

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

ТЕХНИЧЕСКИЕ
НАУКИENVIRONMENTAL
SCIENCES

ENGINEERING

Крупные катастрофы, уже разорившие и продолжающие разорять современный мир, происходят от нежелания человека считаться с законами природы, от нежелания понять, что голод нельзя утолить, опустошая землю.

Жан ДОРСТ

Науки о земле
УДК 551.311.21:627.141.1

Оригинальная статья
DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-1-7-16

Применение методов машинного обучения для изучения водо-ледяных селей на горных реках Алматинской области

В.П. Благовещенский, В.В. Жданов , С.У. Ранова

Институт географии и водной безопасности Республики Казахстан,
Республика Казахстан, г. Алматы, ingeo_2009@mail.ru

 ZhdanovVitaliy@yandex.kz

Аннотация. Водо-ледяные потоки на горных реках Алматинской области обладают скоростью течения 4–5 м/с и по характеру движения похожи на грязекаменные сели. Они наносят материальный ущерб и вызывают человеческие жертвы. Это опасное природное явление отмечается в зимнее время в периоды резких потеплений, когда в руслах рек разрушаются скопления внутриводного и донного льда. Для изучения метеорологических условий формирования водо-ледяных потоков был применен алгоритм машинного обучения «случайный лес» (random forest), который позволяет обнаружить зависимость в данных, когда классические методы математической статистики не работают. Методы классификации с помощью искусственного интеллекта помогли выявить пороговые значения метеорологических элементов в периоды формирования водо-ледяных селей.

Ключевые слова: аномальное похолодание, водо-ледяные сели, внутриводный и донный лед, горы Иле Алатау, горные реки

Благодарность/Финансирование: Авторы выражают благодарность сотрудникам отдела изучения и прогноза селевых потоков РГП «Казгидромет» по г. Алматы в сборе материала. Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № BR21881982).

Для цитирования: Благовещенский В.П., Жданов В.В., Ранова С.У. Применение методов машинного обучения для изучения водо-ледяных селей на горных реках Алматинской области // Устойчивое развитие горных территорий. – 2025. – Т. 17. – № 1. – С. 7–16. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-1-7-16.

© В.П. Благовещенский, В.В. Жданов, С.У. Ранова, 2025

Application of machine learning methods for studying ice-jam floods on mountain rivers of the almaty region

V.P. Blagovechshenskiy, V.V. Zhdanov✉, S.U. Ranova

*Institute of Geography and Water Security of the Republic of Kazakhstan,
Almaty, Republic of Kazakhstan, ingeo_2009@mail.ru*

✉ ZhdanovVitaliy@yandex.kz

Abstract. Introduction. The article presents the results of the study of catastrophic water-ice flows that occurred on the Esentai River on 13.12.2022 and 16.12.2023. They had high flow speeds (4–5 m/s) and differed from slush ice drifts on lowland rivers. These flows resembled debris flows, because new material was involved and an avalanche-like increase of the water-ice mixture occurred. The flow movement was wave-like. These flows caused material damage. A similar phenomenon that occurred on January 6, 2006 on the Uzyn Kargaly River in Ile Alatau resulted in casualties. **The main objective** is to study the hydrological and meteorological conditions of the formation of water-ice flows on mountain rivers. **Research methods.** For this, the machine learning algorithm “Random Forest” was used. This is a method of automatically clustering data and dividing it into similar groups. It allows one to build “Decision Trees” that separate the meteorological situation and determine threshold values for each group. **The results of the research.** For the Central Asian climate, cooling down to 20–25 degrees below zero is an anomalous phenomenon. This causes the accumulation of anchor ice and a significant increase in the water level in the channel: 1–2 m above the winter low-water level. If cooling is replaced by a sharp warming with positive temperatures, destruction of ice structures and formation of ice-jam floods occur. **Discussion.** The difficulty in using this algorithm lies in interpreting the data and comparing it with already known results, since some machine “Classification Trees” take into account only general climate features. But certain threshold values are already confirmed by other scientific researches. This means that the algorithm works and produces results with a minimal statistical error. **Resume.** Threshold values of meteorological elements on the day of ice-jam floods were determined: daily warming gradient was more than 3.3 °C/day, air temperature anomaly was below 2.6 °C, the sum of air temperatures over the previous 5 days was 42.5 °C. They can be used to predict dangerous situations on mountain rivers.

Key words: abnormal cooling, ice-jam floods, anchor ice, Ile Alatau Mountains, Mountain Rivers

Acknowledgments/Funding: The authors express their gratitude to the staff of the department for the study and forecast of debris-flows of the Kazakhstan meteo service “Kazhydromet” in Almaty for collecting the material. This research has been funded by the Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No.BR21881982).

For citation: Blagovechshenskiy V.P., Zhdanov V.V., Ranova S.U. Application of machine learning methods for studying ice-jam floods on mountain rivers of the Almaty region. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2025, vol. 17, no. 1, pp. 7–16x. (In Russ.). DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-1-7-16.

Введение

На реках умеренного климатического пояса в зимнее время могут происходить различные опасные процессы. Они сильно зависят от морфологических особенностей рек. Для равнинных рек с малыми скоростями течения характерны сплошные ледоставы в зимние месяцы и заторно-зажорные явления в период образования и разрушения ледостава [1–4]. Шугоходы и разливы обычно

проходят с малыми скоростями и занимают продолжительный период времени. Но горные реки среднеазиатского региона обладают своими отличительными особенностями. Из-за мягкого климата и бурного потока здесь не бывает сплошного ледостава, шугоход имеет скоротечный характер [5–7]. Из-за больших уклонов русла характер движения сильно напоминает турбулентный поток с включением твердой составляющей. Такие пото-

ки обладают большими скоростями и их расход увеличивается из-за вовлечения нового материала [8–9].

В современном селеведении водо-ледяные явления выделены в отдельный класс, отличный от шугохода [10]. Водо-ледяные сели являются разновидностью селевых потоков, в которых твердая составляющая представлена льдом и снегом. Среди специалистов гидрологов до сих пор нет единого мнения по классификации этого явления. В большинстве справочников по гидрологии дается характеристика селя как потока высокой плотности и большой эрозионно-сдвиговой способности. До сих пор эти явления очень слабо изучены, потому что отсутствует статистическая архивная информация.

Причиной формирования водо-ледяного потока является разрушение внутриводного и донного льда, накопленного в русле реки в периоды похолоданий. Он обладает слоисто-пористой структурой. Эти скопления, напоминающие плотины, вызывают рост уровня воды в реке на 1,5–2 метра выше уровня зимней межени. Это сильно затрудняет эксплуатацию гидротехнических сооружений зимой [11–14].

Цель исследования

Изучение гидрологических и метеорологических условий формирования катастрофических водо-ледяных потоков, проходящих на горных реках Алматинской области. Определение пороговых значений метеорологических элементов, при которых происходит образование и разрушение ледовых образований в руслах рек. Это необходимо для понимания природы катастрофических потоков и создания метода прогноза этого опасного явления.

Методы исследования

Изучение водо-ледяных селей затруднено из-за редкой повторяемости этого явления и отсутствия статистически значимых массивов данных. Классические методы математической статистики требуют достаточные массивы информации, иначе отмечается большая ошибка и неустойчивость работы модели [15]. В таких случаях целесообразно применять алгоритмы искусственного интеллекта и машинного обучения. Очень хорошие результаты при классификации лавинной опасности показали алгоритмы под названием «Random Forest – Случайный лес». Прогнозные модели на их осно-

ве дают хорошие результаты при предсказаниях снежных лавин [16–17]. Технологии на основе искусственного интеллекта успешно применяются и в других областях науки [18–20].

«Random Forest – Случайный лес» – это метод систематизации массива переменных с разделением в виде деревьев классификации. Данные обобщаются в группы со схожими признаками и определяются пороговые значения для отнесения их к определенному классу. Результаты выводятся в виде диаграммы деревьев классификации. Алгоритм дает наименьшие ошибки из всех существующих методов классификации и способен обнаружить статистические связи даже в архивах с ограниченным числом переменных. Алгоритм написан таким образом, что происходит многократное автоматическое обобщение в схожие однородные группы. В результате уменьшается статистическая ошибка даже если переменных недостаточно.

Для работы использовался профессиональный пакет статистической обработки данных «Statistica StatSoft», русскоязычная версия 13.0 [21]. Существуют и другие методы машинного обучения, например написание программы самостоятельно на языке «PYTHON» с применением открытых библиотек.

Район исследования

В большинстве русел горных рек Алматинской области имеются хозяйственные постройки и гидротехнические сооружения. После распада СССР в Казахстане были упрощены строительные нормы в водоохранной зоне [22, 23]. Поэтому строения, расположенные близко к руслам рек, подвержены постоянному воздействию паводков и эрозии. Расположение опасных участков горных рек Алматинской области, где отмечалось прохождение водо-ледяных потоков, приведены на рис. 1.

Алматинская область (ныне разделенная на Алматинскую и Жетысусскую области) расположена на юго-востоке Республики Казахстан. Здесь находятся несколько крупных горных хребтов, разделенных сухой степной зоной. Горы Иле, Жетысу и Кунгей Алатау являются самыми северными хребтами Тянь-Шаня. Они простираются в широтном направлении и имеют абсолютные высоты более 4000 м над уровнем моря. В предгорьях расположены крупные города Алматы и Талдыкорган, а область является самой густонаселенной и освоенной в стране.

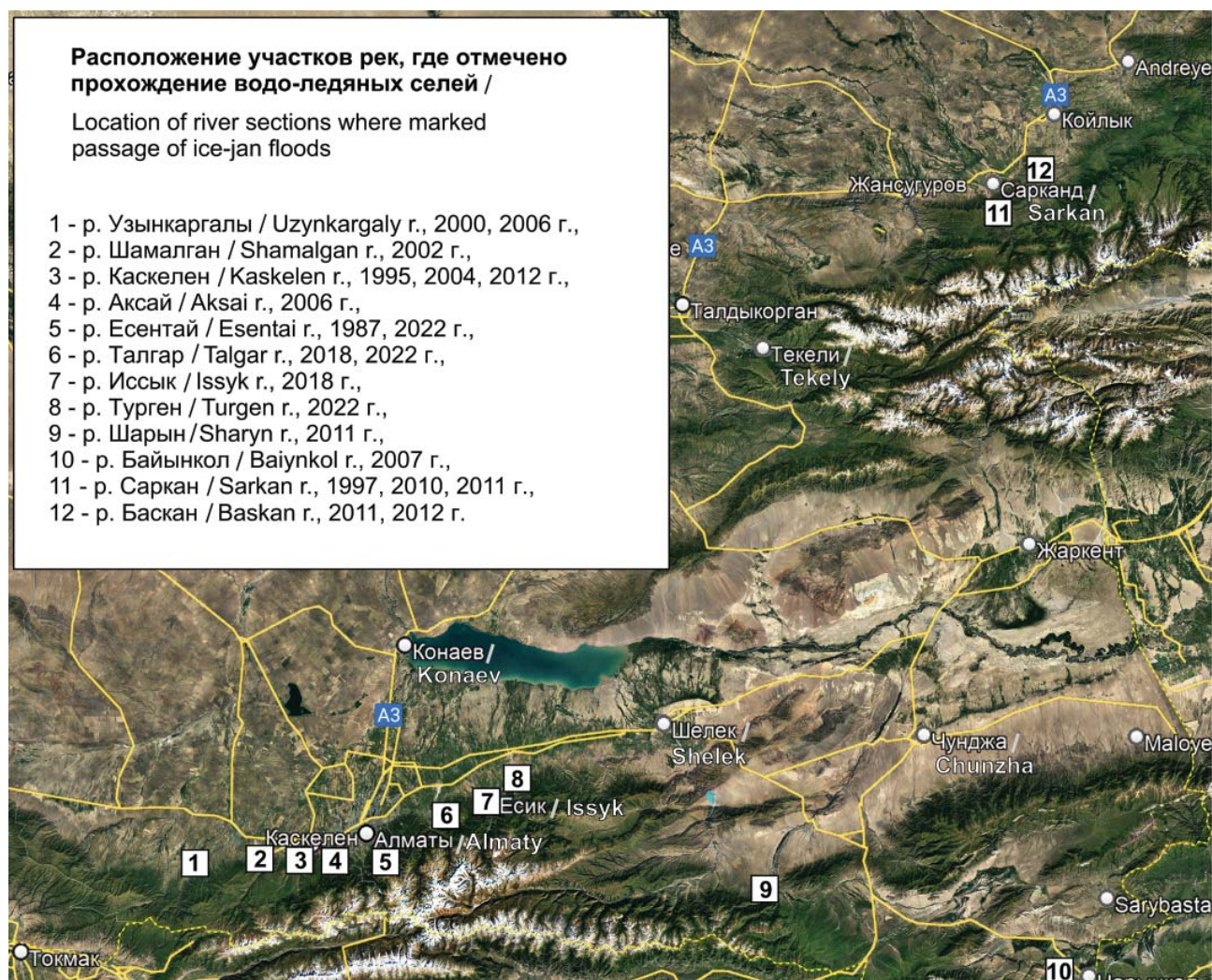


Рис. 1. Карта-схема опасных участков горных рек, где отмечено прохождение водо-ледяных селевых потоков
Fig. 1. Map-scheme of dangerous sections of mountain rivers, where the passage of ice-jam floods is noted

Из-за внутриконтинентального расположения хребтов метеорологические условия сильно меняются в разные годы. В предгорных районах минимальная температура воздуха в холодные зимы может опускаться ниже -40°C , а в жаркие летние месяцы подниматься выше 40°C . В предгорных районах амплитуда температуры воздуха ниже, а в холодный период года отмечается инверсионный слой в преддельных высот $1000\text{--}2000$ м н.у.м. Средняя температура воздуха на высоте 1000 м – 9°C , а на высоте 3000 м – минус 2°C . Отмечается сильно неравномерное распределение осадков в течение года: самые влажные месяцы март–апрель и октябрь–ноябрь. Самый сухой сезон – конец лета и начало осени. В отдельные годы в это время осадков не бывает совсем [5; 24].

Особенностью горных рек являются значительные уклоны ($3\text{--}5^{\circ}$) и наличие рыхло-обло-

мочного материала в руслах. Это способствует развитию турбулентного потока со значительными скоростями течения ($3\text{--}4$ м/с). В период зимне-осенней межени расход на большинстве рек составляет $1\text{--}3$ м³/с, в летний период во время таяния ледников расход может достигать $20\text{--}30$ м³/с. Особенностью рек является отсутствие сплошного ледостава зимой. Это происходит из-за сильно турбулентного потока воды. В руслах рек скапливается большое количество внутриводного и донного льда, который сужает русло и затрудняет течение воды. Это вызывает подъем уровня в периоды похолодания [11].

Объект исследования. 13 декабря 2022 года в пределах г. Алматы на реке Есентай прошел катастрофический поток. Он состоял из смеси воды, льда и снега. Поток разрушил сооружения в русле и на набережной реки. Про-

хождение потока было зафиксировано камерами видеонаблюдения. Мгновенно информация появилась в соцсетях и стало главной новостью местных информагентств [25]. Поток двигался со значительными скоростями, не менее 4–5 м/с. Он вовлекал новый материал, и отмечался лавинообразный рост объема и высоты волны, которая достигала 3 м. После прохождения потока всё русло реки было очищено ото льда. Все отложения вынесло в селехранилище перед проспектом аль-Фараби.

Причиной потока стали несколько факторов. Во-первых, был искусственный сброс воды на водodelителе «Дамба», контролирующей распределение воды в реках Киши Алматы и Есентай. Во-вторых, из-за резкого похолодания в русле сформировались большие скопления внутриводного и донного льда.

16 декабря 2023 года катастрофа повторилась вновь (рис. 2).



Рис. 2. Фото последствия прохождения водо-ледяного селя на реке Есентай 16.12.2023 г.
Fig. 2. Photo consequences of an ice-jam flood on the Esentai River on December 16, 2023

Она очень напомнила декабрь 2022 г. Во время резкого похолодания, вызванного вторжением холодных воздушных масс, началось накопление внутриводного и донного льда в руслах горных рек и значительный рост уровня воды. Это привело к подтоплению гидротехнических сооружений и вынужденному перераспределению воды на водodelителе рек Киши Алматы и Есентай. Рост расходов воды и ослабление прочности льда из-за потепления вызвали шугоход. Значительные уклоны русла привели к скоротечному селеподобному движению потока и вовлечению новых масс снега и льда. На входе в водоотстойник перед проспектом Аль-Фараби расход водо-ледяного потока

превышал 20 м³/с, а объем снежно-ледяных отложений составил несколько тысяч м³. Также, как и в 2022 году были разрушены заграждения и беседки, расположенные вдоль набережной.

Катастрофические водо-ледяные потоки отмечались на горных реках Алматинской области и ранее. В том же месте на р. Есентай водо-ледяной селёй проходил 20 ноября 1987 г. Причиной его формирования стало резкое похолодание, аномальная ледовая обстановка и антропогенный сброс воды в реку. Тогда были разрушены гидротехнические сооружения [26].

Самое трагическое явление произошло 6 января 2006 года на реке Узын Каргалы в западной части Иле Алатау [27]. Тогда кроме ущерба были и человеческие жертвы. Погибли два человека. По данным гидротехника Назарова в 60-е годы XX века отмечено прохождение нескольких водо-ледяных селей, которые наносили ущерб объектам в руслах рек [28]. Автор отметил, что причиной потоков становилось разрушение внутриводного и донного льда. Данные о водо-ледяных потоках, имеющиеся в архивах ГУ Казселезащита и РГП Казгидромет, обобщены в монографии Т.Л. Киренской [29].

Результаты исследования

Для изучения условий формирования водо-ледяных селей применялся алгоритм «Random Forest – Случайный лес» для классификации погодных условий на метеостанции Алматы.

Задачей машинного обучения была классификация массива данных на два класса: наличие или отсутствие водо-ледяного селя. Входными переменными были: сумма среднесуточных отрицательных температур воздуха за предыдущие 5 дней, суточный градиент среднесуточной температуры воздуха, минимальная суточная температура воздуха, аномалия температуры воздуха. Всего для обучения взяты 2200 примеров из архива наблюдений на метеостанции г. Алматы за период 1985–2005 гг. [30]. Она расположена близко к реке Есентай и имеет длинные непрерывные ряды метеонаблюдений. Данные предгорных станций нельзя использовать, так как есть перерывы в рядах наблюдений.

В процессе обучения автоматически были выделены самые значимые прогностические предикторы и определена статистическая ошибка. Ошибки в пределах стандартного уровня значимости 0,05 (5 % – теоретическая вероятность

ошибки) говорят о статистической важности полученных результатов. Данные приведены в табл. 1. Программа автоматически объединила данные, определила пороговые значения метеозлементов. Были построены несколько вариантов «деревьев принятия решений» с различными заданными параметрами обучения, где пороговые значения для разделения могли отличаться от осредненных. Один из вариантов «деревья решений» приведен на рис. 3.

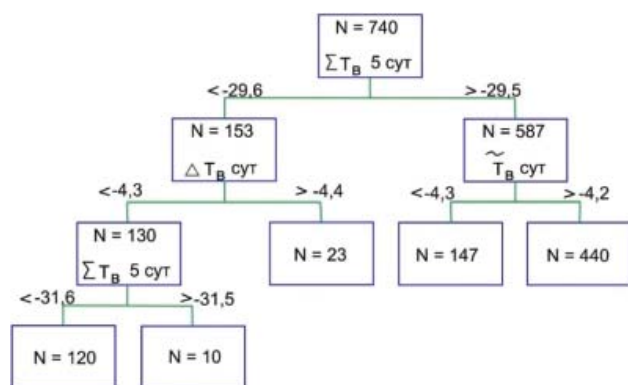


Рис. 3. Готовые деревья классификации, построенные искусственным интеллектом с применением алгоритма «Random Forest – Случайный лес»

Fig. 3. Ready-made classification trees built by artificial intelligence using the “Random Forest” algorithm

Более сложный процесс представляет интерпретация результатов моделирования. Программа строит множество вариантов «деревьев решений» с различными заданными параметрами обучения. Для человека, не знакомого с водо-ледяным явлением, сложно понять множество построенных «деревьев решений». Необходимо сопоставлять их с реальными наблюдениями и уже известными результатами. Интерес представляют 10 редких случаев, когда совпали 3 из 4-х параметров: значительная сумма отрицательных температур, большой суточный градиент температуры и аномалия температуры воздуха. Именно такая метеорологическая обстановка является самой опасной. Большинство случаев (587) программа отнесла к типовым условиям – небольшие средние температуры воздуха и суммы отрицательных температур. Дополнительно были выделены 130 и 147 случаев, когда наблюдалось сочетание 2 из 4-х метеорологических факторов.

Данные о пороговых значениях переменной близки к уже известным значениям, определенным учеными из РГП «Казгидромет» [11]. Программа еще раз подтверждает метеорологические условия образования водо-ледяных селевых пото-

ков. А минимальные статистические ошибки доказывают значимость результатов исследований.

Таблица 1. Результаты анализа архивных данных, полученные с помощью алгоритма «Случайный лес»

Table 1. Results of analysis of archived data obtained using the “Random Forest” algorithm

Важнейшие предикторы The most important predictors	
Метеопараметр Meteorological parameter	Процент влияния, % Percentage of influence
Суточный градиент температуры воздуха Daily air temperature gradient	100
Сумма температур воздуха предыдущие пять суток Sum of air temperatures of the previous five days	47
Аномалия среднесуточной температуры воздуха Anomaly of average daily air temperature	39
Средняя суточная температура воздуха Average daily air temperature	17
Точность работы модели/Model accuracy	
Ошибка Error	Значение value, °
Ошибка обучения/Training error	0,007
Ошибка тестирования/Testing error	0,006
Стандартная статистическая ошибка Standard statistical error	0,002
Пороговые значения/Threshold values	
Метеопараметр Meteorological parameter	Значение value, °
Суточный градиент температуры воздуха Daily air temperature gradient	3,3
Сумма температур воздуха предыдущие пять суток Sum of air temperatures of the previous five days	–43,9
Аномалия среднесуточной температуры воздуха Anomaly of average daily air temperature	–2,6
Средняя суточная температура воздуха Average daily air temperature	–8,4

Выводы

1. Проведенные авторами исследования помогают понять природу водо-ледяных селевых потоков. Алгоритмы машинного обучения являются хорошим инструментом при обработке статистических данных. Они позволяют найти зависимость, когда классические методы математической статистики не работают. В результате были выявлены метеорологические условия формирования водо-ледяных потоков, прошедших на горных реках Алматинской области.
2. Из-за редкой повторяемости этого явления не существует научно обоснованных методов прогнозирования. Известно только, что потоки формируются в периоды резкого потепления, когда в русле реки начинают разрушаться скопления внутриводного и донного льда. Поэтому определение критических значений метеозадающих элементов очень важно для дальнейшей разработки методов прогноза.
3. Перспективным направлением является применение методов машинного обучения для определения условий накопления и разрушения внутриводного и донного льда в руслах горных рек.

Список литературы

1. Чижев А.Н. Особенности загромождения на горных реках // Труды ГГИ. – 1972. – Вып. 192. – С. 44–52.
2. White D.C., Morrison R.R., Wohl E. Fire and ice: Winter flooding in a Southern Rocky Mountain stream after a wildfire // *Geomorphology*. – 2022. – V. 413. – P. 108370. ISSN 0169-555X. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108370>.
3. Tullos D., Byron E., Galloway G. et al. Review of challenges of and practices for sustainable management of mountain flood hazards // *Natural Hazards*. – 2016. – No. 83. – P. 1763–1797. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2400-3>.
4. Barrette P.D., Lindenschmidt K.-E. Frazil ice events: Assessing what to expect in the future // *Hydrology Research*. – 2023. – V. 54. – No. 6. – P. 770–781. <https://doi.org/10.2166/nh.2023.008>.
5. Ахмеджанова Х.А., Швер Ц.А. (ред.). Климат Алматы. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1985. – 266 с.
6. Shen H.T., Liu L. Shokotsu River ice jam formation // *Cold Regions Science and Technology*. – 2003. – V. 37. – Iss. 1. – P. 35–49. ISSN 0165-232X. [https://doi.org/10.1016/S0165-232X\(03\)00034-X](https://doi.org/10.1016/S0165-232X(03)00034-X).
7. Turcotte B., Morse B. Ice processes in a steep river basin // *Cold Regions Science and Technology*. – 2011. – V. 67. – Iss. 3. – P. 146–156. ISSN 0165-232X. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2011.04.002>.
8. Степанов Б.С. Транспортно-сдвиговый и сдвигово-эрозийный селевые процессы. В: Селевые потоки. – Москва: Гидрометеиздат, 1985. – № 9. – С. 3–16.
9. Яфязова Р.К. Природа селей Зайлийского Алатау. Проблемы адаптации. – Алматы, 2007. – 158 с.
10. Перов В.Ф. Селеведение. – Москва: Географический факультет МГУ, 2012. – 272 с.
11. Степанов Б.С., Яфязова Р.К., Жданов В.В. Водо-ледяные сели. К механизму формирования водо-ледяных конструкций // *Гидрометеорология и экология*. – 2009. – № 3. – С. 143–152.
12. Dubé M., Turcotte B., Morse B. Inner structure of anchor ice and ice dams in steep channels // *Cold Regions Science and Technology*. – 2014. – V. 106–107. – P. 194–206. ISSN 0165-232X. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2014.06.013>.
13. Barrette P.D. Understanding frazil ice: The contribution of laboratory studies // *Cold Regions Science and Technology*. – 2021. – V. 189. – P. 103334. ISSN 0165-232X. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2021.103334>.
14. Nafziger J., She Yu., Hicks F., Cunjak R.A. Anchor ice formation and release in small regulated and unregulated streams // *Cold Regions Science and Technology*. – 2017. – V. 141. – P. 66–77. ISSN 0165-232X. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.05.008>.
15. Боровиков В.П. Популярное введение в современный анализ данных и машинное обучение на Statistica. – Москва: Изд-во «Горячая линия – Телеком», 2018. – 354 с.
16. Schweizer M., Fohn P.M.B., Schweizer J. Integrating neural networks and rule based systems to build an avalanche forecasting system. In: M.H. Hamza (ed.), *Proc. IASTED Int. Conf.: Artificial Intelligence, Expert Systems and Neuronal Networks (4–6 July 1994)*. Zurich, Switzerland: International Association of Science and Technology for Development (IASTED), IASTED Acta Press, 1994. – P. 1–4.
17. Singh D., Ganju A. Expert system for prediction of avalanches research // *Communications current science*. – 2008. – V. 94. – No. 8. – P. 1076–1081.
18. Искусственный интеллект в решении актуальных социальных и экономических проблем XXI века: Материалы Четвертой всерос. науч.-практ. конф. (Пермь, 21–24 мая 2019 г.). – Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2019. – Ч. I. – 276 с.
19. Wang X., Qu Z., Tian F. et al. Ice-jam flood hazard risk assessment under simulated levee breaches using the random forest algorithm // *Natural Hazards*. – 2023. – No. 115. – P. 331–355. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05557-8>.

20. Моргоева А.Д., Моргоев И.Д., Ключев Р.В., Гаврина О.А. Прогнозирование потребления электрической энергии промышленным предприятием с помощью методов машинного обучения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 7. – Р. 115–125. <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/7/3527>.
21. Сайт российского представительства фирмы StatSoft. <http://www.StatSoft.ru> (дата обращения 20.01.2022 г.).
22. Баймолодаев Т., Виноходов В. «Казселезащита» – оперативные меры до и после стихии. – Алматы, 2007. – 284 с.
23. Бекенов К.А., Касенов М.К. Селевая безопасность. 50 лет деятельности Казселезащиты: итоги, эффективность, перспективы, 1973–2023 гг. – Алматы: Zialybaspany, 2023. – 208 с.
24. Бугаев В.А., Джорджио В.А. Синоптические процессы средней Азии. – Ташкент: АН УзССР, 1957. – 650 с.
25. Алхабаев Ш. Ледяная лавина снесла ограждение реки Есентай // Информационное агентство Tengrinews. https://tengrinews.kz/kazakhstan_news/ledyanaya-lavina-snesla-ograjdenie-reki-esentay-v-almaty-485966/ (дата обращения 13.12.2022 г.).
26. Мочалов В.П., Шевырталов Е.П. Краткие сведения о паводке на р. Малая Алматинка 28 ноября 1987 г. В: Селевые потоки. – Москва: Гидрометеиздат, 1989. – № 11 – С. 76–78.
27. Яфязова Р.К. О катастрофических явлениях на горных реках в зимний период // Гидрометеорология и экология. – 2005. – № 4. – С. 114–124.
28. Назаров Ц.А. Водно-селевые потоки на горных реках Казахстана. В: Труды координационных совещаний по гидротехнике. – Ленинград: Энергия, 1968. – Вып. 42. – С. 110–115.
29. Медеу А.Р., Баймолдаев Т.А., Киренская Т.Л. Селевые явления Юго-Восточного Казахстана: Антология селевых явлений и их исследования. – Алматы, 2016. – Т. 4. – Ч. 1. – 576 с.
30. Информация о погоде и климате по данным метеостанций. <http://www.rp5.ru> (дата обращения 20.12.2023 г.).

Reference

1. Chizhov A.N. Features of ice-jam formation on Mountain Rivers. *Proceedings of the State Hydrological Institute*, 1972, iss. 192, pp. 44–52.
2. White D.C., Morrison R.R., Wohl E. Fire and ice: Winter flooding in a Southern Rocky Mountain stream after a wildfire. *Geomorphology*, 2022, vol. 413, p. 108370. ISSN 0169-555X. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108370>.
3. Tullos D., Byron E., Galloway G. et al. Review of challenges of and practices for sustainable management of mountain flood hazards. *Natural Hazards*, 2016, no. 83, pp. 1763–1797. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2400-3>.
4. Barrette P.D., Lindenschmidt K.-E. Frazil ice events: Assessing what to expect in the future. *Hydrology Research*, vol. 54, no. 6, p. 770. <https://doi.org/10.2166/nh.2023.008>.
5. Akhmedzhanova Kh.A., Shver Ts.A. (ed.). *Climate of Almaty*. Leningrad: Hydro-meteopubl, 1985, 266 p.
6. Shen H.T., Liu L. Shokotsu River ice jam formation. *Cold Regions Science and Technology*, 2003, vol. 37, iss. 1, pp. 35–49. ISSN 0165-232X. [https://doi.org/10.1016/S0165-232X\(03\)00034-X](https://doi.org/10.1016/S0165-232X(03)00034-X).
7. Turcotte B., Morse B. Ice processes in a steep river basin. *Cold Regions Science and Technology*, 2011, vol. 67, iss. 3, pp. 146–156. ISSN 0165-232X. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2011.04.002>.
8. Stepanov B.S. Transport-shear and shear-erosion mudflow processes. In: *Mudflows*. Moscow: Hydro-meteopubl, 1985, no. 9, pp. 3–16.
9. Yafyazova R.K. *The nature of mudflows in the Trans-Ili Alatau. Problems of adaptation*. Almaty, 2007, 158 p.
10. Perov V.F. *Mudflows tutorial*. Moscow: Faculty of Geography of Moscow State University, 2012, 272 p.
11. Stepanov B.S., Yafyazova R.K., Zhdanov V.V. Ice-jamfloods. On the mechanism of formation of water-ice structures. *Hydrometeorology and ecology*, 2009, no. 3, pp. 143–152.
12. Dubé M., Turcotte B., Morse B. Inner structure of anchor ice and ice dams in steep channels. *Cold Regions Science and Technology*, 2014, vol. 106–107, pp. 194–206. ISSN 0165-232X. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2014.06.013>.
13. Barrette P.D. Understanding frazil ice: The contribution of laboratory studies. *Cold Regions Science and Technology*, 2021, vol. 189, p. 103334. ISSN 0165-232X. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2021.103334>.
14. Nafziger J., She Yu., Hicks F., Cunjak R.A.. Anchor ice formation and release in small regulated and unregulated streams. *Cold Regions Science and Technology*, 2017, vol. 141, pp. 66–77. ISSN 0165-232X. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.05.008>.
15. Borovikov V.P. *A popular introduction to modern data analysis and machine learning on Statistica*. Moscow: Publishing House “Hot Line – Telecom”, 2018, 354 p.
16. Schweizer M., Fohn P.M.B., Schweizer J. Integrating neural networks and rule based systems to build an avalanche forecasting system. In: M.H. Hamza (ed.), *Proc. IASTED Int. Cont.: Artificial Intelligence, Expert Systems and Neuronal Networks* (4–6 July 1994). Zurich, Switzerland: International Association of Science and Technology for Development (IASTED), IASTED Acta Press, 1994, pp. 1–4.
17. Singh D., Ganju A. Expert system for prediction of avalanches research. *Communications current science*, 2008, vol. 94, no. 8, pp. 1076–1081.

18. *Artificial intelligence in solving current social and economic problems of the 21st century: collection of articles: Materials from the Fourth All-Russian scientific-practical conf.* (Perm, May 21–24, 2019). Perm: Perm. State national research university, 2019, part I, 276 p.
19. Wang X., Qu Z., Tian F. et al. Ice-jam flood hazard risk assessment under simulated levee breaches using the random forest algorithm. *Natural Hazards*, 2023, no. 115, pp. 331–355. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05557-8>.
20. Morgoeva A.D., Morgoev I.D., Klyuev R.V., Gavrina O.A. Forecasting of electric energy consumption by an industrial enterprise using machine learning methods. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 7, pp. 115–125. <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/7/3527>.
21. *Website of the Russian representative office of StatSoft.* <http://www.StatSoft.ru> (Date of access: 01/20/2022).
22. Baimolodaev T., Vinokhodov V. “Kazselezashchita” – operational measures before and after the disaster. Almaty, 2007, 284 p.
23. Bekenov K.A., Kasenov M.K. *Mudflow safety. 50 years of Kazselezashchita's activities: results, efficiency, prospects. 1973–2023.* Almaty: Zialybacpasypubl, 2023, 208 p.
24. Bugaev V.A., Giorgio V.A. *Synoptic processes in Central Asia.* Tashkent: Academy of Sciences of the UzSSR, 1957, 650 p.
25. Alkhabaev Sh. An ice avalanche demolished the fences of the Esentai River. *Tengri news agency.* https://tengrinews.kz/kazakhstan_news/ledyanaya-lavina-snesla-ograjdenie-reki-esentay-v-almaty-485966/ (accessed 12/13/2022).
26. Mochalov V.P., Shevyrtalov E.P. Brief information about the flood on the river. *Malaya Almatinka* November 28, 1987. In: *Mudflows.* Moscow: Hydrometpubl, 1989, no. 11, pp. 76–78.
27. Yafyazova R.K. On catastrophic phenomena on mountain rivers in winter. *Hydrometeorology and Ecology*, 2005, no. 4, pp. 114–124.
28. Nazarov T.A. Mudflows on mountain rivers of Kazakhstan. In: *Proceedings of coordination meetings on hydraulic engineering.* Leningrad: Energy publ., 1968, iss. 42, pp. 110–115.
29. Medeu A.R., Baimoldaev T.A., Kirenskaya T.L. *Mudflow phenomena of South-East Kazakhstan: Anthology of mudflow phenomena and their research.* Almaty, 2016, vol. 4, part 1, 576 p.
30. *Information about weather and climate according to weather stations.* <http://www.rp5.ru> (Date of access: 12/20/2023).

Сведения об авторах

Благовещенский Виктор Петрович – доктор географических наук, главный научный сотрудник лаборатории природных опасностей, Институт географии и водной безопасности Республики Казахстан, Республика Казахстан, 050000, г. Алматы, пр. Сейфуллина, 458/1, victor.blagov@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-8032-283X>



Information about the authors

Viktor P. Blagoveshchensky – Dr. Sc., Chief Researcher of the Laboratory of Natural Hazards of the Institute of Geography and Water Security of the Republic of Kazakhstan, 458/1, Seifullina ave., Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, victor.blagov@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-8032-283X>

Жданов Виталий Владимирович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории природных опасностей, Институт географии и водной безопасности Республики Казахстан, Республика Казахстан, 050000, г. Алматы, пр. Сейфуллина, 458/1, Zhdanovitaliy@yandex.kz, <http://orcid.org/0000-0001-7678-1374>



Vitaly V. Zhdanov – Cand. Sc., Senior Researcher of the Laboratory of Natural Hazards of the Institute of Geography and Water Security of the Republic of Kazakhstan, 458/1, Seifullina ave., Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, Zhdanovitaliy@yandex.kz, <http://orcid.org/0000-0001-7678-1374>

Ранова Сандугаш Усеновна – кандидат географических наук, руководитель лаборатории природных опасностей, Институт географии и водной безопасности Республики Казахстан, Республика Казахстан, 050000, г. Алматы, пр. Сейфуллина, 458/1, Sandu2004@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6250-4341>



Sandugash U. Ranova – Cand. Sc., head of the laboratory of natural hazards of the Institute of Geography and Water Security of the Republic of Kazakhstan, 458/1, Seifullina ave., Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, Sandu2004@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6250-4341>

Автор-корреспондент: Жданов В.В., ZhdanovVitaliy@yandex.kz

Corresponding author: Zhdanov V.V., ZhdanovVitaliy@yandex.kz

Критерии авторства

Все авторы внесли равный вклад в подготовку статьи.

Contribution of the authors

All authors contributed equally to the preparation of the article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Получена редакцией 20.11.2024
Получена после рецензии 23.12.2024
Принята к печати 28.02.2025

Received: 20.11.2024
Revised: 23.12.2024
Accepted: 28.02.2025