

ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОПОЛЗНЕВОЙ ОПАСНОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ ПРИМОРСКОГО КРАЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Степнова Ю.А., Коновалов А.В., Шевырев С.Л.

ФГБУН Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, г. Владивосток

Аннотация. Урбанизация сопровождается освоением инженерно-неблагоприятных территорий, что в сочетании с изменением климата ведет к активизации опасных экзогенных геодинамических процессов (ОЭГП). В работе представлены результаты выполненной в 2025 году оценки оползневой опасности для юга Приморского края (г. Владивосток и прилегающие муниципальные районы). База данных ОЭГП сформирована по результатам полевых обследований, анализа научной литературы, а также на основе краудсорсинга — откликов населения и публикаций в СМИ и мессенджерах, дополненных данными дистанционного зондирования. С использованием метода логистической регрессии построена прогнозная модель активизации оползней, вызванных атмосферными осадками. Сбалансированная точность модели (~80%) позволяет рассматривать её как перспективный инструмент для систем раннего предупреждения и планирования градостроительной деятельности в регионе и строительства ответственных объектов с учетом риска проявления оползневых процессов, обусловленных осадками. Полученные результаты играют также важную роль в разработке стратегии смягчения риска для Приморского края и других субъектов Российской Федерации, подверженных оползневым явлениям.

Ключевые слова: *оползни, урбанизация, краудсорсинг, логистическая регрессия, геоинформатика, Приморский край*

ML-BASED ASSESSMENT AND PREDICTION OF LANDSLIDE HAZARD IN PRIMORSKY KRAI

Stepnova Y.A., Kononov A.V., Shevyrev S.L.

Far East Geological Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok

Annotation. Urbanization involves the development of areas with unfavorable engineering-geological conditions, which, combined with climate change, leads to the activation of hazardous exogenous geodynamic processes. This paper presents the results of a landslide hazard assessment for the southern part of Primorsky Krai (Vladivostok and adjacent municipal districts). A database of hazardous exogenous geodynamic processes events was compiled using field surveys, analysis of scientific literature, and crowdsourcing methods — including public reports and publications in mass media and messengers, supplemented by remote sensing data. A predictive model for rainfall-induced landslide activation was developed using logistic regression. The balanced accuracy of the model (~80%) suggests its potential applicability for early warning systems and urban planning purposes in the region. The obtained results can be used for urban development planning and construction of critical infrastructure considering the risk of rainfall-induced landslides. These findings also play an important role in developing risk mitigation strategies for Primorsky Krai and other regions of the Russian Federation susceptible to landslide processes.

Keywords: *landslides, urbanization, crowdsourcing, logistic regression, GIS, Primorsky Krai*

Введение. Активное строительство на юге Дальнего Востока России, в том числе на инженерно-неблагоприятных участках (оползнеопасных склонах, затапливаемых территориях), повышает риски возникновения чрезвычайных ситуаций природно-антропогенного характера. Проблема усугубляется глобальным изменением климата и развитием техногенно-природных процессов, что требует разработки современных методов оценки и прогноза опасных экзогенно-геодинамических процессов (ОЭГП).

Целью работы являлось создание прогностических моделей активизации оползней и селей на юге Приморья под влиянием природно-климатических факторов. Исследование опиралось на сбор и анализ данных об ОЭГП на основе полевых наблюдений, дешифрирования спутниковых изображений, опубликованной литературы и краудсорсинговых источников (социальные сети, мессенджеры, СМИ). Дополнительно использовались архивные материалы и космические снимки (сервис Google Карт). На этой основе сформирована база данных, включающая более 150 случаев проявления ОЭГП.

Существующая климатическая модель [1] предсказывает увеличение количества осадков в последующие годы. Она учитывает мезомасштабную влажностную конвергенцию, которая считается ключевым фактором формирования экстремальных осадков [1]. Согласно этой модели, объем выпавших осадков к 2100 г. вырастет на 41%. В этой связи интенсификация осадков может повлечь за собой увеличение количества случаев ОЭГП и связанного с ними ущерба. Поэтому разработка прогностической модели для оценки потенциально угрожаемых территорий Приморского края в условиях изменения климата является актуальной задачей.

В соответствии с принятой моделью [1], превышение объемом выпавших осадков сорбционной способности почвы приводит к формированию поверхностного стока. Сток может явиться фактором, способным спровоцировать движение грунтовых масс в виде селей и/или поверхностных оползней.

Существуют также оползни более глубокого залегания, когда вода, проникая в трещины и поры, увеличивает гидростатическое давление, что приводит к снижению прочности грунта и ослаблению удерживающих сил. Это приводит к сдвигам вдоль поверхности скольжения и перемещению оползневого тела.

В Приморском крае чаще всего происходят оползни и сели, обусловленные поверхностным стоком. Однако не исключены оползни, связанные с формированием более глубоких границ скольжения.

Существует несколько видов прогноза и соответствующих предикативных моделей ОЭГП. Первый вид прогноза является оперативным. Он основан на данных об осадках и других природно-климатических факторах [6, 7, 8, 11]. Большинство предикативных моделей носит вероятностный характер – они отражают вероятность возникновения ОЭГП в зависимости от уровня осадков. Некоторые модели разработаны с помощью методов машинного обучения. Они прогнозируют исход в зависимости от внешних факторов (количество осадков, угол склона и т.д.). Инструменты логистической регрессии, в том числе метод максимальной энтропии (MaxtEnt), можно рассматривать в качестве базовых алгоритмов машинного обучения (ML-алгоритмов). При этом логистическая регрессия предсказывает не само событие, а вероятность его наступления. Верификация результата применения вероятностных методов с помощью контрольного набора данных позволяет оценить эффективность модели и получить сбалансированную оценку ситуации.

Можно констатировать, что инструменты логистической регрессии успешно применяются во всем мире в задачах оперативного прогнозирования опасных оползневых процессов (например, [5, 9]). Впервые этот подход использовался для разработки предикативной модели активизации массовых селевых и оползневых процессов на территории Приморья по данным метеорологической станции в г. Владивосток [14]. Было получено

уравнение бинарного классификатора, различающего оползневые и не оползневые случаи в зависимости от количества выпавших осадков:

$$DR+0.271*AR+0.042*CP\geq 122, \quad (1)$$

где DR – количество суточных осадков, мм (Daily rainfall), AR – значение предшествующих осадков, мм (Antecedent rainfall), CP – кумулятивное значение осадков с начала года, мм (Cumulative precipitation).

Если сумма параметров, полученных по метеорологическим данным в левой части уравнения (1), больше 122 мм, то экспонированный склон, согласно разработанной предикативной региональной модели, рассматривается как неустойчивый.

Для оценки производительности модели (1) использовался архив исторических метеорологических данных для г. Владивосток с 1 января 1914 года по 1 апреля 2020 года. На рис. 1 показана корреляционная матрица для рассматриваемых переменных (метеорологические предикторы и оползневые явления). Из представленного рисунка прослеживается корреляция между суточным уровнем осадков и оползневыми случаями.



Рис. 1. Корреляционная матрица для данных по осадкам г. Владивосток.

Высокая сбалансированная точность бинарного классификатора (около 80%) свидетельствует о перспективности практического применения предикативной модели в системах раннего предупреждения чрезвычайных ситуаций.

Второй вид прогноза является долгосрочным. Он призван выявить участки, восприимчивые к климатическим и природным факторам, способным в принципе вызвать ОЭГП. Картирование опасности основывается как на качественных, так и количественных оценках. Качественные карты основаны на экспертных знаниях, сравнительных оценках и т.д., тогда как количественные модели используют инструменты статистического анализа данных.

Особенно популярными являются карты обобщенной восприимчивости (susceptibility), которые характеризуют оползневой потенциал склоновых участков (например, [4, 13, 16]). В этом направлении востребованы модели, полученные путем машинного обучения на основе датасетов, содержащих релевантные оползневому процессу предикторы в регионе исследований (например, [2, 15]). Разработанные вероятностные логит-модели используются для составления карт оползневой опасности некоторых стран (например, [10]), что говорит об апробации данного метода машинного обучения в задачах долгосрочного прогнозирования и картирования оползневой опасности. Для эффективной работы логит-моделей достаточно относительно небольшое количество известных оползневых случаев. Поэтому данный подход является вполне перспективным для Приморского края.

Заключение

Полученные результаты обзора и анализа научно-технической литературы показывают, что инструменты логистической регрессии являются базовыми алгоритмами для построения предикативных моделей Приморского края как для целей оперативного прогноза, так и выявления потенциальных оползневых участков.

Результаты могут быть использованы для планирования градостроительства с учетом оползневых рисков, а также для интеграции в системы раннего предупреждения чрезвычайных ситуаций Приморского края и других регионов РФ.

Благодарность. Работа выполнена по теме НИР ФГБУН ДВГИ ДВО РАН: «Трансформация природной среды и опасные геологические процессы окраинно-континентальных территорий востока Евразии в условиях изменения климата и антропогенной нагрузки».

Литература

1. Chang P., Fu D., Liu X. et al. Future extreme precipitation amplified by intensified mesoscale moisture convergence // Nat. Geosci. 2025. <https://doi.org/10.1038/s41561-025-01859-1>
2. Chiang J-L, Kuo C-M, Fazeldehkordi L. Using Deep Learning to Formulate the Landslide Rainfall Threshold of the Potential Large-Scale Landslide // Water. 2022. 14(20):3320. <https://doi.org/10.3390/w14203320>
3. Crozier M.J. Prediction of rainfall-triggered landslides: a test of the antecedent water status model // Earth Surface Processes and Landforms. 1999. 24(9), 825–833. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1096-9837\(199908\)24:9%3c825::aid-esp14%3e3.0.co;2-m](https://doi.org/10.1002/(sici)1096-9837(199908)24:9%3c825::aid-esp14%3e3.0.co;2-m)
4. Ebrahim K.M.P., Goma S.M.M.H., Zayed T. et al. Rainfall-induced landslide prediction models, part ii: deterministic physical and phenomenologically models // Bull Eng Geol Environ. 2024. 83, 85. <https://doi.org/10.1007/s10064-024-03563-7>
5. Hong M., Kim J., Jeong S. Rainfall intensity-duration thresholds for landslide prediction in South Korea by considering the effects of antecedent rainfall // Landslides. 2018. 15(3), 523–534. <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0892-x>
6. Jemec Auflič M., Šinigoj J., Krivic M., Podboj M., Peternel T., Komac M. Landslide prediction System for rainfall induced landslides in Slovenia (Masprem) // Geologija. 2016. 59(2), 259–271. <https://doi.org/10.5474/geologija.2016.016>
7. Kang J., Wan B., Gao Z. et al. Research on machine learning forecasting and early warning model for rainfall-induced landslides in Yunnan province // Sci Rep. 2024. 14, 14049. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-64679-0>
8. Kuradusenge M. Dissertation entitled «Predictive modelling and alert system for rainfall induced landslides», University of Rwanda (College of science and Technology), June /2022

9. Kuradusenge M., Kumaran, S., Zennaro, M. Rainfall- induced landslide prediction using machine learning models: the case of Ngororero district, Rwanda // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020. 17(11), 4147. <https://doi.org/10.3390/ijerph17114147>
10. Lin Q., Lima P., Steger S., Glade T., Jiang T., Zhang J., Liu T., Wang Y. National-scale data-driven rainfall induced landslide susceptibility mapping for China by accounting for incomplete landslide data // *Geoscience Frontiers*. 2021. Vol. 12, Iss. 6, 101248, ISSN 1674-9871. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101248>
11. Liu G., Liu D., Li T., Wang F., Zou T. Joint Probability Prediction Model of Rainfall Triggered Landslides and Debris Flows // *Open Journal of Geology*. 2012. 2, 103-110. <https://doi.org/10.4236/ojg.2012.22011>.
12. Liu X., Miao C. Large-scale assessment of landslide hazard, vulnerability and risk in China // *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 2018. 9. 1037-1052.
13. Oliveira S.C., Zêzere J.L., Garcia R.A.C. et al. Landslide susceptibility assessment using different rainfall event-based landslide inventories: advantages and limitations // *Nat Hazards*. 2024. 120, 9361–9399. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06691-1>
14. Stepnova Y.A., Stepnov A.A., Konovalov A.V. et al. Predictive Model of Rainfall-Induced Landslides in High-Density Urban Areas of the South Primorsky Region (Russia) // *Pure Appl. Geophys*. 2022. 179, 4013–4024. <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02822-y>
15. Tang T. et al. 2021 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 643 012137
16. Wang C., Zhou J., Wang Z. et al. Assessment of landslide susceptibility in watersheds during extreme rainfall using a complex network of slope units // *Sci Rep*. 2025. 15, 5194. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-89039-4>