Возможности спутниковой съёмки Sentinel-2 в задаче регистрации селевых паводков в горах Заилийского Алатау

А. Г. Терехов[1,4], Г. Н. Сагатдинова[2], Р. И. Мухамедиев[3], К. М. Болатов[2,4]

[1] *Институт информационных и вычислительных технологий*
Алматы, 050010, Казахстан
E-mail: aterekhov1@yandex.ru
[2] *Казахский национальный университет имени аль-Фараби*
Алматы, 050040, Казахстан
E-mail: bolatov_k@meteo.kz
[3] *Казахский национальный исследовательский технический университет им. К. И. Сатпаева, Алматы, 050013, Казахстан*
E-mail: ravil.muhamedyev@gmail.com
[4] *РГП «Казгидромет», Алматы, 050022, Казахстан*
E-mail: terehov_a@meteo.kz

Селевая активность дождевого генезиса в высокогорной зоне Заилийского Алатау из-за очень редкой сети наземных наблюдений остаётся слабо изученным явлением. В работе рассмотрена информативность спутниковых данных Sentinel-2 (разрешение 10 м) в задаче регистрации селевых паводков в верховьях горных рек. Мощный фронт циклона, который прошёл 1–4 июля 2026 г. через хребет Заилийский Алатау, сопровождался выпадением в высокогорной зоне ливневых осадков, что привело к селевым паводкам, в результате которых были подтоплены некоторые районы г. Алматы (2,4 млн жителей). Проведён спутниковый анализ следов селевых паводков в высокогорной зоне рек северного склона хребта Заилийский Алатау. Селевой паводок очищает русловую зону от растительного покрова, что может служить его маркером. В качестве исходных данных использовалась разница значений вегетационного индекса NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index) до и после ливневых осадков. По данным Sentinel-2 за 23 июля 2025 и 18 июля 2026 г. было проанализировано состояние русел девяти основных рек северного склона хребта Заилийский Алатау. Анализ проводился для русловой зоны шириной в 150 м. Полученные данные позволили выполнить сравнительный анализ степени изменений растительности русловых зон выбранных рек. Наиболее активные селевые паводки регистрировались в высокогорной зоне четырёх рек: Узын-Каргалы, Каскелен, Аксай и Тургень. Фактически, в результате паводков на горных реках оказались повреждёнными мосты в ущельях Каскелен, Аксай и Тургень, что в целом соответствует спутниковым оценкам. Таким образом, спутниковые данные Sentinel-2 могут выступать важным источником информации в задачах пространственного анализа активности селевых паводков дождевого генезиса в высокогорных районах хребта Заилийский Алатау, что особенно востребовано из-за крайней ограниченности альтернативных источников информации.

Ключевые слова: Заилийский Алатау, селеобразующие осадки, селевой паводок, сель, дистанционное зондирование, вегетационный индекс NDVI, картирование селевых паводков

Одобрена к печати: 07.10.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-5-442-448

Хребет Заилийский Алатау (4973 м) протянулся с запада на восток примерно на 350 км. Эта горная структура расположена в Центральной Азии на территории Казахстана и Киргизии и относится к системе Северного Тянь-Шаня. Хребет характеризуется альпийским типом рельефа и наличием горного оледенения с площадью ледников более 200 км^2 (Коновалов, Пиманкина, 2016). Одним из опасных явлений в Заилийском Алатау считаются сели, представляющие собой грязекаменные потоки, проходящие по руслам рек (Медеу и др., 2019; Shahgedanova et al., 2024). Сели возникают внезапно и несут большую опасность как для жизни людей, так и для целостности любых объектов, оказавшихся в зоне их влияния (Iverson, 1997). Эти явления в основном связаны либо с интенсивными и продолжительными осадками, либо с прорывами ледниковых озёр (Медеу и др., 2020; Guzzetti et al.,

2008). Основной экономический ущерб от селей локализуется на предгорной равнине в случаях, когда грязекаменные потоки или паводки после их распада выходят в зону с развитой инфраструктурой.

Сели дождевого генезиса считаются следствием взаимодействия горных территорий с интенсивными, продолжительными жидкими осадками. Крутые склоны, сложенные рыхлообломочными материалами со слабо развитым растительным покровом, легко размываются, что приводит к формированию грязекаменных потоков. Для прогноза возникновения и оценки возможного масштаба таких явлений необходимо иметь, вероятно, более детальное пространственное описание всех видов селевых проявлений при интенсивных осадках (Ballesteros-Cánovas et al., 2024; Cao et al., 2021; Dash et al., 2022).

У понятия сель нет чётких критериев на масштаб явления (Davies, 1997). В Казахстане селевые события, не приведшие к экономическому ущербу, как правило, не регистрируются вообще. В высокогорных районах регистрация селепроявлений затруднена малонаселённостью и труднодоступностью многих территорий, что приводит к потере важной информации о режимах взаимодействия горных территорий с интенсивными осадками. Например, официальная статистика селей Заилийского Алатау в период с 1900 по 2017 г. указывает на 418 зафиксированных селей дождевого генезиса (Медеу и др., 2019), т.е. в среднем менее четырёх селевых явлений в год на территорию площадью несколько тысяч квадратных километров. Столь низкая селевая активность, очевидно, оказывается следствием особенностей регистрации событий, а не естественной природой данного явления. Данные дистанционного зондирования способны восполнить этот пробел и таким образом обеспечить формирование детального архива селевых проявлений (Elkadiri et al., 2014; Sharma et al., 2026).

Одним из явлений, занимающим промежуточное положение между селем и паводком, считается селевой паводок (Перов, 1996). Он возникает значительно чаще, чем сель, и характеризуется относительно низкой насыщенностью речного потока взвешенным материалом, в том числе и перемещаемыми камнями. В связи с этим, типичные элементы селевого потока, такие как перенос крупных камней, срыв отмостков русла, наблюдаются на отдельных, наиболее крутых частях русла. Более пологие участки русла реки выполняют функцию аккумуляционных площадок, на которых происходит накопление селевых отложений. Селевой паводок, так же как и сель, очищает русловую зону от растительности, что может служить признаком для его регистрации и оценки мощности (Atefi, Miura, 2022), см. *рис. 1.*

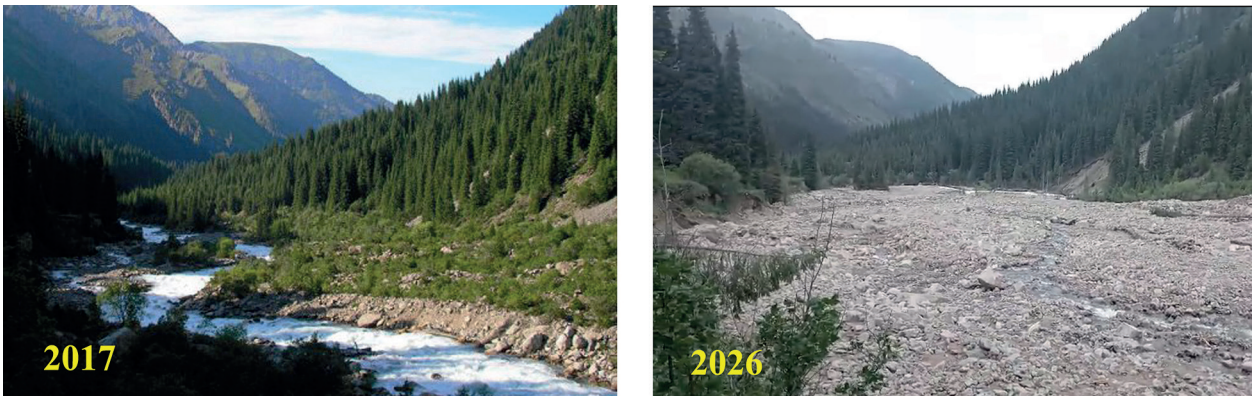


Рис. 1. Пример изменений в состоянии русловой зоны р. Левый Талгар в Заилийском Алатау в период 2017–2026 гг. в результате прохождения селевых паводков

В настоящем исследовании рассмотрена информативность данных Sentinel-2 в задаче описания селевых паводков для территории Заилийского Алатау. В период 1–4 июля 2026 г. через хребет Заилийский Алатау проходил мощный фронт циклона, который принёс интенсивные осадки. Стандартная методика дистанционного обнаружения селевых проявлений — анализ спутниковых сцен до и после события (Sharma et al., 2026). Селевые события связаны

с локальным изменением рельефа местности, при этом, как правило, в зоне прохождения грязекаменного потока уничтожается большая часть растительности (Суханова и др., 2025). Поэтому для обнаружения изменений на местности удобно использовать разницу значений спутникового вегетационного индекса до события селя и после него (Sidi Almouctar et al., 2021). В качестве вегетационного индекса в настоящем исследовании использовался стандартный нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index), рассчитываемый с использованием спектральных каналов 4 (*англ.* Band 4) (RED, 665 нм) и 8 (*англ.* Band 8) (NIR (*англ.* near infrared), 877 нм) Sentinel-2 по стандартной формуле: NDVI = (NIR−RED)/(NIR+RED).

Сели и селевые паводки в зоне своего действия практически полностью уничтожают растительный покров. Эти изменения могут быть зарегистрированы на спутниковых снимках в случае сопоставимости пространственного разрешения спутниковой съёмки с масштабом явления. Высокогорные территории Заилийского Алатау очень часто, полностью или частично закрыты облачным покровом, что затрудняет поиск безоблачных спутниковых сцен и вынуждает, в крайнем случае, в качестве опорных использовать снимки близких календарных дат прошлых лет.

В исследовании для детектирования селевой активности северного склона Заилийского Алатау после интенсивных осадков 1–4 июля 2026 г. привлекались снимки Sentinel-2 (разрешение 10 м) за 18 июля 2026 г., а в качестве опорной — сцена за 23 июля 2025 г. Для валидации использовались субметровые спутниковые снимки из сервиса Google Earth, см. *рис. 2.*

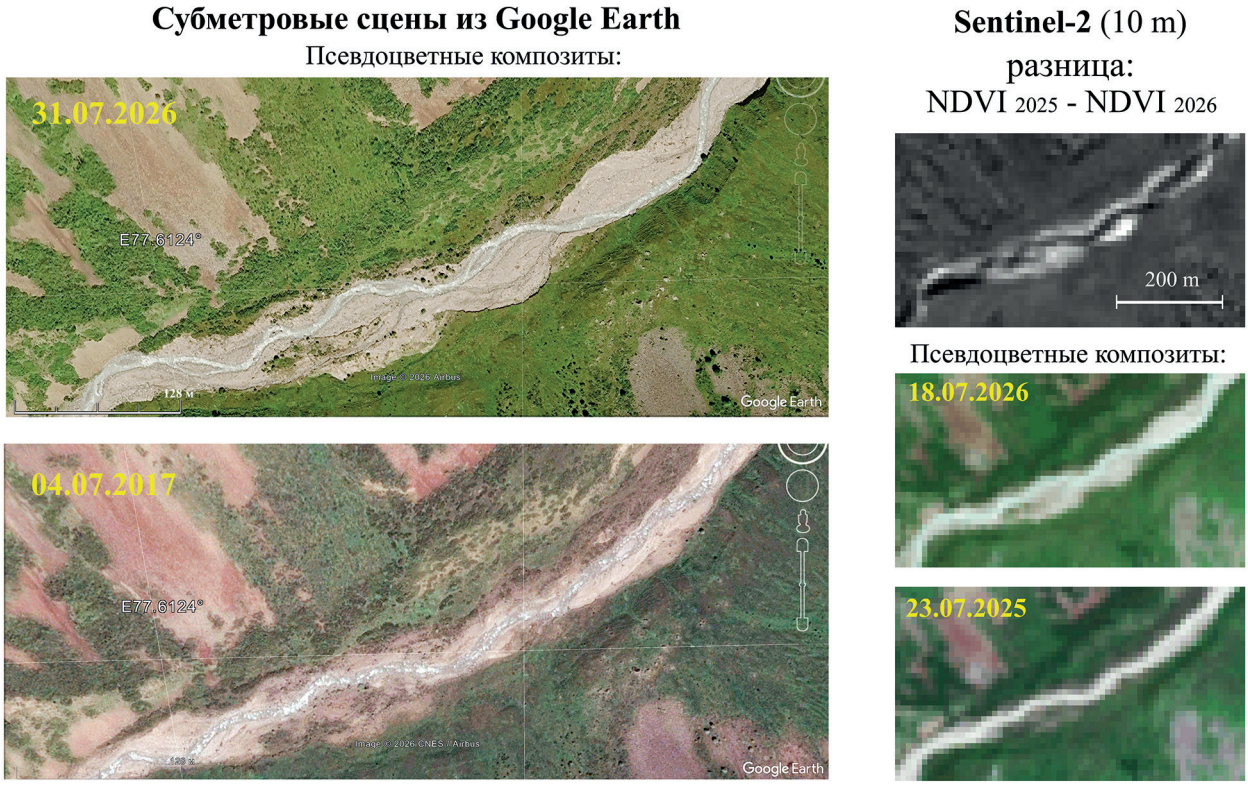


Рис. 2. Фрагмент русла р. Тургень в Заилийском Алатау (43,185° с. ш.; 77,613° в. д.), высота 2850 м над уровнем моря

Разница значений NDVI Sentinel-2 между 23.07.2025 и 18.07.2026 применялась для регистрации и описания следов селевых паводков в речной сети в высокогорной зоне Заилийского Алатау. Предполагалось, что значение разницы NDVI русловой зоны диагностирует масштаб селевого паводка. Чем значительнее эта разница, тем выше была активность селевого паводка. Всего проанализировано девять рек основных боковых ущелий северного

склона Заилийского Алатау. Для анализа речная сеть аппроксимировалась с помощью русловых зон шириной 150 м. Разница NDVI в этих зонах до и после ливневых осадков 1–4 июля 2026 г. служила основой для относительного ранжирования паводковой активности в речной сети. Исходная матрица разности NDVI русловых зон фильтровалась гауссовским фильтром (радиус 4 пикселя). Для ранжирования полученных результатов использовалась линейная шкала разницы NDVI, где минимальные и максимальные значения назначались исходя из имевшихся на всей сцене вариаций, см. *рис. 3*.

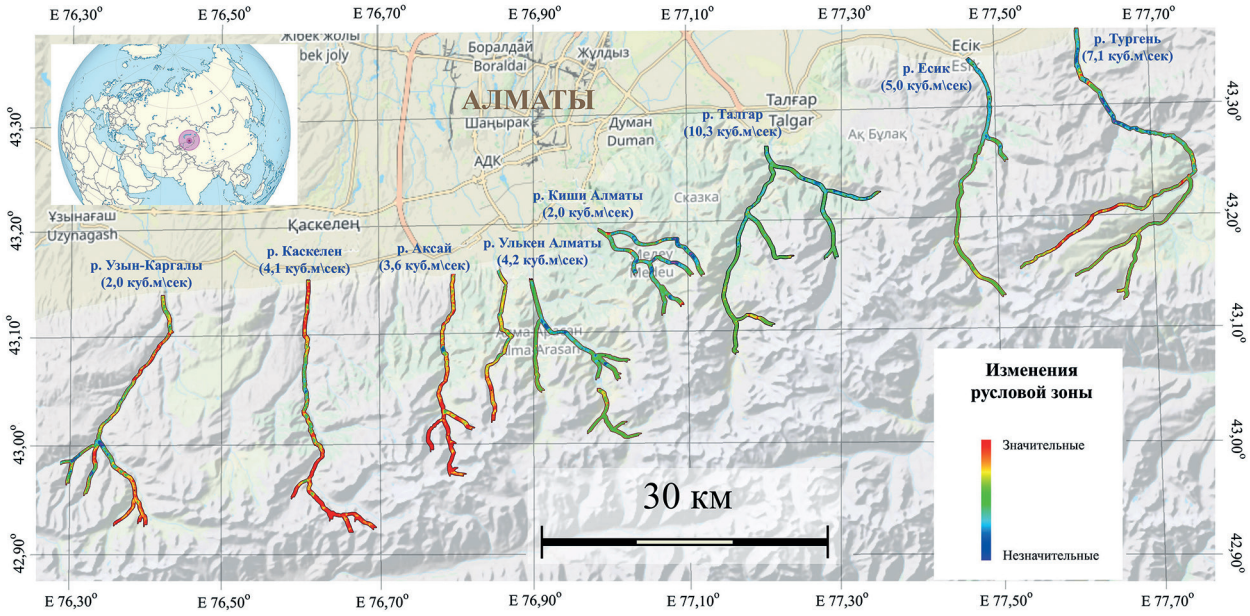


Рис. 3. Ранжирование рек северного склона Заилийского Алатау по степени уменьшения значений NDVI Sentinel-2 в русловой зоне после селевых паводков 1–4 июля 2026 г.

Проведённое ранжирование рек северного склона Заилийского Алатау выявило повышенную активность селевых паводков 1–4 июля 2026 г. в р. Тургень, Аксай, Каскелен и Узын-Каргалы. Аномально высокий паводок первых трёх рек отразился в средствах массовой информации. В этих ущельях были зафиксированы подтопления зданий, повреждения транспортной инфраструктуры и мостов. Исключение составила р. Узын-Каргалы, которая находится несколько в стороне от районов компактного проживания, возможно поэтому в СМИ не было отмечено каких-либо чрезвычайных событий в её долине.

Таким образом, спутниковая съёмка Sentinel-2 (разрешение 10 м) представляется потенциально важным источником информации в задаче диагностики масштаба селевых паводков дождевого генезиса (Врублевский, 2026) в горных районах Заилийского Алатау. Особенно это востребовано в малодоступных, высокогорных зонах, где альтернативные источники информации крайне ограничены или отсутствуют вовсе.

Работа выполнена при финансовой поддержке программно-целевого финансирования Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, проект Aeroscope № BR28713375.

Литература

1. *Врублевский М. В.* Экспресс-оценка последствий наводнений по некоммерческим спутниковым данным на примере анализа локальных очагов катастрофического паводка в Республике Дагестан весной 2026 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2026. Т. 23. № 2. С. 415–423. DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-2-415-423.
2. *Коновалов В. Г.*, *Пиманкина Н. В.* Пространственно-временно́е изменение составляющих водного баланса на северном склоне Заилийского Алатау // Лёд и Снег. 2016. Т. 56. № 4. С. 453–471. DOI: 10.15356/2076-6734-2016-4-453-471.
3. *Медеу А. Р.*, *Благовещенский В. П.*, *Гуляева Т. С.*, *Ранова С. У.* Селевая активность в Заилийском Алатау в XX – начале XXI веков // География и природные ресурсы. 2019. № 3. С. 173–179. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2019-3(173-179).
4. *Медеу А. Р.*, *Благовещенский В. П.*, *Касаткин Н. Е. и др.* Гляциальные сели в Заилийском Алатау за последние 120 лет // Лёд и Снег. 2020. Т. 60. № 2. С. 213–224. DOI: 10.31857/S2076673420020035.
5. *Перов В. Ф.* Селевые явления. Терминологический словарь. М.: Изд-во МГУ, 1996. 46 с.
6. *Суханова В. В.*, *Бородицкая А. В.*, *Амельченко Ю. А.*, *Кашницкий А. В.* Сход скальных пород на реке Бурее — 6 лет спутникового мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 3. С. 329–336. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-3-329-336.
7. *Atefi M. R.*, *Miura H.* Detection of flash flood inundated areas using relative difference in NDVI from Sentinel-2 images: A case study of the August 2020 event in Charikar, Afghanistan // Remote Sensing. 2022. V. 14. No. 15. Article 3647. DOI: 10.3390/rs14153647.
8. *Ballesteros-Cánovas J. A.*, *Stoffel M.*, *de Haas T.*, *Bodoque J. M.* Debris flow dating and magnitude reconstruction // Advances in debris-flow science and practice / eds. Jakob M., McDougall S., Santi P. Cham: Springer, 2024. P. 219–248. DOI: 10.1007/978-3-031-48691-3_8.
9. *Cao C.*, *Zhang W.*, *Chen J. et al.* Quantitative estimation of debris flow source materials by integrating multi-source data: A case study // Engineering Geology. 2021. V. 291. Article 106222. DOI: 10.1016/j.enggeo.2021.106222.
10. *Dash R. K.*, *Samanta M.*, *Kanungo D. P.* Approaches for prediction of debris flow runout // Landslide risk assessment and mitigation in India. Proc. National Conf., Nov. 1–2, 2022, New Delhi, India / eds. *Sajjad H.*, *Siddiqui M. A.*, *Rahman A. et al.* Singapore: Springer, 2022. P. 267–272. DOI: 10.1007/978-981-97-5485-4_18.
11. *Davies T. R.* Large and small debris flows — Occurrence and behaviour // Recent developments on debris flows / eds. Armanini A., Michiue M. Lecture Notes in Earth Sciences. V. 64. Berlin, Heidelberg: Springer, 1997. P. 27–45. DOI: 10.1007/BFb0117760.
12. *Elkadiri R.*, *Sultan M.*, *Youssef A. M. et al.* A remote sensing-based approach for debris-flow susceptibility assessment using artificial neural networks and logistic regression modeling // IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2014. V. 7. No. 12. P. 4818–4835. DOI: 10.1109/JSTARS.2014.2337273.
13. *Guzzetti F.*, *Peruccacci S.*, *Rossi M.*, *Stark C. P.* The rainfall intensity–duration control of shallow landslides and debris flows: an update // Landslides. 2008. V. 5. P. 3–17. DOI: 10.1007/s10346-007-0112-1.
14. *Iverson R. M.* The physics of debris flows // Reviews of Geophysics. 1997. V. 35. No. 3. P. 245–296. DOI: 10.1029/97RG00426.
15. *Shahgedanova M.*, *Saidaliyeva Z.*, *Mussina A. et al.* Debris flows in the northern Tien Shan, Central Asia: regional database, meteorological triggers, and trends // npj Natural Hazards. 2024. V. 1. Article 49. DOI: 10.1038/s44304-024-00050-7.
16. *Sharma A.*, *Dhamija S.*, *Negi H. S. et al.* Introducing an automated avalanche debris detection framework from Sentinel-2 imagery using multi-index spectral fusion and U-net optimisation // Cold Regions Science and Technology. 2026. V. 252. Article 105096. DOI: 10.1016/j.coldregions.2026.105096.
17. *Sidi Almouctar M. A.*, *Wu Y.*, *Kumar A. et al.* Spatiotemporal analysis of vegetation cover changes around surface water based on NDVI: a case study in Korama basin, Southern Zinder, Niger // Applied Water Science. 2021. V. 11. No. 1. Article 4. DOI: 10.1007/s13201-020-01332-x.

Sentinel-2 data in the task of mountain mud flood detection: A case study of Trans-Ili Alatau mountains

A. G. Terekhov[1,4], G. N. Sagatdinova[2], R. I. Mukhamediev[3], K. M. Bolatov[2,4]

[1] *Institute of Information and Computational Technologies, Almaty 050010, Kazakhstan*
E-mail: aterekhov1@yandex.ru
[2] *Al-Farabi Kazakh National University, Almaty 050040, Kazakhstan*
E-mail: bolatov_k@meteo.kz
[3] *K. I. Satbayev Kazakh National Research University, Almaty 050013, Kazakhstan*
E-mail: ravil.muhamedyev@gmail.com
[4] *RSE Kazhydromet, Almaty 050022, Kazakhstan*
E-mail: terehov_a@meteo.kz

Mudflow activity of rainfall genesis in high altitude territory in Trans-Ili Alatau mountains remains a poorly studied phenomenon due to a very rare network of ground-based observations. This research considers the informative value of Sentinel-2 satellite data (10 m resolution) in the task of mountain mud floods detection. A powerful cyclone that passed through the Trans-Ili Alatau on July 1–4, 2026, was accompanied by heavy rainfall that led to the formation of mountain mud floods. As a result, some districts of Almaty (2.4 million inhabitants) were flooded. The study carried out a satellite analysis of the mudflow flood traces that took place in the river valleys of the northern slope of the Trans-Ili Alatau. Mudflow destroys vegetation cover in riverine zone. This phenomenon leaves traces that can serve as markers for recognizing mountain mud floods in satellite images. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) difference, before and after heavy rainfall, was used as initial data. For nine mountain rivers on the northern slope of Trans-Ili Alatau, Sentinel-2 data for July 23, 2025, and July 18, 2026, were used to analyze the state of river channel in a 150-m-wide zone. The data obtained served as the basis for a comparative analysis of the degree of vegetation changes in the channel zones. The most active mudflows were recorded in the high-altitude zone of four rivers: Uzyn Kargaly, Kaskelen, Aksai, and Turgen. In fact, as a result of the floods that took place on mountain rivers, bridges in the Kaskelen, Aksai and Turgen gorges were damaged, which coincides with satellite estimates. Thus, Sentinel-2 satellite data may be important for spatial analysis of mountain mud flood activity. This is especially in demand for the high-altitude areas of the Trans-Ili Alatau range where alternative sources of information are limited or absent.

Keywords: Trans-Ili Alatau, mudflow forming precipitation, mountain mud flood, debris flow, remote sensing, NDVI, mapping of madflow phenomena

Accepted: 07.10.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-5-442-448

References

1. Vrublevsky M. V., Express assessment of flood consequences using non-commercial satellite data: A case study of local catastrophic flood hotspots in the Republic of Dagestan in spring 2026, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2026, V. 23, No. 2, pp. 415–423 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-2-415-423.
2. Konovalov V. G., Pimankina N. V., Spatial-temporal variability of water balance components in the North area of the Zailiisky Alatau Range, *Ice and Snow*, 2016, V. 56, No. 4, pp. 453–471 (in Russian), DOI: 10.15356/2076-6734-2016-4-453-471.
3. Medeu V. P., Blagovechshensky V. P., Gulyayeva T. S., Ranova S. U., Debris flow activity in Trans-Ili Alatau in the 20th – early 21st centuries, *Geografiya i prirodnye resursy*, 2019, No. 3, pp. 173–179 (in Russian), DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2019-3(173-179).
4. Medeu A. P., Blagovechshenskiy V. P., Kasatkin N. E. et al., Glacial debris flows in Zailiysky Alatau over the past 120 years, *Ice and Snow*, 2020, V. 60, No. 2, pp. 213–224 (in Russian), DOI: 10.31857/S2076673420020035.
5. Perov V. F., *Selevye yavleniya. Terminologicheskii slovar'* (Mudflow phenomena. Terminological dictionary), Moscow: MSU, 1996, 46 p. (in Russian).

6. Sukhanova V. V., Boroditskaya A. V., Amelchenko Yu. A., Kashnitskii A. V., Rock collapse on the Bureya River — 6 years of satellite monitoring, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2025, V. 22, No. 3, pp. 329–336 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-3-329-336.
7. Atefi M. R., Miura H., Detection of flash flood inundated areas using relative difference in NDVI from Sentinel-2 images: A case study of the August 2020 event in Charikar, Afghanistan, *Remote Sensing*, 2022, V. 14, No. 15, Article 3647, DOI: 10.3390/rs14153647.
8. Ballesteros-Cánovas J. A., Stoffel M., de Haas T., Bodoque J. M., Debris flow dating and magnitude reconstruction, In: *Advances in debris-flow science and practice*, Jakob M., McDougall S., Santi P. (eds), Cham: Springer, 2024, pp. 219–248, DOI: 10.1007/978-3-031-48691-3_8.
9. Cao C., Zhang W., Chen J. et al., Quantitative estimation of debris flow source materials by integrating multi-source data: A case study, *Engineering Geology*, 2021, V. 291, Article 106222, DOI: 10.1016/j.enggeo.2021.106222.
10. Dash R. K., Samanta M., Kanungo D. P., Approaches for prediction of debris flow runout, In: *Landslide risk assessment and mitigation in India. Proc. National Conf.*, *Nov. 1–2*, *2022*, *New Delhi*, *India*, Sajjad H., Siddiqui M. A., Rahman A. et al. (eds.), Singapore: Springer, 2022, pp. 267–272, DOI: 10.1007/978-981-97-5485-4_18.
11. Davies T. R., Large and small debris flows — Occurrence and behaviour, In: *Recent developments on debris flows*, Armanini A., Michiue M. (eds), Lecture Notes in Earth Sciences, V. 64, Berlin, Heidelberg: Springer, 1997, pp. 27–45, DOI: 10.1007/BFb0117760.
12. Elkadiri R., Sultan M., Youssef A. M. et al., A remote sensing-based approach for debris-flow susceptibility assessment using artificial neural networks and logistic regression modeling, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, V. 7, No. 12, pp. 4818–4835, DOI: 10.1109/JSTARS.2014.2337273.
13. Guzzetti F., Peruccacci S., Rossi M., Stark C. P., The rainfall intensity–duration control of shallow landslides and debris flows: an update, *Landslides*, 2008, V. 5, pp. 3–17, DOI: 10.1007/s10346-007-0112-1.
14. Iverson R. M., The physics of debris flows, *Reviews of Geophysics*, 1997, V. 35, No. 3, pp. 245–296, DOI: 10.1029/97RG00426.
15. Shahgedanova M., Saidaliyeva Z., Mussina A. et al., Debris flows in the northern Tien Shan, Central Asia: regional database, meteorological triggers, and trends, *npj Natural Hazards*, 2024, V. 1, Article 49, DOI: 10.1038/s44304-024-00050-7.
16. Sharma A., Dhamija S., Negi H. S. et al., Introducing an automated avalanche debris detection framework from Sentinel-2 imagery using multi-index spectral fusion and U-net optimisation, *Cold Regions Science and Technology*, 2026, V. 252, Article 105096, DOI: 10.1016/j.coldregions.2026.105096.
17. Sidi Almouctar M. A., Wu Y., Kumar A. et al., Spatiotemporal analysis of vegetation cover changes around surface water based on NDVI: a case study in Korama basin, Southern Zinder, Niger, *Applied Water Science*, 2021, V. 11, No. 1, Article 4, DOI: 10.1007/s13201-020-01332-x.