

А. К. Канасов¹✉

Геоморфометрический анализ склонов лавиноопасных участков Восточно-Казахстанской области с помощью цифровых моделей

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: azamat040594@mail.ru

Аннотация. В статье исследуются особенности выполнения геоморфометрического анализа склонов лавиноопасных участков Восточно-Казахстанской области с использованием цифровых моделей рельефа. Рассмотрены методические аспекты формирования и обработки цифровых данных о земной поверхности, а также определения морфометрических характеристик склонов, оказывающих влияние на формирование лавинной опасности. В ходе исследования были созданы два типа геоморфологических карт: карты высот и морфометрические карты крутизны склонов. Основой для построения тематических карт послужили цифровые модели рельефа, сформированные по данным SRTM и лидарной съемки. Проведен комплексный анализ цифровых моделей рельефа, направленный на выявление склонов, их экспозиций и других параметров, имеющих ключевое значение при определении потенциальных зон схода снежных лавин. Установлено, что большинство лавиносборов приурочено к склонам с крутизной от 25° до 45°, однако также выявлены участки с уклонами в пределах 15–25°. Полученные результаты позволяют более точно определить границы и пространственное распространение лавиноопасных зон, повысить достоверность прогнозирования опасных природных процессов и усовершенствовать планирование профилактических мероприятий на исследуемой территории.

Ключевые слова: снежная лавина, цифровая модель, дистанционное зондирование

А. К. Kanasov¹✉

Geomorphometric analysis of slopes of avalanche-prone areas of East Kazakhstan region using digital terrain models

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: azamat040594@mail.ru

Abstract. The article examines the features of geomorphometric analysis of slopes in avalanche-prone areas of the East Kazakhstan region using digital elevation models. Methodological approaches to the creation and processing of digital surface data, as well as the identification of morphometric slope characteristics influencing avalanche hazard formation, are considered. During the study, two types of geomorphological maps were developed: elevation maps and morphometric slope steepness maps. The thematic maps were created on the basis of digital elevation models generated from SRTM data and LiDAR survey data. A comprehensive analysis of the digital elevation models was carried out to identify slopes, slope aspects, and other parameters that play a key role in determining potential avalanche release zones. The results showed that most avalanche catchment areas are located on slopes with inclinations ranging from 25° to 45°, although areas with slope angles between 15° and 25° were also identified. The obtained results make it possible to more accurately define the boundaries and spatial extent of avalanche-prone zones, improve the reliability of hazardous natural process forecasting, and optimize the planning of preventive measures within the study area.

Keywords: snow avalanche, digital model, remote sensing

Введение

В последние годы использование цифровых моделей рельефа и геоинформационных технологий для анализа лавинной опасности территорий стало важной составляющей исследований в области геоморфологии, природных опасностей и предупреждения чрезвычайных ситуаций. Восточно-Казахстанская область (ВКО) является территорией со сложными горными ландшафтами и высокой частотой схода снежных лавин. В настоящее время на территории ВКО выделено 497 лавиноопасных участков (рис. 1) [1].

Авторы работы [2] отмечают, что точность и пространственное разрешение цифровых моделей играют ключевую роль при оценке лавинной опасности. Для моделирования лавинных процессов наиболее эффективно используются цифровые модели высокого пространственного разрешения, полученные на основе аэрофотосъёмки или данных дистанционного зондирования Земли [3].

Современные достижения дистанционного зондирования открывают широкие возможности для создания высококачественных цифровых моделей рельефа. Лидарная съёмка (LiDAR), спутниковая радиолокационная съёмка и методы стереофотограмметрии позволяют детально отображать микрорельеф горных склонов [4]. Как отмечается в работах [4, 5], для более точного прогнозирования лавинных процессов необходимо интегрировать различные типы и качество данных полевых наблюдений с материалами дистанционного зондирования.

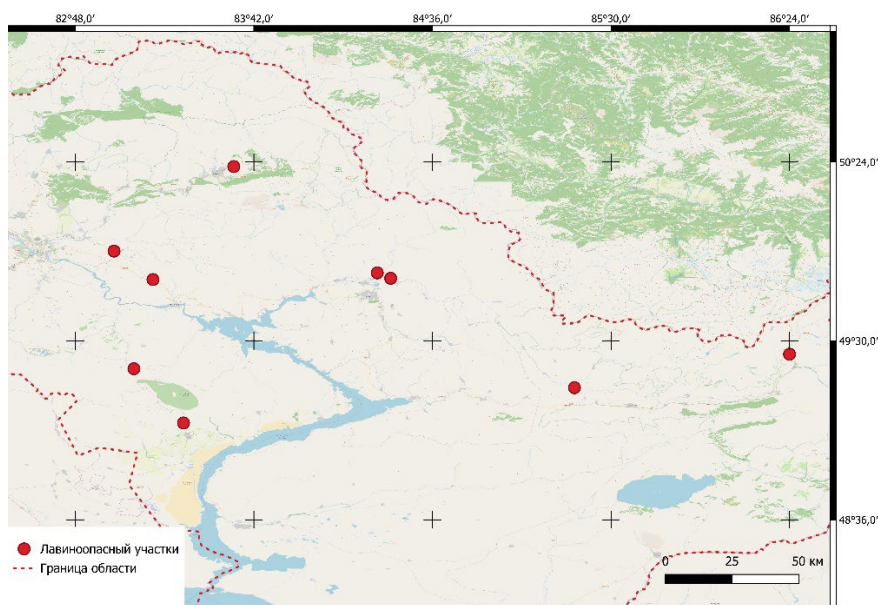


Рис. 1. Расположение лавиноопасных участков Восточного Казахстана

На основе цифровых моделей выполняется геоморфометрический анализ, позволяющий рассчитывать количественные показатели склонов и выявлять территории, наиболее подверженные лавинной опасности. К важнейшим геоморфометрическим характеристикам относятся крутизна склонов, экспозиция, кривизна поверхности и топографический индекс влажности [2]. В ряде исследова-

ний подтверждается наличие устойчивой взаимосвязи между этими характеристиками и частотой схода снежных лавин [6, 7, 8].

Методы и материалы

Для оценки рисков природных опасностей, разработки стратегии исследования лавиноопасных участков с учётом особенностей рельефа и планирования инфраструктуры был проведён геоморфологический анализ местности на основе геоморфологических карт. Геоморфологические карты представляют собой специализированные тематические карты, отображающие формы и особенности рельефа земной поверхности [9, 10].

Тематические карты были созданы на основе цифровой модели рельефа. В качестве основы для построения цифровых моделей были выбраны данные SRTM. SRTM представляет собой международный проект, направленный на создание высокоточной цифровой модели рельефа Земли с использованием радиолокационных данных дистанционного зондирования. В рамках данного проекта были собраны данные, позволившие создать глобальные цифровые модели рельефа для большей части земной поверхности (около 80 %) [11, 12].

На основе высокоточных цифровых моделей, созданных современными методами (аэрофотосъёмка, LiDAR, наземное лазерное сканирование), был выполнен геоморфологический анализ.

Съёмка проводилась с использованием беспилотной авиационной системы DJI Matrice 300 RTK и лидара Emesent Hovermap ST (рис. 2). Выполнение съёмки и создание цифровых 3D-моделей выбранных лавиносборов на территории Восточно-Казахстанской области осуществлялось в следующей последовательности (рис. 3).



Рис. 2. Беспилотный летательный аппарат DJI Matrice 300 RTK с лидаром Hovermap



Рис. 3. Последовательность выполнения исследований с использованием БПЛА и LiDAR

В качестве объектов исследования были выбраны лавиноопасные территории Восточно-Казахстанской области. Полевые работы проводились в районах горы Зубовская и реки Проходная.

Результаты и обсуждения

Технология LiDAR позволяет получать высокоточные трёхмерные данные о территории и объектах, а созданные на их основе цифровые модели широко применяются в картографии, строительстве, проектировании инженерных сооружений, геологии, землеустройстве и городской инфраструктуре. Построение цифровых моделей по материалам лидарной съёмки включает комплекс специализированных технологических и аналитических процессов, востребованных в различных сферах деятельности и обеспечивающих получение точных и интерактивных трёхмерных представлений территорий и объектов [13].

Использование беспилотных авиационных систем с лидарным оборудованием в горных районах имеет ряд эксплуатационных ограничений. Проведение съёмочных работ требует благоприятных метеорологических условий: отсутствия интенсивных осадков, тумана и сильного ветра (обычно более 8–10 м/с), поскольку данные факторы могут снижать качество лазерного сканирования и устойчивость полета БАС. В зимний период дополнительными ограничениями являются низкие температуры и быстро изменяющиеся погодные условия высокогорных территорий.

Первичная обработка данных, полученных с лидара, выполняется в программном обеспечении Auga. Данная программа предназначена для формирования облака точек на основе лидарных данных. В программной среде возможно выполнение базовых операций с исходными данными, включая обрезку и прореживание точек, изменение системы координат и другие операции. Кроме того, программа позволяет визуализировать исходные данные в различных плоскостях (рис. 4).

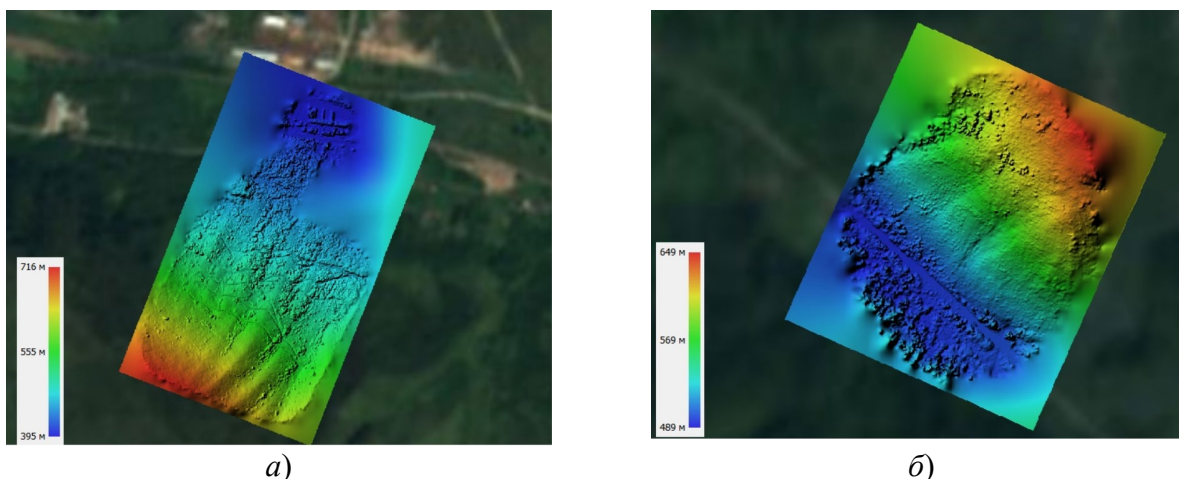


Рис. 4. Данные обработки из лидара: а) гора «Зубовская» б) река Проходная

Таким образом, лидарная съёмка является быстрым, точным и высококачественным методом сбора пространственных данных, позволяющим существенно повысить детализацию, оперативность получения, надёжность и точность информации при решении различных задач [14].

Карты высот были созданы в программной среде QGIS версии 3.36 на основе данных SRTM. Загруженные растровые данные были преобразованы в одноканальное псевдоцветное изображение с линейным градиентом Topography. Цифровые данные (высотные отметки) были разделены на равные диапазоны в соответствии с высотой местности.

В результате анализа морфометрических данных была дана характеристика лавиноопасных участков по высотным отметкам местности [15].

Лавиносборы № 1–5 находятся на высотах 480–560 м, при этом абсолютные отметки лавиносборов увеличиваются в юго-восточном направлении. Наибольший лавиносбор (№ 10) расположен на высоте 800 м (рис. 5).

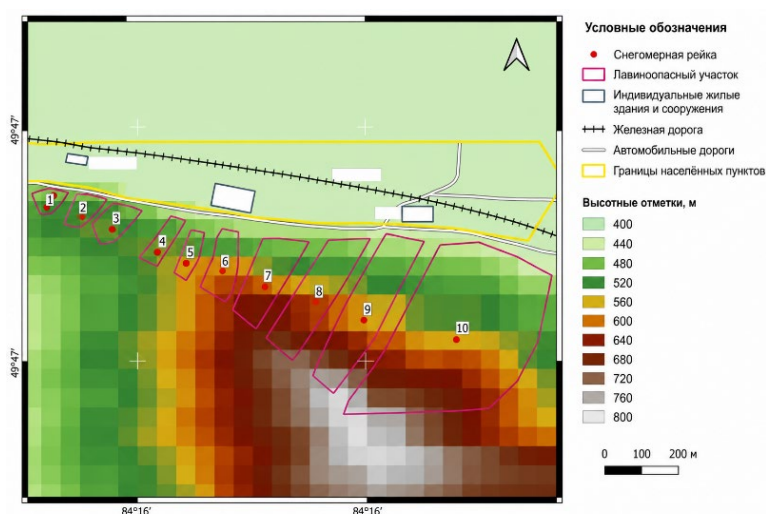


Рис. 5. Карта высот участка горы «Зубовск» (на основании данных SRTM)

На участке реки Проходная, в районе села Горная Ульбинка (рис. 6), лавиносборы преимущественно расположены на высотах 460–580 м (до № 22). В юго-восточном направлении, в межгорных пространствах, высотные отметки лавиносборов (№ 23–26) достигают 850–880 м.

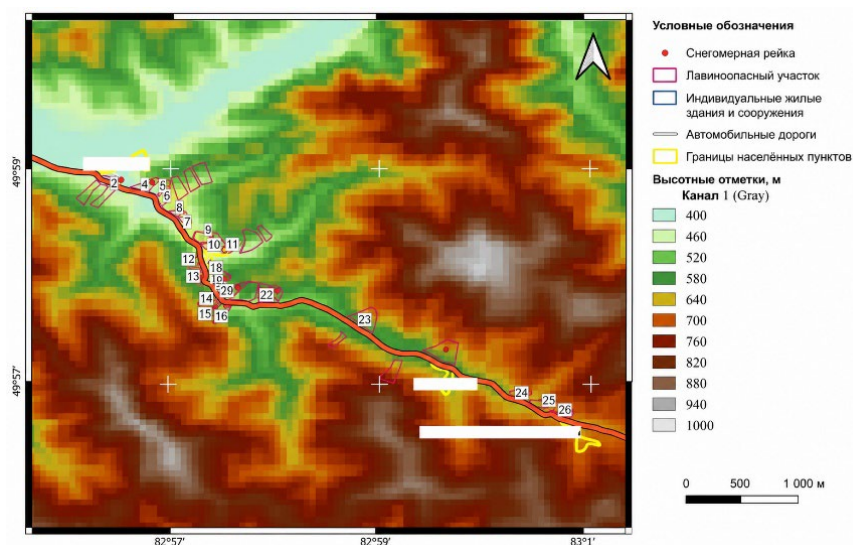


Рис. 6. Карта высот участка реки Проходная (на основании данных SRTM)

Для построения карты крутизны склонов использовались данные SRTM. В качестве инструмента применялся плагин морфометрического анализа QGIS. После выполнения морфометрических расчётов растровые данные были преобразованы в одноканальное псевдоцветное изображение. Использовался градиент «Turbo» с одинаковыми интервалами значений по градусам [16, 17]. В результате были построены морфометрические карты по исследуемым участкам (рис. 7).

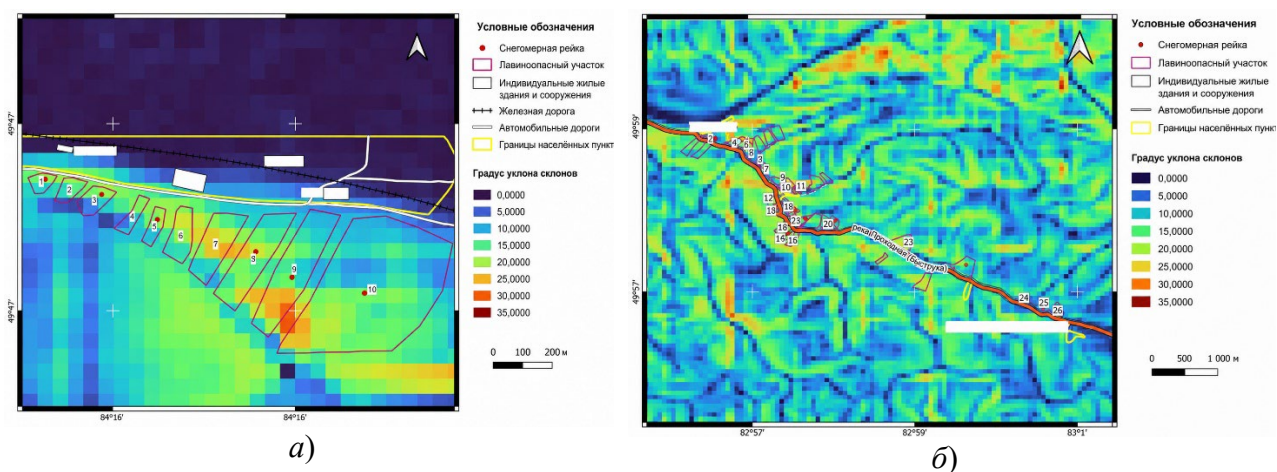


Рис. 7. Морфометрическая карта: а) гора «Зубовская» б) река Проходная

На основе анализа результатов лидарных съемок и карт высот выявлены участки с углами наклона, наиболее склонными к выпадению лавин (табл. 1).

Таблица 1 – Максимальные и минимальные значения уклона склонов лавиноопасных участков

Название участка	Минимальное значение уклонов, °	Максимальное значение уклонов, °
Гора «Зубовск»	10	30
Река Проходная	15	30

По сравнению с моделью SRTM, обладающей пространственным разрешением 30 м и средней вертикальной погрешностью порядка $\pm 10\text{--}16$ м, цифровая модель рельефа, построенная по данным лидарной съемки с БАС, обеспечивает разрешение до 0,1–0,3 м и вертикальную точность порядка $\pm 0,05\text{--}0,15$ м. Это позволяет значительно более детально выделять микрорельеф склонов и оценивать их морфометрические характеристики, имеющие значение при анализе лавинной опасности (табл. 2).

Таблица 2 – Сравнение пространственного разрешения и точности цифровых моделей рельефа

Источник ЦМР	Пространственное разрешение	Вертикальная точность
SRTM DEM	30 м	$\pm 10\text{--}16$ м
Лидарная съемка с БАС	0,1–0,3 м	$\pm 0,05\text{--}0,15$ м

Заключение

Использование данных SRTM целесообразно для регионального анализа и предварительного этапа исследований, общего изучения территории и выявления основных особенностей рельефа.

Высокоточные цифровые модели являются оптимальными для детального анализа и мониторинга локальных и конкретных процессов, проведения инженерных, экологических и научных исследований на небольших территориях, а также в случаях, где требуется высокая точность и детальность данных.

Оба метода обладают своими преимуществами и могут успешно дополнять друг друга благодаря возможности перехода от общего масштабного анализа (SRTM) к детальному изучению отдельных участков рельефа (высокоточные цифровые модели). Выбор конкретного подхода или их сочетания полностью зависит от поставленных территориальных задач и масштаба геоморфологических исследований.

Следует отметить, что детальный геоморфометрический анализ выполнен на примере наиболее лавиноопасных участков Восточно-Казахстанской области – бассейнов реки Проходная и горы Зубовская. Выбор данных территорий обусловлен наличием многолетних наблюдений за лавинной активностью и возможностью проведения высокоточной лидарной съемки. Полученные результаты могут

служить методической основой для последующего масштабирования исследований на другие лавиноопасные районы Восточно-Казахстанской области.

Полученные данные в дальнейшем могут быть использованы для мониторинга лавиноопасных участков Восточно-Казахстанской области и разработки геоинформационных программ прогнозирования снежных лавин.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Севастьянова С. А. Региональное планирование развития туризма и гостиничного хозяйства: учеб. пособие. – М.: КНОРУС, 2007. – 256 с.
1. Rakhymberdina, M., Levin, E., Daumova, G., Bekishev Y., Assylkhanova, Z., Kapasov, A. Combined Remote Sensing and GIS Methods for Detecting Avalanches in Eastern Kazakhstan // *ES Energy and Environment*. – 2024. – Vol. 26. - P. 1350. DOI 10.30919/eseel350.
2. Aydin A., Eker R. GIS-based snow avalanche hazard mapping: bayburt-aşağı dere catchment case // *Journal of Environmental Biology*. – 2017. – Vol. 38(5). - P. 937-943. DOI 10.22438/jeb/38/5(si)/gm-10.
3. Wastl M., Stötter J., Kleindienst H., Avalanche risk assessment for mountain roads: a case study from Iceland// *Natural Hazards*. – 2011. – Vol. 56(2). DOI: 10.1007/s11069-010-9703-64.
4. Bühler Y., Bebi P., Christen M., Margreth S., Stoffel L., Stoffel A., Marty C., Schmucki G., Caviezel A., Kühne R., Wohlwend S., Bartelt P. Automated avalanche hazard indication mapping on a statewide scale // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. – 2022. – Vol. 22 (6) - P. 1825-1843. DOI 10.5194/nhess-22-1825-2022.
5. Kurt T. Avalanche Hazards with Mitigation in Turkey and Qualitative Risk Assessment for Snow Avalanches in Ayder (Rize, NE Turkey) Using Combination of GIS, Remote Sensing Techniques and Field Studies. In *Applications of Space Techniques on the Natural Hazards in the MENA Region* // Springer International Publishing: New York, NY, USA. – 2022. - P. 533–567. DOI 10.1007/978-3-030-88874-9_23.
6. Aydın A., Eker R., Odabaşı Y.B. Generating avalanche hazard indication map and determining snow avalanche protection forests in çaykara-Trabzon (NE-Turkey) // *Forestist*. – 2022. – Vol. 72 (1). - P. 62-72. DOI 10.5152/forestist.2021.20060.
7. Eckerstorfer M., Christiansen H.H. Meteorology, Topography and Snowpack Conditions Causing Two Extreme Mid-Winter Slush and Wet Slab Avalanche Periods in High Arctic Maritime Svalbard // *Permafrost and Periglacial Processes*. – 2012. – Vol. 23. - P. 15–25. DOI:10.1002/ppp.734.
8. Denissova N., Nurakynov S., Petrova O., Chepashev D., Daumova G., Yelisseyeva A. Remote sensing techniques for assessing snow avalanche formation factors and building hazard monitoring systems // *Atmosphere*. – 2024. - Vol. 15(11). – P. 1343. DOI 10.3390/atmos15111343.
9. Николаева С.А., Савчук Д.А., Кузнецов А.С. Особенности датирования селей, лавин и камнепадов в верховьях р. Актру (Северо-Чуйский хребет, Центральный Алтай) по травмам деревьев // *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология* – 2017. – № 4. – С. 35-47.
10. Кюль Е.В. Оценка изменения ландшафтов лавинной деятельностью (по ландшафтными признакам частоты схода лавин) // *Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН*. – 2014. – № 3. – С. 53-59.
11. Yang L., Meng X., Zhang X. SRTM DEM and its applications advanced // *International Journal of Remote Sensing* – 2011. – Vol. 32 (14). - P. 3875-3896. DOI:10.1080/01431161003786016.
12. Rodriguez E., Morris C.S., Belz J.E. A global assessment of the SRTM performance // *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. – 2006. – Vol. 72. - P. 249-260. DOI 10.14358/PERS.72.3.249.

13. Eitel J.U.H., Hö, B., Vierling L.A., Abellán A., Asner G.P., Deems J.S., Glennie C.L., Joerg P.C., Lewinter A.L., Magney T.S., Mandlbürger G., Morton D.C., Müller J., Vierling K.T. Beyond 3-D: The new spectrum of lidar applications for earth and ecological sciences // Remote Sensing of Environment. – 2016. – Vol. 186. – P. 372–392.
14. Chong Z.J., Qin B., Bandyopadhyay T., Ang M., Frazzoli E., Rus D. Synthetic 2D LIDAR for precise vehicle localization in 3D urban environment // In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Karlsruhe, Germany. - 2013. - P. 1554–1559. DOI 10.1109/ICRA.2013.6630777.
15. Maggioni M., Gruber U. The influence of topographic parameters on avalanche release dimension and frequency // Cold Regions Science and Technology. – 2003. – Vol. 37 (3). - P. 407-419. DOI 10.1016/S0165-232X(03)00080-6.
16. Крючков А.Н., Абламейко С.В., Апарин Г.П., Соболев Л.Н. Методы оперативного анализа состояния местности на основе моделей цифровых карт и аэро-космоснимков // Штучний інтелект. - 2010. - № 3. - С. 329-340.
17. Singh D.K., Mishra V.D., Gusain H.S. Simulation and analysis of a snow avalanche accident in Lower Western Himalaya // India, Journal of the Indian Society of Remote Sensing. – 2020. – Vol. 48 (11). - P. 1555-1565. DOI: 10.1007/s12524-020-01178-5.

© A. K. Kanacov 2026