

ГИДРОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 627.512; 556.535.2

DOI: 10.17072/2079-7877-2026-3-95-105

EDN: GRNTOW



**ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА
СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ ПАВОДКА,
СВЯЗАННОГО С ВОЗМОЖНЫМ ПРОРЫВОМ ВЕРХНЕГО АККОЛЬСКОГО ОЗЕРА
(ЮГО-ВОСТОЧНЫЙ АЛТАЙ)**

Павел Станиславович Бородавко¹, Екатерина Дмитриевна Корф¹✉, Елена Сергеевна Волкова¹,
Дмитрий Александрович Вершинин²

¹ Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской Академии наук, г. Томск, Россия

² Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

✉ korf-kat@mail.ru

Аннотация. Из числа опасных природных процессов, характерных для высокогорных регионов, особой катастрофичностью отличаются паводки, образующиеся при прорывах высокогорных приледниковых озер. Зачастую в зону их поражения попадают селитебные территории, сельскохозяйственные угодья, объекты энергетической и транспортной инфраструктуры. Как показывает опыт, выявление очагов гидрогенной угрозы, прогнозная оценка их развития и возможного негативного воздействия в большинстве случаев позволяют найти своевременные и правильные решения для устранения потенциальной природной опасности или смягчения ее последствий.

В процессе геоинформационного сравнительного анализа материалов аэрокосмической съемки сверхвысокого разрешения и полевых гидролого-геоморфологических исследований в бассейне р. Чаган-Узун (Южно-Чуйский хребет, Юго-восточный Алтай) выявлены признаки прорывоопасности приледникового Верхнего Аккольского озера. За период с 1952 по 2020 год геометрические характеристики водоема претерпели значительные изменения: увеличилась площадь акватории, изменился коэффициент изрезанности береговой линии. Озерная моренная плотина, сложенная ледистыми горными породами, стала активно подвергаться деструктивному воздействию поверхностного и подповерхностного термического карста, что в настоящее время негативно отражается на ее удерживающих свойствах. Посредством цифрового гидрологического моделирования, выполненного в программном комплексе HEC-RAS V 5.0.7, установлены основные гидрометрические параметры и зоны воздействия прорывного паводка. На основе полученных данных рассчитан интегральный социально-экономический ущерб, составляющий 760 млн руб.

Для предотвращения негативных социальных и эколого-экономических последствий, связанных с возможным катастрофическим паводком, предложен комплекс мер, включающий организацию наземного мониторинга уровня озера и подпруживающей его дамбы, инженерное понижение уровня водоема, разработку системы информационного оповещения населения потенциально паводковой зоны о неблагоприятном развитии ситуации и действиях при возникновении угрозы катастрофы.

Ключевые слова: приледниковые озера, цифровое моделирование, катастрофический прорыв, Алтай, оценка последствий

Финансирование. Исследование выполнено в рамках государственного задания Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН.

Для цитирования: Бородавко П. С., Корф Е. Д., Волкова Е. С., Вершинин Д. А. Цифровое моделирование и оценка социально-экономических последствий паводка, связанного с возможным прорывом верхнего Аккольского озера (юго-восточный Алтай) // Географический вестник = Geographical bulletin. 2026. № 3(78) С. 95–105. EDN: GRNTOW DOI: 10.17072/2079-7877-2026-3-95-105



HYDROLOGY

Original article

DOI: 10.17072/2079-7877-2026-3-95-105

EDN: GRNTOW

DIGITAL MODELING AND ASSESSMENT OF THE SOCIOECONOMIC CONSEQUENCES OF A POTENTIAL OUTBURST FLOOD FROM UPPER AKKOL LAKE, SOUTH-EASTERN ALTAI

Pavel S. Borodavko¹, Ekaterina D. Korf¹ ✉, Elena S. Volkova¹, Dmitriy A. Vershinin²¹ Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia² Tomsk State University, Tomsk, Russia

✉ korf-kat@mail.ru

Abstract. Glacial lake outburst floods (GLOFs) represent the most destructive manifestation of high-mountain geohazards, with impact zones frequently encompassing residential areas, agricultural lands, and critical energy and transport infrastructure. Empirical evidence demonstrates that identifying sources of glacio-hydrological threats and forecasting their evolution enables timely decision-making for either eliminating potential natural hazards or mitigating their consequences.

This study presents a geo-informatic comparative analysis of ultra-high-resolution remote sensing data integrated with field-based hydrological and geomorphological surveys conducted in the Chagan-Uzun River basin (South Chuya Range, South-Eastern Altai). The investigation revealed distinct indicators of instability at Upper Akkol proglacial lake. Between 1952 and 2020, the reservoir underwent significant geometric transformation characterized by an expansion of water surface area and alterations to its shoreline development ratio. The lacustrine moraine dam, composed of ice-rich bedrock, is currently subjected to intensified degradation from both surface and subsurface thermal karstification, which critically compromises its retention capacity. Primary hydrometric parameters and spatial exposure zones associated with an outburst flood were established through digital hydraulic modeling performed in HEC-RAS V 5.0.7. Based on these simulation outputs, the integral socioeconomic damage was quantified at 760 million RUB.

To prevent adverse social, ecological, and economic impacts associated with a potential catastrophic GLOF event, a comprehensive mitigation framework is proposed. This strategy encompasses the following measures: the establishment of continuous ground-based monitoring of the lake level and retaining dyke; engineering-driven drawdown of the reservoir volume; the implementation of a targeted public information system designed to alert residents within the potentially affected zone to unfavorable developments and prescribed emergency response protocols.

Keywords: glacial lakes, outburst flood, GLOF, digital modeling, Altai, impact assessment

Funding. The study was carried out as part of the state assignment of the Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Borodavko P. S., Korf E. D., Volkova E. S., Vershinin D. A. Digital modeling and assessment of the socioeconomic consequences of a potential outburst flood from Upper Akkol Lake, South-Eastern Altai. *Geographical Bulletin*, 2026, no. 3(78), pp. 95–105. EDN: GRNTOW DOI: 10.17072/2079-7877-2026-3-95-105

Введение

Фиксируемые климатические изменения последнего столетия и обусловленный ими апслифтинг гидротермических поясов, величина которого на Алтае достигла 180–200 м, повлекли за собой существенные и необратимые изменения в ландшафтной структуре высокогорий [6; 8]. Подчиняясь глобальным климатическим тенденциям, оледенение Алтая с максимума Малой ледниковой эпохи находится в стадии устойчивой регрессии, а ледники его основных центров демонстрируют отрицательный баланс массы и уменьшают занимаемую площадь [3; 5; 18; 20].

Процесс современной деградации оледенения Алтая сопровождается формированием приледниковых озер (моренных, морено-подпрудных, зандровых), количество которых возрастает пропорционально темпам сокращения оледенения [15]. Выполненный нами анализ данных космического мониторинга за полувекской период показал, что часть приледниковых озер значительно увеличила площадь своей акватории, что является одним из признаков их нестабильности и прорывоопасности [16; 17].

Прорывы приледниковых озер вызывают катастрофические паводки и сели, способные нанести серьезный ущерб находящимся ниже по течению объектам инфраструктуры, сельского хозяйства и даже повлечь человеческие жертвы [6; 19; 21]. Ярким примером таких процессов в горах Алтая стали наводнения, вызванные прорывами приледниковых озер в 1998 г. (озеро Камрю), 2000 г. (озеро Турой), 2012 г. (Маашейское озеро). Опасность подобных явлений в Русском Алтае сохраняется и возрастает, о чем свидетельствует образование новых ледниковых озер в результате деградации оледенения.

Материалы и методы

Объект исследования – бассейн реки Чаган-Узун, который находится в юго-восточной части Русского Алтая на северо-восточном макросклоне Южно-Чуйского хребта (рис. 1). Бассейн охватывает площадь 1170 км². Верхняя часть бассейна характеризуется высокогорным альпийским типом рельефа с повсеместным

Гидрология

Бородавко П. С., Корф Е. Д., Волкова Е. С., Вершинин Д. А.

распространением современных ледниковых форм и отложений. Центральная и нижняя части бассейна представлены среднегорным эрозионно-аккумулятивным рельефом с формами и отложениями древней ледниковой аккумуляции [7]. Река Аккол, длина которой составляет 20 км, берет начало с Софийского ледника – одного из крупнейших ледников в центральной части Южно-Чуйского хребта [1]. Аккол соединяется с рекой Караюк и образует реку Чаган. На расстоянии 40 км от истока реки Талтура и Чаган сливаются и образуют р. Чаган-Узун. Чаган-Узун является левым притоком Чуи (рис. 1).

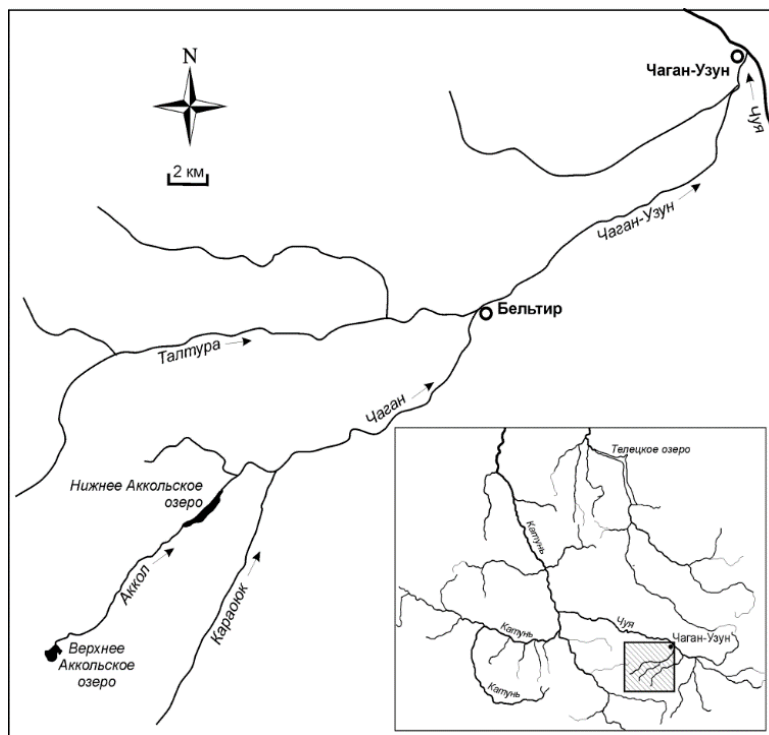


Рис. 1. Схема основных элементов гидросети бассейна р. Чаган-Узун с указанием его местоположения
Fig. 1. Schematic map of the principal hydrographic network elements within the Chagan-Uzun River basin, indicating its geographical location

Верхнее Аккольское озеро было открыто и нанесено на карту профессором Томского Императорского университета В. В. Сапожниковым в 1898 г. во время летних экспедиционных исследований в Юго-восточном и Центральном Алтае. В конце XIX века озеро представляло собой сравнительно небольшой и достаточно мелководный водоем, непосредственно примыкающий к языку Софийского ледника (рис. 2). За прошедшее столетие озеро значительно увеличилось в размерах, в настоящее время площадь его акватории составляет 0,4 км², а расстояние до ледника достигло 1,8 км.

Батиметрическая съемка Верхнего Аккольского озера выполнена 25 июля 2023 г. с использованием сонара Garmin Echo MAP 54 по 542 точкам зондирования. Результаты эхолотирования обрабатывались в приложении Garmin Quickdraw Contours, на основании чего была построена карта глубин водоема и рассчитан его объем – 5,43*10⁶ м³.

Верхнее Аккольское озеро занимает небольшую экзарационную котловину и подпруживается проксимальным валом краевого моренного комплекса Софийского ледника, сформированного в Малую ледниковую эпоху [12]. В настоящее время поверхностный сток из озера осуществляется по эрозионному каналу вдоль левого борта долины. С середины октября по май озеро покрыто льдом. Максимальный уровень озера (2450 м н. у. м.), связанный с периодом активной абляции Софийского ледника, устанавливается в первой декаде июля и остается почти неизменным до середины августа. Температура воды колеблется от 2 до 6° С с максимальным прогревом поверхностного слоя в середине июля.

Моренный комплекс, подпруживающий Верхнее Аккольское озеро, достигает 80 м высоты и представлен сложной системой серповидных гряд, занимающих всю донную часть долины на протяжении 1,5 км. Литология моренных гряд достаточно разнообразна и варьирует от суглинков, песка и гравия, до крупных валунов и глыб. Петрографический состав моренных отложений однотипен и в основном представлен серыми гнейсами с незначительной долей метаморфических сланцев. Характерной особенностью внутреннего строения комплекса является наличие блоков погребенного «мертвого льда». Вследствие его подповерхностного таяния рельеф морен осложняется термокарстовыми депрессиями, частично занятыми небольшими по площади озерами. Вода в депрессиях скапливается за счет таяния погребенных льдов, слагающих днища и борта понижений, а также стока талых и дождевых вод со склонов водосборных бассейнов. Площадь водосборов озер весьма невелика и

Гидрология

Бородавко П. С., Корф Е. Д., Волкова Е. С., Вершинин Д. А.

составляет 0,01–0,1 км². Большинство термокарстовых озер моренного комплекса не имеет стока, и их объемы не превышают первых сотен кубических метров. Термическое и абразионное воздействие озерных вод на берега, сложенные льдистыми отложениями, приводит к их разрушению и отступанию, что затем провоцирует увеличение размеров термокарстовых депрессий и площадей термокарстовых озер.

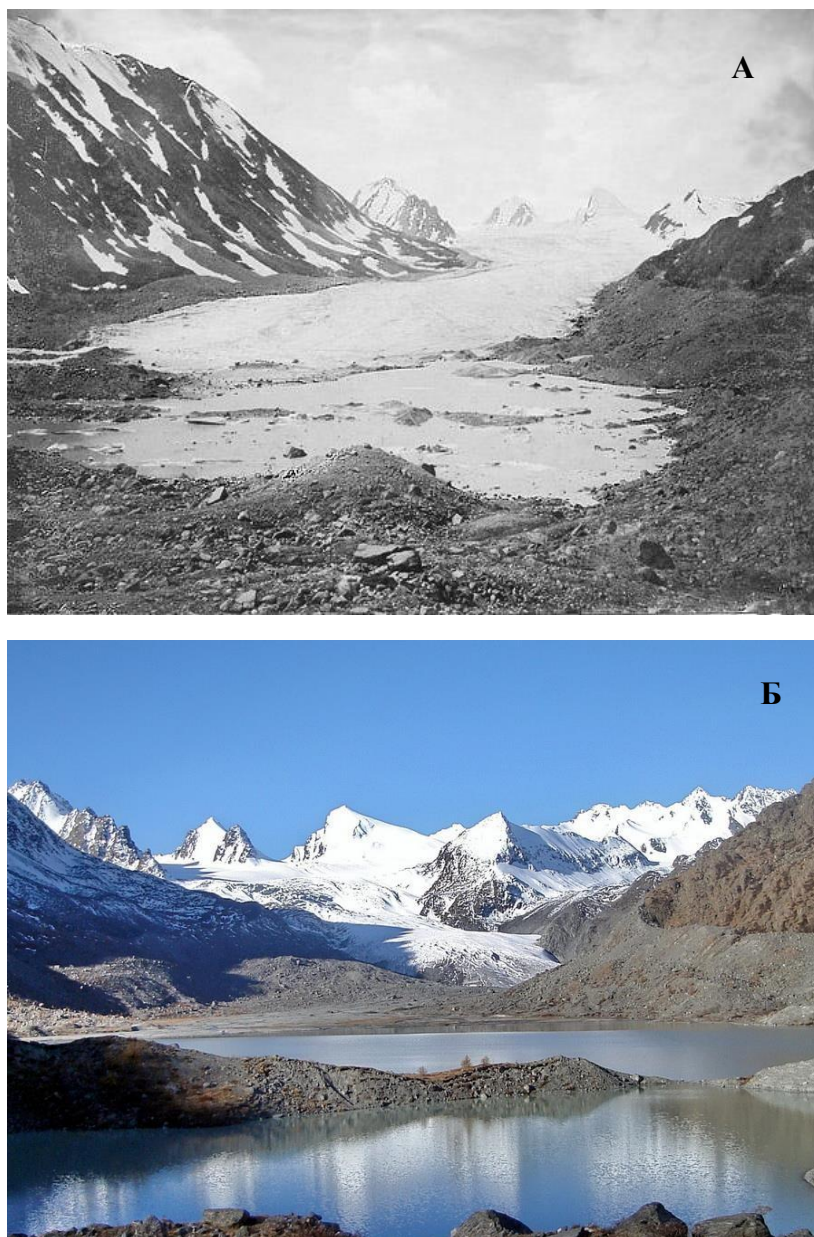


Рис. 2. А – Верхнее Аккольское озеро на начальной стадии формирования. Фото В. В. Сапожникова, 1898 г.;

Б – современный вид озера. Фото П. С. Бородавко, сентябрь 2022 г.

Fig. 2. А – Upper Akkol Lake at the initial stage of formation. Photo by V. V. Sapozhnikov, 1898;

Б – modern view of the lake. Photo by P. S. Borodavko, September 2022

Для количественного анализа пространственных изменений геометрических характеристик озерной системы в верховьях р. Аккол использованы фрагменты спутниковых снимков WorldView-3,4 (2012, 2020), КН-4 (1966) и материалы аэрофотосъемки 1952 г. Картографирование выполнено в ГИС-пакете Microdem/TerraBase II V16.0 [13] оцифровкой в ручном режиме по растровым подложкам летних безоблачных снимков в формате GeoTiff, приведенных к единой картографической проекции (45 зона UTM, WGS 84).

Гидрология

Бородавко П. С., Корф Е. Д., Волкова Е. С., Вершинин Д. А.

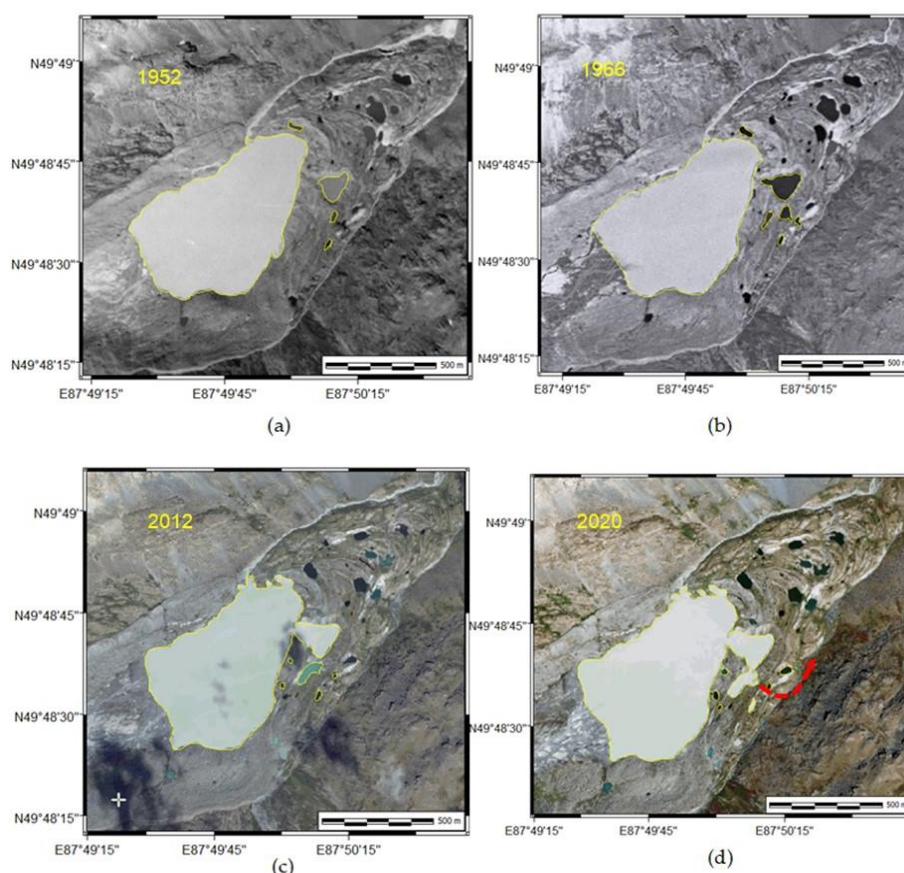


Рис. 3. Изменения границ акваторий Верхнего Аккольского озера и термокарстовых водоемов краевого моренного комплекса Софийского ледника с 1952 по 2020 г.: (a) в 1952 г.; (b) в 1966 г.; (c) в 2012 г.; (d) в 2020 г.

Красная стрелка показывает местоположение предполагаемого прорыва

Fig. 3. Changes in the boundaries of Upper Akkol Lake and thermokarst water reservoirs within the marginal moraine complex of the Sofiyskiy Glacier from 1952 to 2020: (a) 1952; (b) 1966; (c) 2012; (d) 2020.

The red arrow indicates the location of a potential outburst breach.

Как видно на рисунке 3, постепенное расширение акваторий термокарстовых озер, наиболее близко расположенных к Верхнему Аккольскому озеру, привело к их объединению в единый водоем и формированию залива, глубоко вдающегося в моренный комплекс. Дальнейшее развитие термокарстовых и термоэрозионных процессов в этой части моренного комплекса неизбежно повлечет за собой формирование прорыва в моренной дамбе (указано красной пунктирной стрелкой на рис. 3(d)), а также катастрофическое опорожнение озера.

Цифровое моделирование прорывного наводка. Моделирование прорыва Верхнего Аккольского озера выполнено на основе цифровых моделей рельефа ASTER Global DEM и Multi-Error-Removed Improved-Terrain (Merit DEM). Для уточнения конфигурации русел рек использовались топографические карты Государственного ГИС-Центра в масштабе 1:25 000 и мозаики спутниковых снимков из общедоступных картографических сервисов («Яндекс Карты», Google maps) с пространственным разрешением до 0,8 м. Доработка первичных пространственных данных выполнялась в программном комплексе Autodesk Civil 3D. В этом же комплексе объединенная и уточненная цифровая модель рельефа экспортировалась в систему HEC-RAS V 5.0.7, где с помощью инструмента Geometric data на цифровую модель рельефа была нанесена расчетная сетка 2D-ячеек и заданы параметры коэффициентов шероховатости. Общее количество ячеек для 10-метровой регулярной сетки составило 1098 тыс. при длине смоделированного участка долины 60 км. Коэффициент Маннинга, равный 0,035, использовался для всех клеток на основе руководства [9; 19]. В процессе моделирования было построено несколько вариантов 2D-моделей как для отдельных участков долины рек Аккол, Чаган, Талтура, Чаган-Узун и Чуя, так и для всего участка от Верхнего Аккольского озера до створа на р. Чуя ниже пос. Чаган-Узун.

Для моделирования паводка был применен метод неуставившегося движения воды путем задания гидрографа стока во входных створах моделей в период максимальной водности с дискретностью 1 час в течение 100 часов т.е. чуть более 4-х суток. Максимальные расходы реки Чаган у пос. Бельтир наблюдаются в июле и составляют в среднем, $25\text{--}35 \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$ с максимумом за весь период наблюдений в $65,5 \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$. Расходы реки Талтура

Гидрология

Бородавко П. С., Корф Е. Д., Волкова Е. С., Вершинин Д. А.

составляют в среднем 60 % расходов р. Чаган. В расчетный гидрограф вошли реальные расходы воды, наблюдавшиеся в период параллельных наблюдений на р. Чаган и р. Талтуре. Расходы реки Чуи измерялись в створе у пос. Чаган-Узун и в период летних паводков составили $60\text{--}120 \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$. Смоделировано несколько сценариев мгновенных сбросов озерной системы в долине р. Аккол (Верхнего и Нижнего Аккольских озер). Общий объем воды в озерах составляет 7,3 млн м^3 . Наиболее неблагоприятным является сценарий полного сброса всей озерной системы в течение 4-х часов с постоянным расходом воды $492 \text{ м}^3 / \text{с}^{-1}$.

Стоимостная оценка потенциального ущерба. Для определения стоимостной оценки затрат на работы и мероприятия по предотвращению и ликвидации негативного воздействия паводковых вод использована методика, разработанная в 2006 г. Федеральным государственным унитарным предприятием «Всероссийский научно-исследовательский институт экономики минерального сырья и недропользования» [4]. Удельные базовые показатели для определения стоимости ущерба от негативного воздействия вод были рассчитаны в ценах на 2006 г. Вероятностный ущерб был приведен в соответствии с ценами января 2023 г. с учетом коэффициента индекса потребительских цен, который по данным Росстата для Республики Алтай составил 6,24. Стоимостные показатели затрат на мероприятия по предотвращению и ликвидации последствий прорывного паводка рассчитывались при условии восстановления имущества юридических и физических лиц, здоровья граждан и затратами, связанными с аварийно-спасательными работами, потерей продукции и т.д. Прогнозируемый экономический ущерб определялся как возможный (вероятный) ущерб по состоянию социального и экономического развития района на перспективу при отсутствии превентивных защитных мероприятий.

Общая сумма экономического ущерба от негативного воздействия вод определяется по формуле 1:

$$Y_{\text{п}}^{\text{н}} = Y_{\text{оф}} + Y_{\text{обф}} + Y_{\text{п}} + Y_{\text{ас}} + Y_{\text{с}} + Y_{\text{в}} + Y_{\text{к}}^{\text{н}} + Y_{\text{пр}}^{\text{н}}, \quad (1)$$

где: $Y_{\text{оф}}$ – ущерб от повреждения и выбытия основных производственных фондов (разрушение зданий, коммуникаций, сооружений, потери машин и оборудования, смыв многолетних насаждений, гибель скота и т.д.); $Y_{\text{обф}}$ – ущерб от повреждений и выбытия оборотных фондов (сырье, топливо, полуфабрикаты, семенной фонд и т.д.); $Y_{\text{п}}$ – ущерб от потери готовой промышленной и сельскохозяйственной продукции; $Y_{\text{ас}}$ – ущерб, включающий затраты на проведение аварийно-спасательных работ (учитываются затраты на работу спасательных отрядов (чел./руб.) в зависимости от количества местного населения) и затраты на эвакуацию населения; $Y_{\text{с}}$ – ущерб от потерь личной собственности граждан и собственности населенного пункта; $Y_{\text{в}}$ – ущерб, включающий затраты на восстановление разрушенных зданий, сооружений, коммуникаций, оборудования; $Y_{\text{к}}^{\text{н}}$ – косвенный ущерб рассчитывается с учетом коэффициента от суммы прямого ущерба, взятого за величину 0,02, и включает ущерб от потерь упущенной выгоды из-за потери стоимости нереализованной промышленной и сельскохозяйственной продукции и прибыли, отсюда потери налогов в бюджет как с торговли, так и с предприятий и сельскохозяйственных земель, непосредственно поврежденных наводнением и затоплением; $Y_{\text{пр}}^{\text{н}}$ – прочий неучтенный ущерб, который включает социально-экономический ущерб, равный сумме потерь чистого продукта в сфере производства вследствие повышенной заболеваемости населения, увеличения выплат из фонда социального страхования и т.д., этот вид ущерба рассчитывался с учетом коэффициента 0,2 от суммы прямого ущерба.

Результаты и их обсуждение

В процессе моделирования установлено, что при выходе волны паводка на участок расширения долины р. Чаган (1–6 км выше пос. Бельтир) ширина потока увеличится до 200–500 м, глубины изменятся от 0,5–1,0 до 2,5–3,5 м, а скорости течения возрастут до 4,0 м/с. При этом в поселке Бельтир в зоне затопления окажется несколько домовладений, в некоторых из них глубины достигнут 1,2 м, а ширина разлива р. Чаган-Узун на отдельных участках превысит 500 м (рис. 4А). В узкой части долины реки Чаган-Узун, ниже пос. Бельтир, уровни воды на пике паводка повысятся на 1,0–2,0 м, скорости течения увеличатся более чем вдвое – от 1,8–2,2 до 4,5–5,0 м/с; в расширении речной долины максимальные скорости течения возрастут от 1,3–1,5 до 2,5–3,0 м/с, а ширина потока изменится от 150–200 до 400–500 м. У поселка Чаган-Узун отметки водной поверхности на пике паводка повысятся на 1,3–1,5 м, и около 134,5 тыс. м^2 территории поселка может оказаться в зоне затопления (рис. 4Б).

В случае реализации рассматриваемого сценария в пос. Бельтир в зоне подтопления окажутся домохозяйства, расположенные на левом берегу р. Чаган-Узун и скотоводческие фермы в долинах Аккола и Чаган-Узуна. В поселке Чаган-Узун в зону паводка попадают школа и детский сад, фельдшерско-акушерский пункт, участковый пункт полиции, юрточный туристский комплекс Номад, гостевой дом Синегорье, магазин и защитные береговые укрепления на пойме Чуи и Чаган-Узуна. Из значимых инженерных сооружений в зоне воздействия катастрофического паводка окажется четыре моста у пос. Чаган-Узун и пос. Бельтир (табл.).

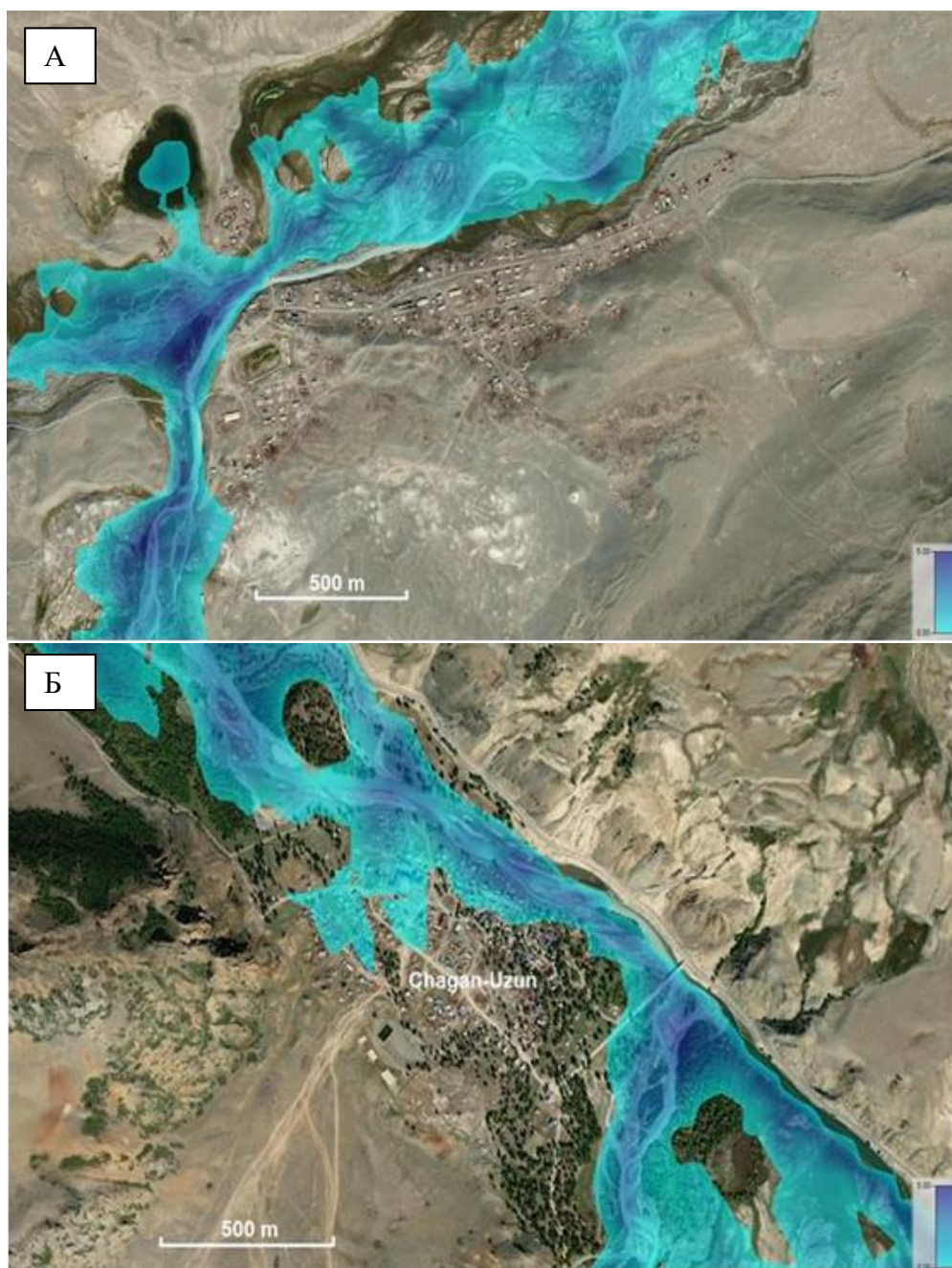


Рис. 4. А – зона разлива при прохождении пика паводка у пос. Бельтир;

Б – зона разлива при прохождении пика паводка в пос. Чаган-Узун

Fig. 4. A – flood inundation zone during peak discharge near the settlement of Beltir;

Б – flood inundation zone during peak discharge in the settlement of Chagan-Uzun.

Расчеты, проведенные на основе мультикритериального анализа, показали, что экономическая составляющая общей суммы возможного ущерба составит 768,64 млн руб. (рис. 5). Значительный урон будет нанесен жилому фонду, приусадебным участкам и объектам инфраструктуры, поскольку для их восстановления потребуется сумма в 93,46 млн руб. На реконструкцию мостов и автодорог понадобится более 66 млн руб., а на восстановление объектов социальной инфраструктуры – 12,43 млн руб. Экономический ущерб, связанный с потерями участков для выпаса скота и повреждениями лесного массива, согласно расчетам по предлагаемой методике, может превышать 5 млн руб.

Отдельной статьей стоят затраты, связанные с работами по проведению аварийно-спасательных работ – более 300 млн руб. К ним отнесены мероприятия по проведению спасательных работ, эвакуации и реэвакуации населения и выплаты компенсаций за утрату жилища (рис. 6).

Полный ущерб значительно увеличится за счет экологической составляющей, поскольку ценность некоторых природных объектов сложно оценить в денежном эквиваленте. Так, при худшем сценарии могут быть

Гидрология

Бородавко П. С., Корф Е. Д., Волкова Е. С., Вершинин Д. А.

утрачены реликтовая тополиянная роща в устье р. Чаган-Узун, хвойный лес у подножия г. Сукур и геологический памятник природы с обнажением позднечетвертичных озерно-ледниковых отложений в долине Чаган-Узуна. Кроме того, существенно пострадает и без того обедненный почвенный покров, а также сократятся пастбищные угодья.

Учитывая высокую степень опасности прорыва Верхнего Аккольского озера, нами разработан и рекомендован к применению комплекс превентивных мер по предотвращению негативных социальных и эколого-экономических последствий, связанных с возможным катастрофическим паводком. В первую очередь, необходимо организовать наземный мониторинг текущего состояния водоема и подпирающей его дамбы; в зимнее время провести инженерные работы по снижению уровня озера посредством поэтапного углубления русла истока, выработанного в трудноразмываемых породах, слагающих левый борт долины р. Аккол; профильным отделам администрации Кош-Агачского района разработать систему информационного оповещения населения потенциальной паводковой зоны о неблагоприятном развитии ситуации и действиях при возникновении угрозы катастрофы.

Таблица

Table

Основные характеристики для оценки ущерба от паводка, вызванного прорывом Верхнего Аккольского озера
Damage assessment criteria for an Upper Akkol Lake outburst flood

Показатели	Значение
Численность населения, оказавшегося в зоне затопления, чел.	480
Количество населенных пунктов, попавших в зону затопления	2
Площадь поселков, оказавшихся в зоне затопления, м ²	176500
Количество жилых домов, попавших в зону затопления	32
Площадь жилых домов, оказавшихся в зоне затопления, м ²	2250
Количество объектов инфраструктуры, оказавшихся в зоне затопления	6
Площадь объектов инфраструктуры, оказавшихся в зоне затопления, м ²	2415
Протяженность автомобильных дорог, попавших в зону затопления (в том числе внутри поселковых), км	1625
Объекты туризма	1
Дамба земляная с сооружениями, км	1180
Мосты автодорожные, км	205
Площадь затопленных сельхозугодий, м ²	882000
Лесной массив, м ²	45200

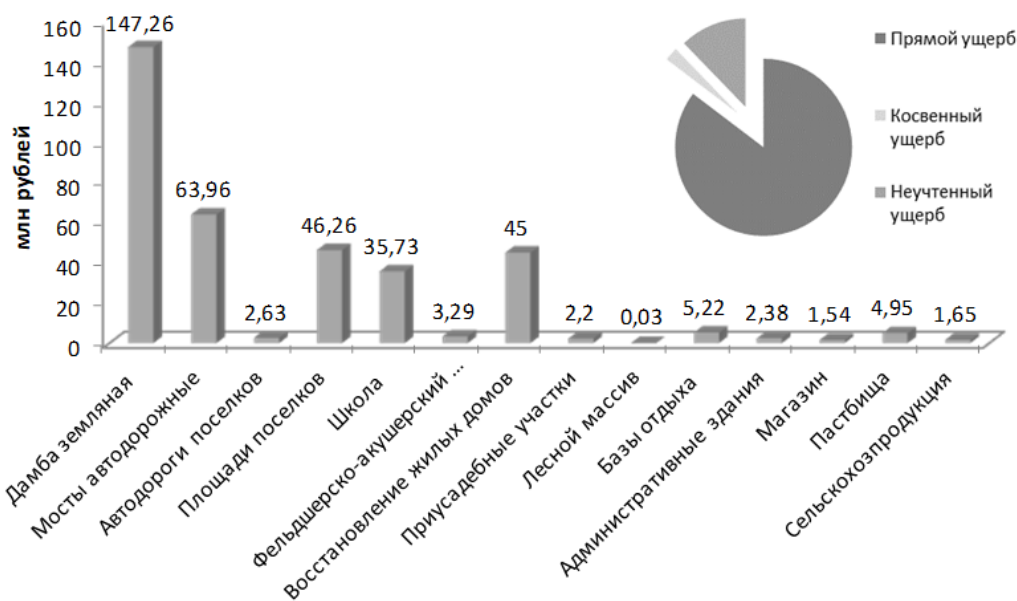


Рис. 5. Оценка потенциального ущерба населению при прорыве Верхнего Аккольского озера
Fig. 5. Assessment of potential impacts on the population from an outburst flood originating in Upper Akkol Lake

Гидрология

Бородавки П. С., Корф Е. Д., Волкова Е. С., Вершинин Д. А.

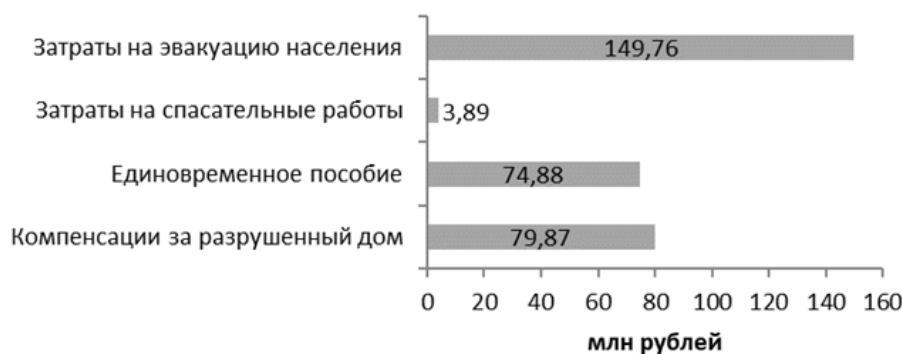


Рис. 6. Оценка аварийно-спасательных работ при прорыве Верхнего Аккольского озера

Fig. 6. Cost assessment of disaster relief operations following an Upper Akkol Lake outburst

Выводы

В результате полевых гидролого-геоморфологических исследований и компаративного ГИС-анализа материалов аэрокосмической съемки выявлен ряд признаков, указывающих на высокую вероятность прорыва приледникового Верхнего Аккольского озера. Цифровое моделирование прорывного паводка показало, что в случае реализации одного из неблагоприятных сценариев (при полном сбросе озерной системы Аккола в течение 4-х часов с постоянным расходом воды $492 \text{ м}^3/\text{с}^{-1}$) населенные пункты и объекты инфраструктуры в нижней части бассейна р. Чаган-Узун окажутся в зоне воздействия паводка, что приведет к серьезным социально-экономическим последствиям. Предварительные расчеты показали, что общая сумма возможного ущерба может составить 768,64 млн руб. Предложенные нами превентивные меры являются необходимыми шагами для снижения риска возможной катастрофы и минимизации потенциального ущерба, а результаты и методы выполненного исследования могут быть использованы для оценки и управления рисками в других аналогичных ситуациях, способствуя повышению безопасности населения и сбалансированному развитию горных территорий.

Библиографический список

1. Агатова А. Р., Ван Х., Мистрюков А. А. Динамика ледника Софийского (Юго-Восточный Алтай): последний ледниковый максимум – 20 век // Геоморфология и палеогеография. 2002. № 2. С. 92–105. EDN: MQDWWT
2. Бирюков Е. С., Терентьев Н. Е. К оценке экономического ущерба от наводнений в России и потенциала адаптации к ним // Теория и практика общественного развития. 2024. № 11. С. 162–168. DOI: 10.24158/tpor.2024.11.19 EDN: CJHMLM
3. Ганюшкин Д. А., Банцев Д. В., Грига С. А., Деркач Е. С., Останин О. В., Горбунова Ю. А., Распутина В. А., Чистяков К. В. Сокращение ледников Южно-Чуйского хребта (Алтай) с максимума малого ледникового периода // Лёд и снег. 2024. № 4. С. 497–512. DOI: 10.31857/S2076673424040024 EDN: HTXSDDL
4. Методика оценки вероятностного ущерба от вредного воздействия вод и оценки эффективности осуществления превентивных водохозяйственных мероприятий. М.: ФГУП «ВИЭМС», 2006. 97 с.
5. Носенко Г. А., Никитин С. А., Хромова Т. Е. Изменение площади и объёма ледников Горного Алтая (Россия) с середины XX в. по данным космических съёмок // Лёд и Снег. 2014. № 54(2). С. 5–13. EDN: SGPNVL
6. Ротанова И. Н., Харламова Н. Ф., Останин О. В. Изменения климата Алтая за период инструментальных исследований // Известия Алтайского государственного университета. 2012. Т. 2, № 3. С. 105–109. EDN: PMDMKH
7. Савельева П. Ю. Картографирование геоморфологического строения верхнего течения р. Чаган-узун (Юго-Восточный Алтай) // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2019. Т. 24, № 4. С. 162–175. DOI: 10.33764/2411-1759-2019-24-4-162-175 EDN: VBJTMM
8. Сухова М. Г., Модина Т. Д. Современные изменения температурного режима воздуха и режима увлажнения на Алтае, как проявление регионального изменения климата // Мир науки, культуры, образования. 2007. № 2. С. 14–18. EDN: ICIPFL
9. Юдина В. А., Черноморец С. С., Севернюк Е. А., Крыленко И. В., Кидяева В. М. Особенности моделирования прорыва ледникового озера на примере озера Варшезкуль Нижнее (Таджикистан) // Географический вестник = Geographical bulletin. 2024. № 1(68). С. 59–70. DOI: 10.17072/2079-7877-2024-1-59-70 EDN: QHLJRF
10. Arcement G., Schneider V. Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains: U.S. Geological survey water supply paper 2339. U.S.: Government printing office, 1989. 38 p.
11. Clague J. J., O'Connor J. E. Glacier-Related Outburst Floods // Snow and Ice-Related Hazards, Risks, and Disasters. 2020. P. 487–519. DOI: 10.1016/b978-0-12-394849-6.00014-7 EDN: XYQLPF
12. De Smedt B., Pattyn F. Numerical modelling of historical front variations and dynamic response of Sofiyskiy glacier, Altai mountains, Russia // Annals of Glaciology. 2003. No. 37. P. 143–149. DOI: 10.3189/172756403781815654 EDN: MFZXDL
13. Guth P. Geomorphometry in MicroDEM // Developments in Soil Science. 2009. Vol. 33. P. 351–366. DOI: 10.1016/S0166-2481(08)00015-9
14. Haeberli W., Buetler M., Huggel C., Friedli T. L., Schaub Y., Schleiss A. J. New Lakes in Deglaciating High-Mountain Regions // Opportunities and Risks. Climatic Change. 2016. No. 139(2). P. 201–214. DOI: 10.1007/s10584-016-1771-5 EDN: YCXXET
15. Rasputina V. A., Pryakhina G. V., Ganyushkin D. A., Bantsev D. V., Paniutin N. A. The water level regime of periglacial lakes during the growth stage (the lakes of the Tavan-Bogdo-Ola mountain massif, South-Eastern Altai) // Ice and Snow. 2022. No. 62(3). P. 441–454. DOI: 10.31857/S2076673422030143 EDN: JGOYAU

Гидрология

Бородавко П. С., Корф Е. Д., Волкова Е. С., Вершинин Д. А.

16. Rinzin S., Zhang G., Wangchuk S. Glacial Lake Area Change and Potential Outburst Flood Hazard Assessment in the Bhutan Himalay // *Frontiers in Earth Science*. 2021. Vol. 9, No. 775195. DOI: 10.3389/feart.2021.775195 EDN: MAUKWD
17. Shugar D. H., Burr A., Haritashya U. K., Kargel J. S., Watson C. S., Kennedy M. C. Rapid Worldwide Growth of Glacial Lakes since 1990 // *Nature Climate Change*. 2020. No. 10(10). P. 939–945. DOI: 10.1038/s41558-020-0855-4 EDN: GJLEIZ
18. Surazakov A. B., Aizen V. B., Aizen E. M., Nikitin S. A. Glacier changes in the Siberian Altai Mountains, Ob river basin (1952–2006) estimated with high resolution imagery // *Environmental Research Letters*. 2007. No. 2. DOI: 10.1088/1748-9326/2/4/045017 EDN: LKICMV
19. Taylor C., Robinson T. R., Dunning S., Carr J. R., Westoby M. Glacial Lake outburst floods threaten millions globally // *Nature Communication*. 2023. Vol. 14. P. 1–10. DOI: 10.1038/s41467-023-36033-x EDN: WYHLUZ
20. Toropov P. A., Aleshina M. A., Nosenko G. A., Khromova T. E., Nikitin S. A. Modern Deglaciation of the Altai Mountains: Effects and Possible Causes // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2020. Vol. 45. P. 368–376. DOI: 10.3103/S1068373920050088 EDN: MJJTHO
21. Wilson R., Glasser N. F., Reynolds J. M., Harrison S., Anaconda P. I., Schaefer M. Glacial Lakes of the Central and Patagonian Andes // *Global and Planetary Change*. 2018. No. 162. P. 275–291. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2018.01.00 EDN: MCMJGX

References

1. Agatova A. R., Van Kh., Mistryukov A. A. Dinamika lednika Sofiiskogo (Yugo-Vostochnyi Altai): poslednii lednikovyi maksimum – 20 vek [Dynamics of the Sofiysky Glacier (South-Eastern Altai): Last Glacial Maximum – 20th Century]. *Geomorphology and Paleogeography*, 2002, no. 2, pp. 92–105. (In Russ.) EDN: MQDWWT
2. Biryukov E. S., Terentyev N. E. Towards the Assessment of Economic Damage from Floods in Russia and the Potential for Adaptation. *Theory and Practice of Social Development*, 2024, no. 11, pp. 162–168. (In Russ.) DOI: 10.24158/tipor.2024.11.19 EDN: CJHMLM
3. Ganyushkin D. A., Bantsev D. V., Griga S. A., Derkach E. S., Ostanin O. V., Gorbunova Y. A., Rasputina V. A., Chistyakov K. V. Reduction of glaciers of the South Chuya Range (Altai) since the maximum of the Little Ice Age. *Ice and Snow*, 2024, no. 4, pp. 497–512. (In Russ.) DOI: 10.31857/S2076673424040024 EDN: HTXSDL
4. Metodika otsenki veroyatnostnogo ushcherba ot vrednogo vozdeystviya vod i otsenki effektivnosti osushchestvleniya preventivnykh vodokhozyaistvennykh meropriyatii [Methodology for assessing the probabilistic damage caused by harmful water effects and evaluating the effectiveness of preventive water management measures]. Moscow: FGUP «VIEMS», 2006. 97 p. (In Russ.)
5. Nosenko G. A., Nikitin S. A., Khromova T. E. Izmenenie ploshchadi i ob'ema lednikov Gornogo Altaya (Rossiya) s serediny KHKH v. po dannym kosmicheskikh s"emok [Changes in the area and volume of glaciers in the Altai Mountains (Russia) since the mid-20th century based on space imagery]. *Ice and Snow*, 2014, no. 54(2), pp. 5–13. (In Russ.) EDN: SGPNVL
6. Rotanova I. N., Kharlamova N. F., Ostanin O. V. Izmeneniya klimata Altaya za period instrumental'nykh issledovaniy [Changes in the Altai Climate during the Instrumental Research Period]. *Izvestiya of Altai State University*, 2012, vol. 2, no. 3, pp. 105–109. (In Russ.) EDN: PMDMKH
7. Saveleva P. Yu. Mapping of the geomorphological structure of the upper reaches of the chagan-uzun river (south-eastern Altai). *Vestnik SSUGT*, 2019, vol. 24, no. 4, pp. 162–175. (In Russ.) DOI: 10.33764/2411-1759-2019-24-4-162-175 EDN: VBJTMK
8. Sukhova M. G., Modina T. D. Modern Changes in the Temperature and Moisture Regime in the Altai Region as a Manifestation of Regional Climate Change [Modern changes in the air temperature and humidity regime in Altai as a manifestation of regional climate change]. *The world of science, culture and education*, 2007, no. 2, pp. 14–18. (In Russ.) EDN: ICIPFL
9. Iudina V. A., Chernomorets S. S., Savernyuk E. A., Krylenko I. V., Kidyayeva V. M. The features of a glacial lake outburst modeling: a case study of Varshezkul Lower (Tajikistan). *Geographical Bulletin*, 2024, no. 1(68), pp. 59–70. (In Russ.) DOI: 10.17072/2079-7877-2024-1-59-70 EDN: QHLJRF
10. Arcement G., Schneider V. Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains: U.S. Geological survey water supply paper 2339. U.S.: Government printing office, 1989. 38 p.
11. Clague J. J., O'Connor J. E. Glacier-Related Outburst Floods. *Snow and Ice-Related Hazards, Risks, and Disasters*, 2020, pp. 487–519. DOI: 10.1016/b978-0-12-394849-6.00014-7 EDN: XYQLPF
12. De Smedt B., Pattyn F. Numerical modelling of historical front variations and dynamic response of Sofiyskiy glacier, Altai mountains, Russia. *Annals of Glaciology*, 2003, no. 37, pp. 143–149. DOI: 10.3189/172756403781815654 EDN: MFZXDL
13. Guth P. Geomorphometry in MicroDEM. *Developments in Soil Science*, 2009, vol. 33, pp. 351–366. DOI: 10.1016/S0166-2481(08)00015-9
14. Haeberli W., Buetler M., Huggel C., Friedli T. L., Schaub Y., Schleiss A. J. New Lakes in Deglaciating High-Mountain Regions. *Opportunities and Risks. Climatic Change*, 2016, no. 139(2), pp. 201–214. DOI: 10.1007/s10584-016-1771-5 EDN: YCXXET
15. Rasputina V. A., Pryakhina G. V., Ganyushkin D. A., Bantsev D. V., Paniutin N. A. The water level regime of periglacial lakes during the growth stage (the lakes of the Tavan-Bogdo-Ola mountain massif, South-Eastern Altai). *Ice and Snow*, 2022, no. 62(3), pp. 441–454. DOI: 10.31857/S2076673422030143 EDN: JGOYAU
16. Rinzin S., Zhang G., Wangchuk S. Glacial Lake Area Change and Potential Outburst Flood Hazard Assessment in the Bhutan Himalay. *Frontiers in Earth Science*, 2021, vol. 9, no. 775195. DOI: 10.3389/feart.2021.775195 EDN: MAUKWD
17. Shugar D. H., Burr A., Haritashya U. K., Kargel J. S., Watson C. S., Kennedy M. C. Rapid Worldwide Growth of Glacial Lakes since 1990. *Nature Climate Change*, 2020, no. 10(10), pp. 939–945. DOI: 10.1038/s41558-020-0855-4 EDN: GJLEIZ
18. Surazakov A. B., Aizen V. B., Aizen E. M., Nikitin S. A. Glacier changes in the Siberian Altai Mountains, Ob river basin (1952–2006) estimated with high resolution imagery. *Environmental Research Letters*, 2007, no. 2. DOI: 10.1088/1748-9326/2/4/045017 EDN: LKICMV
19. Taylor C., Robinson T. R., Dunning S., Carr J. R., Westoby M. Glacial Lake outburst floods threaten millions globally. *Nature Communication*, 2023, vol. 14, pp. 1–10. DOI: 10.1038/s41467-023-36033-x EDN: WYHLUZ

Гидрология

Бородавко П. С., Корф Е. Д., Волкова Е. С., Вершинин Д. А.

20. Toropov P. A., Aleshina M. A., Nosenko G. A., Khromova T. E., Nikitin S. A. Modern Deglaciation of the Altai Mountains: Effects and Possible Causes. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2020, vol. 45, pp. 368–376. DOI: 10.3103/S1068373920050088 EDN: MJJTHO

21. Wilson R., Glasser N. F., Reynolds J. M., Harrison S., Anaconda P. I., Schaefer M. Glacial Lakes of the Central and Patagonian Andes. *Global and Planetary Change*, 2018, no. 162, pp. 275–291. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2018.01.00 EDN: MCMJGX

Статья поступила в редакцию: 02.10.25, одобрена после рецензирования: 21.05.26, принята к опубликованию: 12.09.26.

The article was submitted: 02 October 2025; approved after review: 21 May 2026; accepted for publication: 12 September 2026.

Информация об авторах

Павел Станиславович Бородавко

Кандидат географических наук,
заведующий лабораторией динамики
и устойчивости экосистем, Институт мониторинга
климатических и экологических систем
Сибирского отделения Российской Академии наук.
634055, Россия, Томск, пр. Академический 10/3.
Доцент кафедры краеведения и туризма,
Национальный исследовательский
Томский государственный университет.
634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 36.

e-mail: pvlborodavko@gmail.com

Екатерина Дмитриевна Корф

Кандидат географических наук,
младший научный сотрудник лаборатории динамики и
устойчивости экосистем, Институт мониторинга
климатических и экологических систем
Сибирского отделения Российской академии наук,
634055, Россия, Томск, пр. Академический 10/3.

e-mail: korf-kat@mail.ru

Елена Сергеевна Волкова

Кандидат географических наук,
старший научный сотрудник лаборатории геоэкологии
и динамики геосистем, Институт мониторинга
климатических и экологических систем Сибирского
отделения Российской академии наук,
634055, Россия, Томск, пр. Академический 10/3

e-mail: elevolko@yandex.ru

Дмитрий Александрович Вершинин

Кандидат географических наук,
доцент кафедры гидрологии,
Национальный исследовательский
Томский государственный университет.
634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 36.

e-mail: daversh@mail.ru

Information about the authors

Pavel S. Borodavko

Candidate of Geographical Sciences,
Head of the Laboratory of Ecosystem Dynamics and
Stability, Institute of Monitoring of Climatic and
Ecological Systems of the Siberian Branch of the
Russian Academy of Sciences;
10/3, prospekt Akademicheskyy, Tomsk, 634055, Russia
Associate Professor, Department of Regional Studies
and Tourism, Tomsk State University;
36, prospekt Lenina, Tomsk, 634050, Russia

Ekaterina D. Korf

Candidate of Geographical Sciences, Junior Researcher,
Laboratory of Ecosystem Dynamics and Stability,
Institute of Monitoring of Climatic and Ecological
Systems of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences;
10/3, prospekt Akademicheskyy, Tomsk, 634055, Russia

Elena S. Volkova

Candidate of Geographical Sciences, Senior Researcher,
Laboratory of Geoecology and Geosystem Dynamics,
Institute of Monitoring of Climatic and Ecological
Systems of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences;
10/3, prospekt Akademicheskyy, Tomsk, 634055, Russia

Dmitriy A. Vershinin

Candidate of Geographical Sciences, Associate
Professor, Department of Hydrology,
Tomsk State University;
36, prospekt Lenina, Tomsk, 634050, Russia

Вклад авторов

Бородавко П. С. – идея, общее научное редактирование статьи, сбор и анализ данных, создание картографического материала.

Корф Е. Д. – анализ результатов, библиография, оформление статьи.

Волкова Е. С. – научное редактирование статьи, обработка и анализ данных, оформление статьи.

Вершинин Д. А. – обработка материала, визуализация данных, гидрологическое моделирование

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors

Pavel S. Borodavko – the idea; general scientific editing of the article; data processing and analysis; cartographic data creation.

Ekaterina D. Korf – analysis of the results; bibliography; design of the article.

Elena S. Volkova – scientific editing of the article; data processing and analysis; design of the article.

Dmitriy A. Vershinin – data processing; data visualization; hydrological modeling.

Conflict of interest. The authors declare that there is no conflict of interest.