеобразующие факторы, уязвимость территории, оценка риска, г. Саратов, метод анализа иерархий

**Благодарности.** Исследование выполнено при участии С. Г. Филипповой выпускницы кафедры геоморфологии и геоэкологии, магистрантки направления 05.04.06 Экология и природопользование, за что авторы приносят ей благодарность.

**Для цитирования:** Данилов В. А., Морозова В. А., Моисеев Д. С. Применение математико-картографического моделирования для комплексной оценки оползневой опасности методом анализа иерархий на территории г. Саратова // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. 2024. Т. 24, вып. 4. С. 259–268. <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2024-24-4-259-268>, EDN: SEEUUV

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

**Application of Mathematical-Cartographic Modeling for comprehensive landslide hazard assessment using the Analytic Hierarchy Process in the territory of the city of Saratov**

V. A. Danilov, V. A. Morozova<sup>✉</sup>, D. S. Moiseev

Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

Vladimir A. Danilov, [kohavi@yandex.ru](mailto:kohavi@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-6971-9860>

Valeria A. Morozova, [riukarin@gmail.com](mailto:riukarin@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-5768-1201>

Denis S. Moiseev, [dan.moiseeff2016@yandex.ru](mailto:dan.moiseeff2016@yandex.ru), <https://orcid.org/0009-0007-8383-5239>

**Abstract.** The city of Saratov is subject to landslide processes, which occupy a significant part of its territory. Anthropogenic factors, such as irrational use of land, increase the activation of landslide of the territory. The article considers natural factors as an aggregate influencing landslide formation on the territory of Saratov city and evaluates them. Application of Analytic Hierarchy Process (AHP) method in combination with GIS technologies allowed to reveal correlation dependencies between natural and anthropogenic factors influencing the occurrence and activation of landslides. Weighting coefficients of risk factors helped to assess the vulnerability of different parts of the city. One of the main research methods was the use of statistical algorithms and methods of mathematical and cartographic modeling to create an integral map of the territory's resistance



to landslide processes. The obtained data are important for planning of urban areas and development of landslide prevention measures. The created database can be used for systematic monitoring and accumulation of data on exogenous processes.

**Keywords:** landslides, landslide processes, monitoring, landslide-forming factors, vulnerability of the territory, risk assessment, Saratov, Analytic Hierarchy Process

**Acknowledgements:** The research was conducted with the assistance of Svetlana G. Filippova, graduate of the Department of Geomorphology and Geoecology, master's student in the field of 05.04.06 Ecology and Environmental Management, who contributed scientifically to the research topic.

**For citation:** Danilov V. A., Morozova V. A., Moiseev D. S. Application of Mathematical-Cartographic Modeling for comprehensive landslide hazard assessment using the Analytic Hierarchy Process in the territory of the city of Saratov. *Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences*, 2024, vol. 24, iss. 4, pp. 259–268 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2024-24-4-259-268>, EDN: SEEUUV

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

## Постановка проблемы

Оползневые процессы, представляющие собой смещение масс горных пород по склону, наряду с другими экзогенными процессами, широко распространены по всему миру. Последствия таких процессов представляют серьезную угрозу для жизнедеятельности человека, вызывая разрушение рельефа, уничтожение сельскохозяйственных угодий и нарушая устойчивость инженерных сооружений, таких как здания, дороги, трубопроводы и пр. В конечном итоге активизация оползневых процессов влечет за собой значительный финансовый ущерб и в некоторых случаях уносит человеческие жизни [1]. Очевидно, что постоянный мониторинг опасных для жизнедеятельности человека процессов крайне важен. В рамках мониторинга выделяют ряд алгоритмов, направленных на полноценный анализ территории, выявление уязвимых участков, где возможны оползневые процессы, а также своевременный прогноз.

## Обзор исследований

На территории г. Саратова оползневые процессы занимают одно из ключевых мест среди прочих экзогенных процессов, они являются опасными и интенсивными по площади распространения. Гидрогеологическая обусловленность этих процессов является важным фактором их возникновения. Если водопроницаемые породы подстилаются горизонтом водоупорных пород, чаще всего глин, существует высокая вероятность образования оползней. Кроме того, залегание пород, при котором падение кровли водоупорных слоев совпадает с направлением уклона поверхности, значительно увеличивает риск оползневых процессов. В таких условиях водоупорный горизонт становится поверхностью скольжения, по которой значительный блок породы может соскальзывать вниз по склону. При этом порода может частично дробиться, превращаясь в бесструктурную массу [1]. Так как образованию оползней способствует сочетание природных, антропогенных факторов, важным моментом при изучении оползневых участков, является выявление и категоризация всех фак-

торов воздействия, исследование их динамики и возможный прогноз оползания.

Исследованиям оползневых процессов на территории г. Саратова посвящено множество работ, в том числе работы А. В. Цыганкова, С. К. Горелова, А. В. Вострякова, значительный вклад в изучение оползней внесены и саратовскими учеными: А. В. Ивановым, В. Б. Сельцером, Г. И. Лотоцким, В. А. Даниловым, А. В. Федоровым и др. [2–9].

На территории г. Саратова можно выделить следующие зоны, подверженные оползневому процессам: Соколовогорская, Лысогорская и Увекская. Каждая из этих зон характеризуется своим уникальным набором факторов риска, таких как особенности геологического строения (водоупорные и водоносные слои), крутизна склонов и другие [8].

## Методы исследования

В исследованиях, связанных с картометрическим и морфометрическим анализом оползневой опасности и риска, существует множество методов, направленных на выявление уязвимых территорий, подверженных воздействию оползней. Эти методы варьируются от анализа облаков точек и создания светотеневых моделей рельефа до более сложных математических и статистических подходов, таких как модели соотношения частот и энтропии (Frequency Ratio) и метод анализа иерархий (Analytic Hierarchy Process (АНП)) [10–13].

В данном исследовании основной акцент сделан на применении математико-картографической модели, которая позволяет проводить комплексную оценку территории и выявлять потенциально опасные участки на основе общих условий формирования. Особенность такой модели заключается не только в выявлении и подтверждении уже утвержденных участков с оползневыми процессами, но и в прогнозировании потенциально опасных зон.

В качестве программного обеспечения была использована QGIS 3.24, а главным методом анализа был выбран метод АНП.

Для оценки оползневой опасности на любой выбранной территории необходимо выявить при-



чины формирования опасного процесса, который предстоит прогнозировать. В случае оползней основными факторами их формирования являются геологические, метеорологические и, безусловно, антропогенные, но стоит учитывать, что метод статистического анализа данных позволяет найти более неочевидные взаимосвязи между различными локальными факторами. На территории г. Саратова авторами были отобраны 11 экспериментальных факторов, которые так или иначе могут влиять на развитие оползневых процессов: уровень грунтовых вод, углы наклона территории, горизонтальное расчленение рельефа, экспозиция склонов, коэффициент кривизны поверхности, индекс пересечённости местности (TRI), расстояние до тальвежной сети и дорожной инфраструктуры, нормализованный вегетационный индекс (NDVI), топографический индекс влажности (TWI), а также генезис и свойства горных пород. В случае работ, направленных на применение метода АНР для оценки устойчивости территорий, в основном используются факторы абсолютной высоты, угла наклона, экспозиции склона, землепользования, расстояния до коммуникаций и рек, тип пород, уровень грунтовых вод [14, 15].

В предложенном перечне факторов оползнеобразования отсутствуют геологические параметры, такие как литология, стратиграфия горных пород и их механические свойства, которые оказывают существенное влияние на устойчивость склонов. Подобные изыскания предполагают полевые работы и несомненно повысят качество модели. Однако цель настоящего исследования – в апробации камерального подхода с использованием математического аппарата для предварительной оценки оползневой опасности территории.

Для каждого фактора оползнеобразования была построена своя картографическая модель, где каждому пикселю присвоено значение фактора для последующего сравнения. Стоит учесть, что в данном виде сравнивать такие модели не представляется возможным, они требуют масштабирования признаков. Для этого модели были переклассифицированы на 5 классов по уровню опасности (очень низкий (1), низкий (2), умеренный (3), высокий (4), очень высокий (5)).

Поверхностная кривизна определялась на основе цифровой модели рельефа (ЦМР). Склоны классифицированы на вогнутые (от -0,0246 до 0), плоские (0) и выпуклые (от 0,0246). Вогнутые склоны (класс опасности 3) более подвержены оползням из-за накопления влаги. Выпуклые (класс 5) считаются основным рисковым фактором на территории. Плоские склоны относятся к устойчивым (класс 1). Для углов наклона выделены диапазоны: менее 5° (очень низкий риск), 5°-10° (низкий), 10°-15° (умеренный), 15°-20° (высокий), более 20° (очень

высокий). Вероятность оползней значительно возрастает с увеличением крутизны склона (рис. 1, а).

Данная классификация выявлена эмпирическим путем, на основании существующих оползневых тел, а также на основе работ, изучающих влияние данного фактора на развитие опасных процессов [14, 15].

Уровень грунтовых вод в исследуемой области варьирует от менее 2 м (что указывает на очень высокий риск) до более 10 м (очень низкий риск). Данная классификация основана на том, что чем ближе грунтовые воды к поверхности, тем более высока вероятность их выхода на поверхность, в особенности при воздействии сторонних факторов.

Стоит отметить, что оползни часто наблюдаются в зонах с близким залеганием грунтовых вод, например в г. Саратове у поселков Семхоз и Завокзальный. Что касается оценки евклидовых расстояний до тальвегов и дорожной сети, классификация была проведена по принципу: участки, находящиеся на расстоянии менее 300 м, относятся к зонам очень высокого риска, тогда как расстояния более 1200 м характеризуются очень низким риском возникновения оползней, что основано на близости этих объектов (рис. 1, б). Оползневой риск может возникать в силу ряда антропогенных причин: движение транспорта создает вибрации и динамические нагрузки, которые могут ослабить устойчивость склонов. При строительстве дорог часто подрезают склоны, что может нарушить их устойчивость.

Горизонтальное расчленение местности оказывает влияние на плотность эрозионной сети. Значения менее 0,1 км/км<sup>2</sup> указывают на очень низкий риск, тогда как значения более 0,8 км/км<sup>2</sup> связаны с очень высоким риском оползней. Экспозиция склонов также играет важную роль: склоны, ориентированные на юг и юго-запад, классифицируются как зоны очень высокого риска. Это связано с интенсивностью солнечного излучения: склоны, обращенные на юг и юго-запад, получают больше солнечного света, что может привести к высыханию и растрескиванию грунта.

На таких склонах снег тает быстрее, что может вызвать переувлажнение грунта весной. Южные и юго-западные склоны могут быть более подвержены воздействию ветров, что также способствует эрозии и ослаблению грунта.

Индексы пересечённости местности (TRI) и влажности (TWI) косвенно, но могут иметь влияние на оползнеобразование. Большая пересечённость и влажность указывают на высокий риск (рис. 2).

Растительность оценивалась на базе индекса NDVI: низкое значение и редкая растительность – высокий риск, плотная – низкий.

Очевидно, что активизации оползней способствует одновременное воздействие как рас-

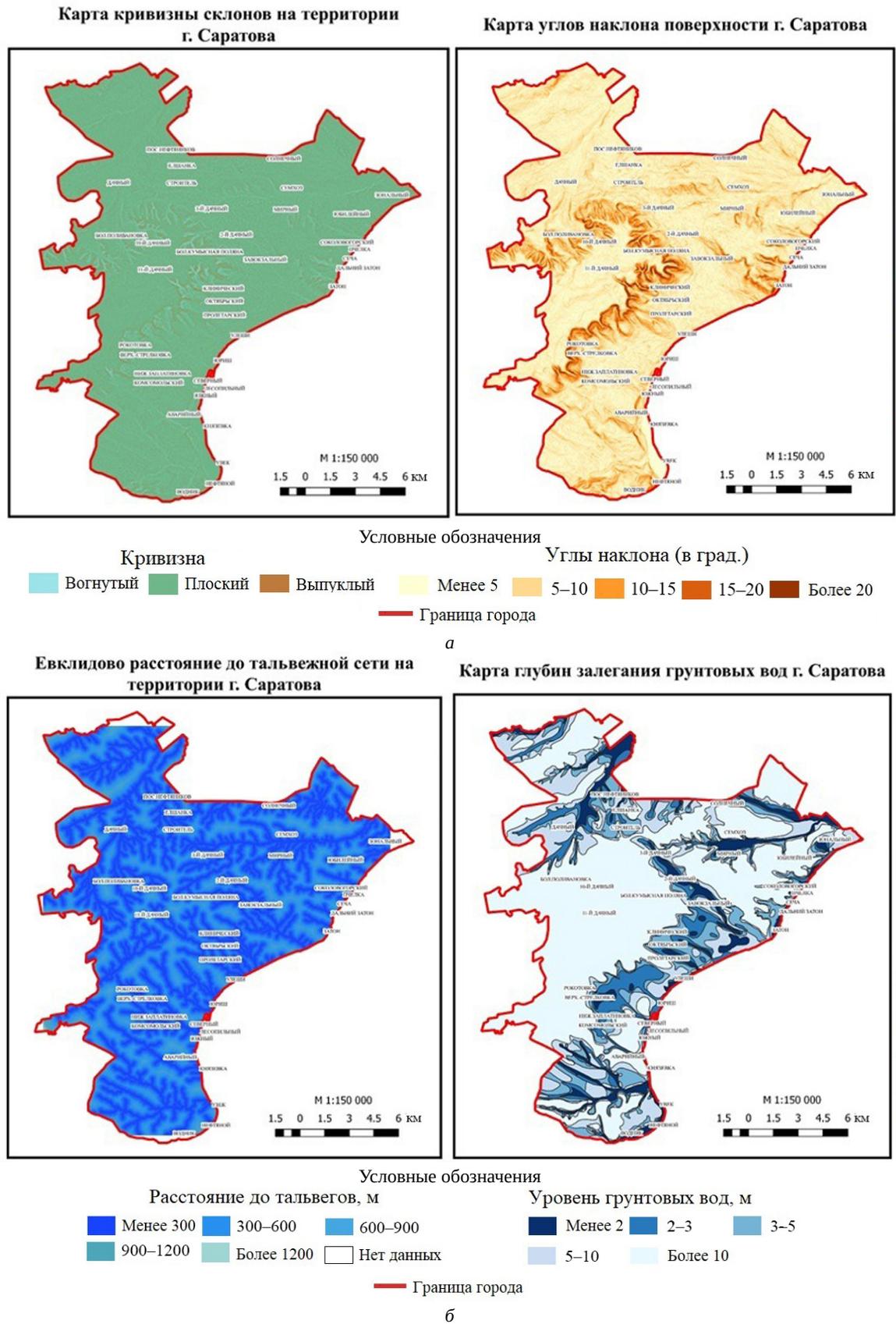


Рис. 1. Пример карт-факторов оползнеопасности на основе кривизны склонов и углов наклона (а) и на основе евклидова расстояния до тальвежной сети и залегания грунтовых вод (б) (цвет онлайн)

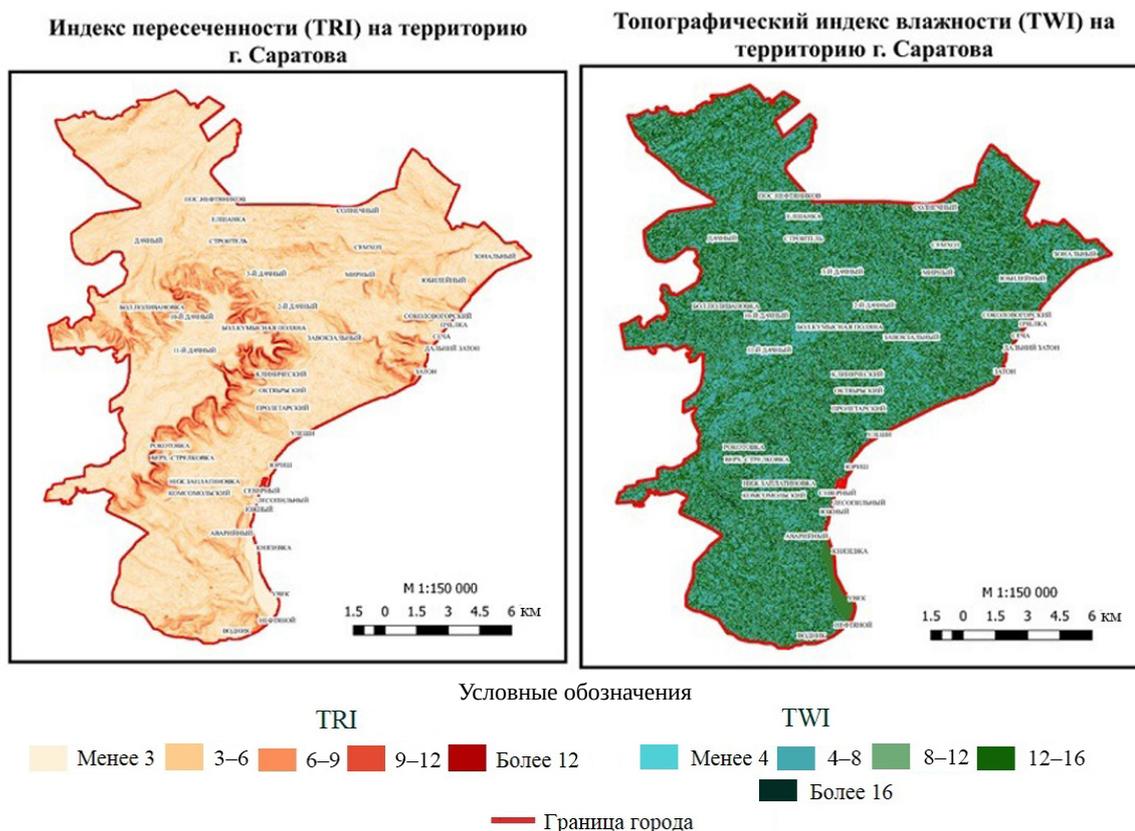


Рис. 2. Пример карт-факторов оползнеопасности на основе метода TRI и TWI (цвет онлайн)

смагиваемых, так и прочих природных и антропогенных факторов. Например, возникновение оползневых процессов в местах с крутыми склонами, рыхлыми почвами или насыщенными водой породами будет более вероятно, чем в местах, где присутствует лишь один из факторов. В определённых зонах, где присутствуют водопорные слои, вероятность скольжения пород значительно выше, степень эрозии имеет другую направленность, которая может ослабить устойчивость склонов.

После построения всех моделей факторов необходимо приведение их к общему знаменателю – проведение классификации. Важным этапом методики является вычленение коэффициентов веса для каждого фактора. Очевидно, что для формирования оползня нужна определенная комбинация факторов и каждый фактор имеет свой вклад (вес) для процесса и он не равнозначен.

Для корректности сравнения моделей строится матрица парных коэффициентов корреляции на основе методики АНР. Этот метод, разработанный Т. Саати в 1980 г. [10], позволяет систематически сравнивать факторы, влияющие на оползнеобразование, попарно, присваивая каждому из них весовое значение. Каждый фактор оценивается по степени важности относительно других на основе фундаментальной

числовой шкалы Саати [10]. Полученная матрица является основой для последующих расчетов при моделировании.

Несмотря на то, что методика АНР является математическим методом поддержки принятия решений, позволяющим структурировать сложные проблемы и оценивать альтернативы по нескольким критериям, она уже успешно апробирована для оценки естественных процессов и их прогноза как в России, так и за рубежом [15–20].

#### Выбор факторов и их взаимосвязь

Необходимость включения большого числа факторов оценки обусловлена их влиянием на различные аспекты оползнеобразования. Важно отметить, что некоторые факторы могут демонстрировать сильную корреляцию между собой, поэтому в процессе анализа можно редуцировать некоторые в силу равнозначности. Например, топографический индекс влажности (TWI) и нормализованный вегетационный индекс (NDVI) могут отражать связанные процессы (наличие растительности и степень насыщенности почвы влагой). Однако в зависимости от конкретных условий рельефа и климата их влияние может различаться.



### Алгоритм расчета весов факторов

1. *Построение матрицы пофакторного сравнения.* Каждый фактор в матрице сравнивался попарно с другими, и значения отражали относительную важность одного фактора по сравнению с другим.

2. *Суммирование значений по строкам.* Для каждого фактора вычислялась сумма всех значений в строке. Это промежуточное значение использовалось для дальнейших расчетов весов.

3. *Нормализация.* Для получения окончательного веса фактора сумма по строке делилась на общее количество факторов.

4. *Формула для расчета веса каждого фактора ( $W_i$ )* имеет вид:

$$W_i = \frac{\sum n_j \cdot A_{ij}}{n}, \quad (1)$$

где  $A_{ij}$  – значение матрицы пофакторного сравнения для факторов  $i$  и  $j$ ,  $n$  – общее количество факторов.

5. *Верификация данных модели.* Для верификации модели был вычислен средний вектор меры непротиворечивости ( $\lambda$ ):

$$\lambda = \frac{\text{Соотношение факторов}}{\text{Количество факторов}}. \quad (2)$$

После расчета стандартных весов согласованность проверяется путем расчета коэффициента окончательной непротиворечивости (CR). Для этого определяется индекс непротиворечивости (CL) с помощью формулы

$$CL = \frac{\lambda - n}{n - 1}, \quad (3)$$

где  $\lambda$  – средний вектор меры непротиворечивости,  $n$  – число критериев.

Коэффициент окончательной непротиворечивости вычисляется путем деления CL на RI:

$$CR = \frac{CL}{RI}, \quad (4)$$

где CL – индекс непротиворечивости, RI – индекс случайной величины.

Метод анализа иерархий позволяет получить весовые значения для каждого фактора, что значительно упрощает дальнейший процесс анализа и моделирования. Эти данные служат основой для последующего построения карт оползневой опасности, где каждый фактор может быть визуализирован и использован в пространственном анализе.

### Результаты и их обсуждение

Для оценки устойчивости территории к возникновению оползневых процессов была построена матрица пофакторного сравнения. В данной матрице (табл. 1) представлены 11 факторов, каждый из которых был оценен в зависимости от его значимости относительно других. Сравнение проводилось с использованием метода анализа иерархий (АНР), что позволило определить вес каждого фактора в зависимости от его вклада в общую модель.

Отбор факторов был основан на работах зарубежных ученых [14, 15, 20]. Методика не является заменой или полной альтернативой существующих полевых методов изучения оползней или факторов из действующих нормативных документов, таких, например, как СП 11-105-97, в которых учтены ключевые параметры: высота и форма склона, его экзодинамика и негативные процессы, строение и свойства грунта, а также влияние дополнительных нагрузок (наличие или отсутствие, планируемое воздействие). Данная методика является оценкой уязвимости или устойчивости любой территории к внешнему воздействию и служит частью рекогносцировочного предварительного анализа территории и мониторинга в целом.

В результате для каждого склона рассчитывалось среднее значение коэффициента устойчивости, что позволило обеспечить точную оценку потенциальной оползневой опасности (табл. 1).

Полученные значения необходимо сложить по строкам, записав в отдельный столбец, сложить каждое значение по строкам и разделить на общее количество факторов – это и будет являться весом каждого фактора.

Таблица 1

**Пример расчета по матрице пофакторного сравнения факторов оползнеобразования**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0,07	0,08	0,05	0,06	0,07	0,09	0,11	0,16	0,10	0,10	0,11
2	0,22	0,26	0,28	0,34	0,26	0,23	0,21	0,23	0,16	0,17	0,14
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
11	0,02	0,04	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,05	0,05

Примечание. Факторы: 1 – кривизна, 2 – углы наклона, 3 – экспозиция, 4 – грунтовые воды, 5 – горизонтальное расчленение, 6 – евклидово расстояние до тальвежной сети, 7 – евклидово расстояние до дорожной сети, 8 – индекс пересеченности местности (TRI), 9 – топографический индекс влажности (TWI), 10 – нормализованный вегетационный индекс (NDVI), 11 – генезис почвообразующих пород.



**Анализ весов факторов**

После проведения расчета по матрице сравнений каждому фактору были присвоены веса, отражающие их значимость в процессе оползнеобразования. Наибольшие значения получили такие факторы, как углы наклона (0,218), уровень грунтовых вод (0,172) и горизонтальное расчленение (0,157). Эти факторы критически влияют на устойчивость склонов и вероятность возникновения оползней, что подтверждается требованиями нормативных документов, таких как СП 11–105–97, где подробно рассматриваются параметры устойчивости склонов и их экодинамика.

Менее значимые факторы, такие как топографический индекс влажности (0,021) и генезис почвообразующих пород (0,015), имеют сравнительно небольшой вес, что может быть связано с их второстепенным влиянием на процессы оползнеобразования в конкретной географической зоне. Это подтверждает необходимость учета только наиболее значимых факторов при построении модели, поскольку избыточное включение менее значимых переменных может приводить к усложнению модели без заметного повышения её точности.

**Пример расчета**

Расчет веса для фактора 1 (кривизна).

Сумма по строке  $1 = 0,07 + 0,08 + 0,05 + 0,06 + 0,07 + 0,09 + 0,11 + 0,16 + 0,10 + 0,10 + 0,11 = 1$ .

Вес для фактора 1 (кривизна)  $= \frac{1}{11} \approx 0,09$ .

Аналогичный процесс был выполнен для всех прочих факторов. В результате анализа были определены зоны высокого, среднего и низкого уровня оползневой опасности, что позволило выявить критически важные участки территории г. Саратова.

Результаты расчетов показали, что наряду с такими значимыми факторами, как углы наклона, кривизна и экспозиция склонов, также необходимо учитывать характеристики грунтов, включая их влагоемкость, пористость и прочностные свойства, поскольку они оказывают непосредственное влияние на устойчивость склонов в целом.

Следующим этапом проводится вычисление среднего вектора меры непротиворечивости ( $\lambda$ )

для оценки модели:

$$\lambda = (13,33 + 12,91 + 13,09 + 13,18 + 12,93 + 13,80 + 13,00 + 12,71 + 12,00 + 11,00 + 18,00) / 11 = 13,27. \quad (5)$$

После расчета стандартных весов согласованность проверяется путем расчета коэффициента окончательной непротиворечивости (CR):

$$CL = \frac{13,27 - 11}{11 - 1} = 0,22, \quad (6)$$

где CL – индекс непротиворечивости;  $\lambda = 13,27$  – средний вектор меры непротиворечивости;  $n = 11$  – число критериев.

Коэффициент окончательной непротиворечивости вычисляется путем деления CL на RI:

$$CR = \frac{0,22}{1,51} = 0,14, \quad (7)$$

где CL – индекс непротиворечивости, RI – индекс случайной непротиворечивости, представленный в табл. 2.

**Верификация модели и оценка согласованности**

Для проверки надежности полученной модели был проведен расчет среднего вектора меры непротиворечивости ( $\lambda$ ), что позволило оценить степень согласованности матрицы сравнений. В нашем исследовании  $\lambda$  составил 13,07, что при расчете индекса согласованности (CL) привело к значению 0,006. Это значение находится в допустимых пределах, что подтверждается коэффициентом окончательной непротиворечивости (CR), который равен 0,004. Поскольку CR значительно ниже установленного порога в 0,10, можно заключить, что модель является надежной и не требует пересмотра матрицы пофакторных сравнений.

Важно отметить, что такой низкий коэффициент окончательной непротиворечивости свидетельствует о высоком уровне согласованности при ранжировании факторов. Это особенно важно в контексте моделирования сложных природных процессов, таких как оползнеобразование, где ошибки в оценке факторов могут привести к неправильной интерпретации результатов и, соответственно, к неточным прогнозам [17, 20, 21].

Указанные факторы оказались наиболее влиятельными при моделировании оползневой опасности. Полученная карта наглядно показала, что зоны с высоким и умеренным уровнем опасности

Таблица 2

**Индекс случайной непротиворечивости**

Размерность матрицы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Случайная согласованность	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51



занимают значительную часть территории г. Саратова. Наибольшие риски оползней отмечены в районах, прилегающих к долинам рек, таким как 2-я Гуселка, Елшанка и южнее р. Березина (рис. 3).

Методика, основанная на методе анализа иерархий, показала свою эффективность для оценки оползневой опасности на территории г. Саратова. Использование 11 факторов позволило комплексно оценить воздействие различных природных и антропогенных факторов на процессы оползнеобразования.

Итоговая карта подтвердила достоверность предложенной модели и позволила выявить новые потенциально опасные зоны, которые не были указаны на предыдущих картах. Это свидетельствует о том, что метод анализа иерархий (АНР) в сочетании с картографическим анализом способен эффективно выявлять потенциальные риски, даже в условиях недостатка данных или при наличии сложных рельефных и геологических характеристик.

С помощью интеграции метода анализа иерархий и пространственного анализа в ГИС-системах была построена детализированная карта оползневой опасности на территорию г. Саратова, представленная на (рис. 4). Эта карта позволяет визуализировать результаты модели-

рования и выделить зоны различной степени риска: от участков с низким уровнем оползневой опасности до критически опасных зон, где вероятность возникновения оползней особенно велика.

Одним из важнейших аспектов предложенной методики является ее адаптивность. Она может быть использована не только для оценки текущих рисков, но и для прогнозирования будущих изменений в условиях возможных климатических или антропогенных воздействий. Например, учитывая возможные изменения климата, такие как увеличение количества осадков или повышение уровня грунтовых вод, метод АНР можно дополнить новыми параметрами для учета динамических факторов, что позволит делать более точные прогнозы.

Интегральная карта предполагает, что будущие оползни будут происходить в схожих условиях, и её можно использовать для дальнейшего анализа и оценки территории. В районах с существующими оползнями уровень опасности высок, что подтверждает правдоподобность метода. Наибольший риск отмечен в районах пос. Мирный, в долинах рек 1-я и 2-я Гуселка, Березина, Елшанка и других.

Низкий риск наблюдается на Лысогорском плато, где отсутствуют критические уклоны

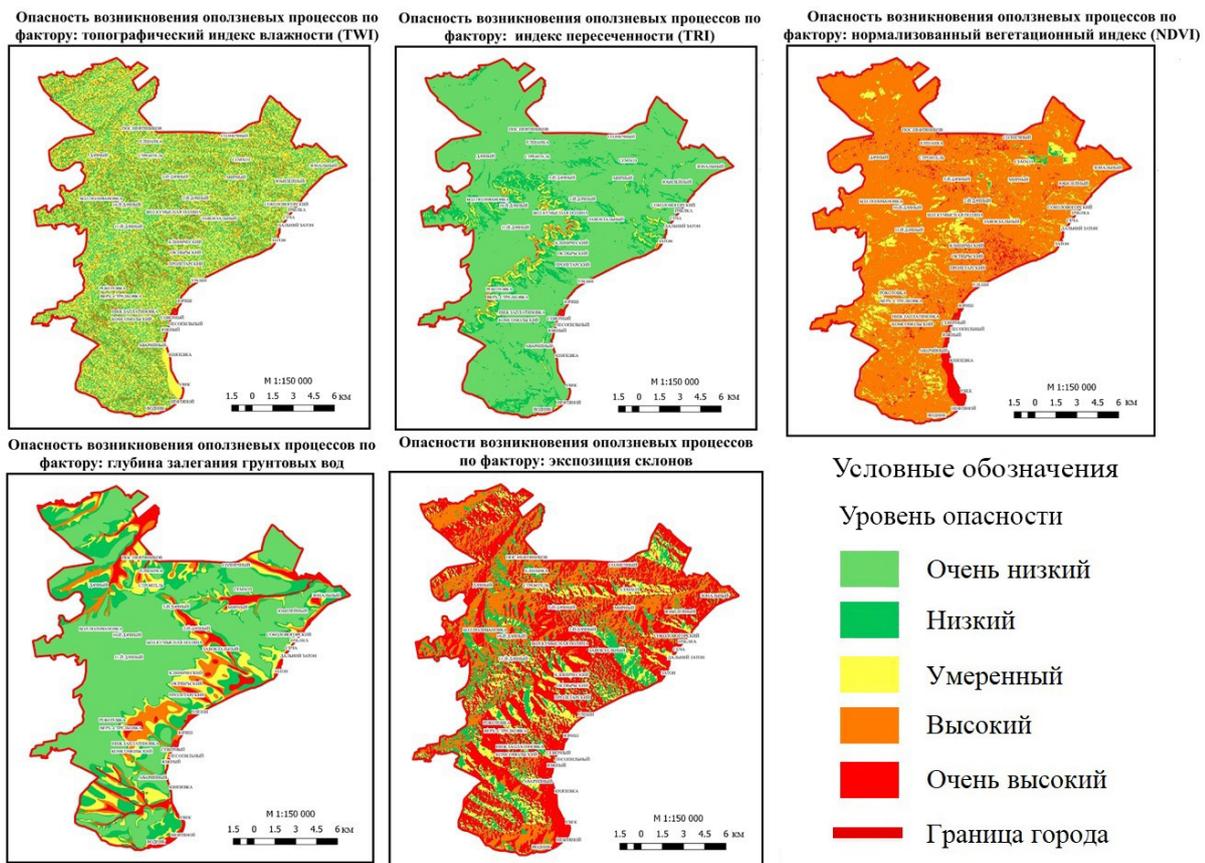


Рис. 3. Классификация опасности возникновения оползневых процессов по факторам (цвет онлайн)

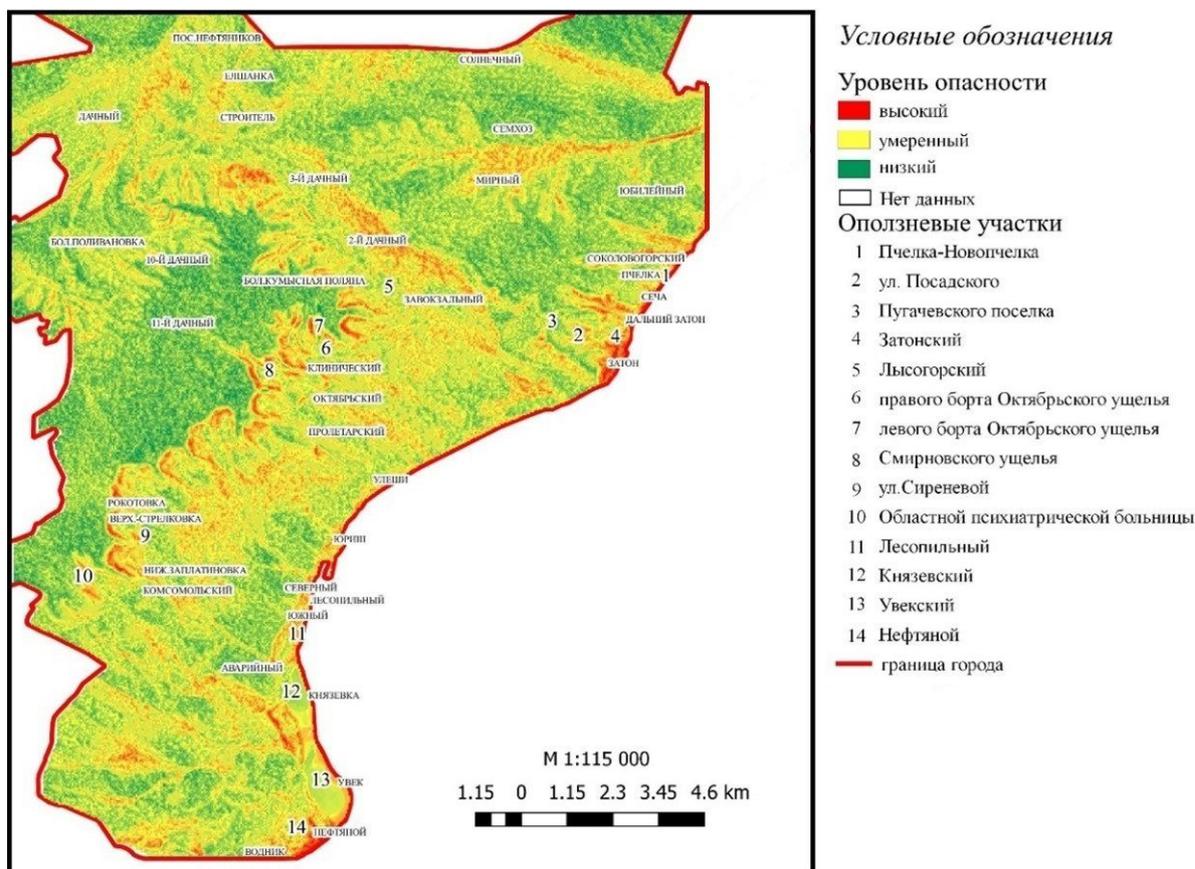


Рис. 5. Подверженность территории г. Саратова оползневой опасности (цвет онлайн)

рельефа. Однако древние оползни на уступе Лысогорского плато указывают на возможные скрытые риски. Сравнение с картой оползневого потенциала показывает совпадение с новыми опасными зонами, что делает карту важным инструментом для мониторинга и предотвращения ущерба.

Хотя метод анализа иерархий эффективен, он не гарантирует возникновение оползня при совпадении факторов, но указывает на высокую уязвимость территории и ее подверженность подобным экзогенным воздействиям. Недостатком метода остаётся субъективизм экспертных оценок, однако оценка противоречивости данных позволяет повысить доверие к результатам.

### Выводы

В результате проведенного исследования был создан ряд картографических моделей на территорию г. Саратова, сформирована геоинформационная база данных факторов, способствующих активизации оползней. Оценка уязвимости территории г. Саратова показала высокую степень оползнеопасности, особенно вблизи жилых и хозяйственных объектов, что подчеркивает важность постоянного мониторинга.

Построенные модели наглядно продемонстрировали существенное влияние выбранных показателей на территорию. Наибольшую площадь занимают зоны с высоким и умеренным уровнем опасности. Кроме того, выявлены новые потенциально опасные участки, например, у рек 2-я Гуселка и Елшанка, а также южнее р. Березина.

Метод анализа иерархий показал свою эффективность, позволив учесть сложные взаимодействия факторов, влияющих на оползни. Оценка противоречивости данных повысила достоверность результатов, что было подтверждено сопоставлением с имеющейся картой оползневого потенциала. Метод выявил как совпадающие, так и новые опасные зоны, что подчеркивает его применимость для мониторинга и анализа оползнеопасных процессов.

### Библиографический список

1. Леонтьев О. К., Рычагов Г. И. Общая геоморфология: учебное пособие для географических специальностей университетов. М. : Высшая школа, 1979. 287 с.
2. Данилов В. А., Федоров А. В., Морозова В. А. Комплексное применение технологии ГИС и наземного лазерного сканирования для исследования оползневых тел (на примере оползня в Октябрьском ущелье)



- г. Саратова) // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия : Науки о Земле. 2019. Т. 19, вып. 3. С. 160–167. <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2019-19-3-160-167>, EDN: QETNTY
3. *Безвершенко Л. Б., Данилов В. А., Федоров А. В.* Методика реконструкции палеорельефа Увекского массива в XIII веке с использованием ГИС-технологий // Современные проблемы территориального развития. Международный научно-практический журнал. 2018. № 3. EDN: XZTHBZ
  4. *Востряков А. В.* Неогеновые и четвертичные отложения, рельеф и неотектоника юго-востока Русской платформы. Саратов : Издательство Саратовского университета, 1967. 354 с.
  5. *Цыганков А. В.* Морфоструктура Нижнего Поволжья : автореф. дис. ... д-ра геогр. наук, 1967. 24 с.
  6. *Цыганков А. В.* Методика изучения неотектоники и морфоструктура Нижнего Поволжья (Труды НИПИнефть). Волгоград : Нижне-Волжское книжное издательство, 1971. 255 с.
  7. *Горелов С. К.* Геоморфология и новейшая тектоника Правобережья Нижней Волги // Труды Института географии АН СССР. 1957. Т. 73. 140 с.
  8. *Браташова С. А., Иванов А. В.* Оползневая опасность на юго-восточной окраине Саратова и полынни как ее вероятный индикатор // Недра Поволжья и Прикаспия. 2005. Вып. 44. С. 59–64.
  9. *Лотоцкий Г. И., Зайонц В. Н.* Опасные процессы современного геоморфогенеза в Саратовском Поволжье // Известия Саратовского университета. Серия : Науки о Земле. 2007. Т. 7, вып. 2. С. 14–16. <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2007-7-2-14-16>, EDN: KWJPNZ
  10. *Саати Т.* Принятие решений. Метод анализа иерархий. М. : Радио и связь, 1993. 278 с.
  11. Оценка оползневой опасности с использованием метода соотношения частот и комбинированного фрактально-частотного метода на примере города Тиньтук провинции Каобанг (Вьетнам). URL: [https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16283?setLocale=ru\\_RU](https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16283?setLocale=ru_RU) (дата обращения: 12.08.2024).
  12. *Бочков А. В., Жигирев Н. Н.* Развитие метода сравнения альтернатив при принятии решений в условиях неполной определенности экспертных предпочтений // Труды международной научной школы МАБР. СПб. : ГУАП, 2015. 304 с.
  13. *Баборыкин М. Ю., Жидиляева Е. В.* Мониторинг оползней с использованием лазерного сканирования и геодезических наблюдений // Журнал инженерных изысканий. 2014. № 3. С. 16–27. EDN: SJCTSN
  14. *Guo-liang D., Zhang Y., Yang Z., Changbao G.* Landslide susceptibility mapping in the region of eastern Himalayan syntaxis, Tibetan Plateau, China: A comparison between analytical hierarchy process information value and logistic regression-information value methods // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2018. Vol. 78, № 6. P. 4201–4215. <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1393-4>
  15. *Флорес Гарсия Й.* Оценка склоновых процессов кантона Каямбе провинции Пичинча (Эквадор) : магистерская диссертация под руководством д-ра геол.-минерал. наук. Л. А. Строковой. Томск, 2021. 106 с.
  16. *Павленко А. В., Ковалева Е. Г., Радоуцкий В. Ю.* Анализ подходов к оценке риска // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. 2015. № 3. С. 106–109. EDN: TQKQTT
  17. *Леонова А. В., Строкова Л. А., Никитенков А. Н.* Оценка оползневых процессов на территории г. Томска с использованием ГИС-технологий // Вестник Воронежского государственного университета. Серия : Геология. 2021. № 1. С. 94–103. <https://doi.org/10.17308/geology.2021.1/3341>
  18. *Зьонг В. Б., Фоменко И. К., Нгуен Ч. К., Ви Тхи Х. Л., Зеркаль О. В., Ву Х. Д.* Применение статистических методов на основе ГИС для оценки потенциального развития оползней в районе Шапа, Вьетнам // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333, вып. 4. С. 126–140. <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/4/3473>
  19. *Дай Ф. С., Ли К. Ф., Нгай Ю. Ю.* Оценка и управление рисками, связанными с оползнями // Инженерная геология. 2002. Т. 64, № 1. С. 65–87. [http://dx.doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00093-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00093-X)
  20. *Нгуен Ч. К., Фоменко И. К., Пендин В. В., Нгуен К. Т.* Применение метода анализа иерархий при региональной оценке оползневой опасности (на примере района Северо-Западный Лаокай, Вьетнам) // Геоинформатика. 2017. № 2. С. 53–66.
  21. *Кузьмин В. В., Тимофеева Е. А., Чуносков Д. В.* Оценка риска для территории г. Саратова вследствие проявления оползневых процессов // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. 2010. № 2. С. 23–27. EDN: KZVIFZ

Поступила в редакцию 16.08.2024; одобрена после рецензирования 21.09.2024; принята к публикации 27.09.2024; опубликована 29.11.2024

The article was submitted 16.08.2024; approved after reviewing 21.09.2024; accepted for publication 27.09.2024; published 29.11.2024