

Научно-практическая статья/Research article

УДК 528.94(571.5)

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-66-74>

Картографирование наводнений на основе геоморфометрического анализа ЦМР (на примере р. Баргузин, бассейн оз. Байкал)

А. Н. Бешенцев^{1✉}, Т. А. Борисова¹

¹Байкальский институт природопользования СО РАН, г. Улан-Удэ, Российская Федерация,
e-mail: abesh@mail.ru

Аннотация. В статье представлены результаты геоморфометрического анализа рельефа для определения и картографирования параметров наводнений в бассейне реки Баргузин. В программной среде Saga GIS создана цифровая модель рельефа (ЦМР). Автоматизированный анализ индексов рельефа и экспертное дешифрирование разновременных снимков Landsat позволили дифференцировать территорию бассейна на однородные гидрологические участки, характеризующиеся схожими физико-географическими параметрами развития наводнений. Картографирование зоны затопления выполнено в программной среде ArcGIS на основании топографической основы масштаба 1 : 100 000. В качестве гидрологической информации использованы результаты обработки фондовых материалов многолетних (1936–2015 гг.) наблюдений наводнений на р. Баргузин. Для получения абсолютных отметок границ зон затоплений сделана выборка максимальных уровней по многолетним рядам наблюдений, использованы расчетные уровни воды в створах, полученные с помощью кривых распределения ежегодных вероятностей превышения максимальных уровней воды дождевых паводков для гидрологических постов. Составлены карты средних уровней воды и площадей затопления территории. Для картографической оценки риска от наводнений использовался вероятностно-площадной подход. Составлены частные карты и интегральная карта рисков.

Ключевые слова: р. Баргузин, наводнение, цифровая модель рельефа, геоморфометрический анализ, опасность, риск

Для цитирования:

Бешенцев А. Н., Борисова Т. А. Картографирование наводнений на основе геоморфометрического анализа ЦМР (на примере р. Баргузин, бассейн оз. Байкал). *Вестник СГУГиТ*. 2026. Т. 31, № 4. С. 66–74. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-66-74>

Flood mapping based on geomorphometric analysis of a digital elevation model: a case study of the Barguzin River basin, Lake Baikal

A. N. Beshentsev^{1✉}, T. A. Borisova¹

¹ Baikal Institute of Nature Management SB RAS, Ulan-Ude, Russian Federation
e-mail: abesh@mail.ru

Abstract. The article presents the results of a geomorphometric analysis conducted to identify and map flood characteristics within the Barguzin River basin. A digital elevation model was generated using the SAGA GIS environment. Automated analysis of topographic indices, combined with expert interpretation of multitemporal Landsat imagery, enabled the basin to be subdivided into homogeneous hydrological areas with comparable physiographic conditions governing flood development. Flood-inundation mapping was performed in ArcGIS using a 1:100,000-scale topographic map. The hydrological inputs comprised processed archival records from long-term observations of floods on the Barguzin River for the period 1936–2015. Elevation values for flood boundaries were derived from the maximum water levels recorded in the historical series. In addition, design water levels at gauging stations were incorporated; these were calculated using exceedance-probability curves for annual maximum rainfall-induced flood stages recorded at hydrological monitoring posts. Maps of mean water levels and flood-inundation extents were subsequently produced. Territorial exposure to flood risk was assessed using a probabilistic area-based approach. As a result, a set of thematic maps and an integrated flood-risk map for the Barguzin River basin were compiled.

Keywords: Barguzin River, flood, digital elevation model, geomorphometric analysis, danger, risk

For citation:

Beshentsev A. N., Borisova T. A. (2026) Flood mapping based on geomorphometric analysis of a digital elevation model: a case study of the Barguzin River basin, Lake Baikal. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 4. pp. 66–74. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-66-74>

Введение

Наводнения представляют собой наиболее повторяющуюся, слабо прогнозируемую и приводящую к значительным ущербам природную опасность для жизнедеятельности общества. Примером тому служат экстремальные наводнения в Иркутской области в 2019 г. [1–3], в нижнем течении р. Амур в 2019 г. [4, 5], на реках Урал и Иртыш в 2024 г. [6]. Во всех случаях объявляются ЧС различного уровня, происходит эвакуация людей, подсчитываются ущербы. Территория бассейна оз. Байкал представляет собой широкую арену для ряда опасных гидрологических процессов и явлений, изучение которых имеет значимый научно-практический интерес для целей эффективного территориального управления и минимизации рисков от их воздействий.

Одним из водных объектов, на которых регистрируются периодические наводнения с затоплением и подтоплением прибрежных территорий и расположенных на них хозяйственных объектов, является бассейн р. Баргузин (бассейн оз. Байкал). Для точной метрической оценки параметров наводнений и минимизации ущербов для хозяйственно освоенных территорий необходимо комплексное изучение гидрологических показателей рек бассейна, физико-географических характери-

стик территории, прежде всего рельефа, определение пространственно-временных закономерностей прохождения наводнений в бассейне и оценка риска от возможных затоплений территории.

Целью исследования является регистрация планово-высотных параметров наводнений на основе геоморфометрического анализа ЦМР для геоинформационного картографирования и оценки возможных рисков при их прохождении в бассейне р. Баргузин.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования является бассейн р. Баргузин. Верховье реки и ее притоки характеризуются как горные, в среднем-нижнем течении река приобретает характер горно-равнинной. На территории бассейна р. Баргузин располагаются два крупных административных сельских района Республики Бурятия (Баргузинский и Курумканский). Крупными населенными пунктами являются центры с. Курумкан и с. Баргузин, а также промышленный (бывший завод по переработке рыбы) пос. Усть-Баргузин, села Майск, Юбилейный (бывшие центры по лесозаготовке и переработке) (рис 1, а). Остальные поселения имеют преимущественно сельскохозяйственную направленность. Большинство сельскохозяй-

ственных объектов (овцеводческие товарные фермы (ОТФ), летники, сенокосные и пастбищные угодья) размещается на затопляемой пойме р. Баргузин – на самых продуктивных сельскохозяйственных землях районов.

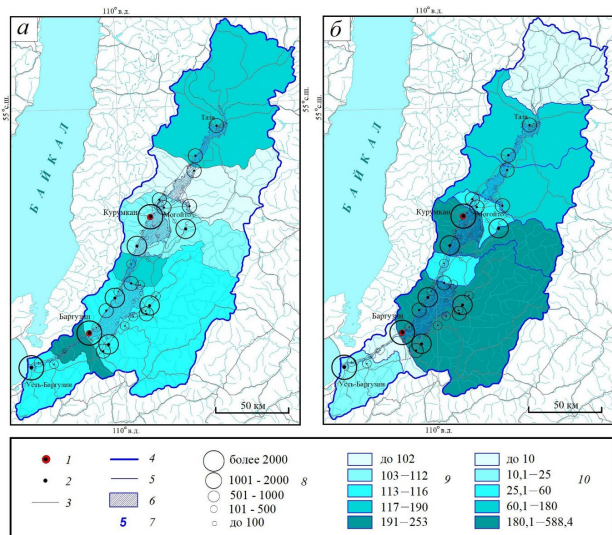


Рис. 1. Опасность наводнений в бассейне р. Баргузин:

а) величина наводнений; б) площадь наводнений; 1 – центры административных районов; 2 – прочие населенные пункты; 3 – автомобильные дороги; 4 – граница бассейна; 5 – границы участков; 6 – зона затопления; 7 – номер участка; 8 – численность населения в населенных пунктах, чел.; 9 – уровень воды над поймой, см; 10 – площадь наводнения, км²

Архивные исторические материалы свидетельствуют о периодических наводнениях на реке и сходе селевых потоков на горных притоках. Как показывает статистика с момента организации гидрологических постов, катастрофические наводнения зарегистрированы в 1933, 1936, 1938, 1949, 1971, 1973, 1988 гг. и значительные – в 1940, 1942, 1947, 1948, 1966, 1975, 1984, 1985, 1986, 2019, 2022 гг. Селевые паводки зафиксированы на правобережных (склоны Баргузинского хребта) притоках в 1961, 1970, 1975 гг.; на левобережных (склоны Икатского хребта) – в 1957, 1964, 1967, 1970, 1971, 1978 гг. Ущерб

были нанесены сельскохозяйственной отрасли, поскольку большинство ОТФ, летников, зимников, сенокосных и пастбищных угодий размещаются на затопляемой пойме.

В исследовании применены стандартные статистические методы обработки гидрологической информации, картографический метод, приемы экспертного и автоматизированного дешифрирования спутниковых материалов, геоморфометрический анализ, геоинформационная технология. Картографирование зон затопления выполнено в программной среде ArcGIS на основании дешифрирования разновременных спутниковых материалов Landsat [7] и топографической основы масштаба 1 : 100 000 КБ «Панорама» [8]. В качестве гидрологической информации для получения абсолютных отметок границ зон затоплений проведен анализ и сделана выборка максимальных уровней по многолетним рядам наблюдений, использованы расчетные уровни воды в створах, полученные с помощью кривых распределения ежегодных вероятностей превышения максимальных уровней воды дождевых паводков для уровневых гидрологических постов. Данные предоставлены Гидрометцентром РБ [9]. В целом для бассейна, отдельных его участков, а также небольших населенных пунктов, не располагающих гидрометрическими постами, определение максимальных уровней проведено методом интерполяции с учетом продольного профиля и падения реки.

Для визуализации рельефа местности и последующей оценки формирования и развития наводнений создана цифровая модель рельефа (ЦМР) (рис. 2, а). Для создания производных покрытий и расчета морфометрических индексов в ArcGIS использован алгоритм Zevenbergen-Thorne [10] эффективность и достоверность которого подтверждена другими исследованиями [11,12]. В данном проекте для создания ЦМР бассейна р. Баргузин использовались векторные слои горизонталей (высота сечения рельефа 20 м), отметок высот и урезов воды топографической основы масштаба 1 : 100 000 КБ «Панорама».

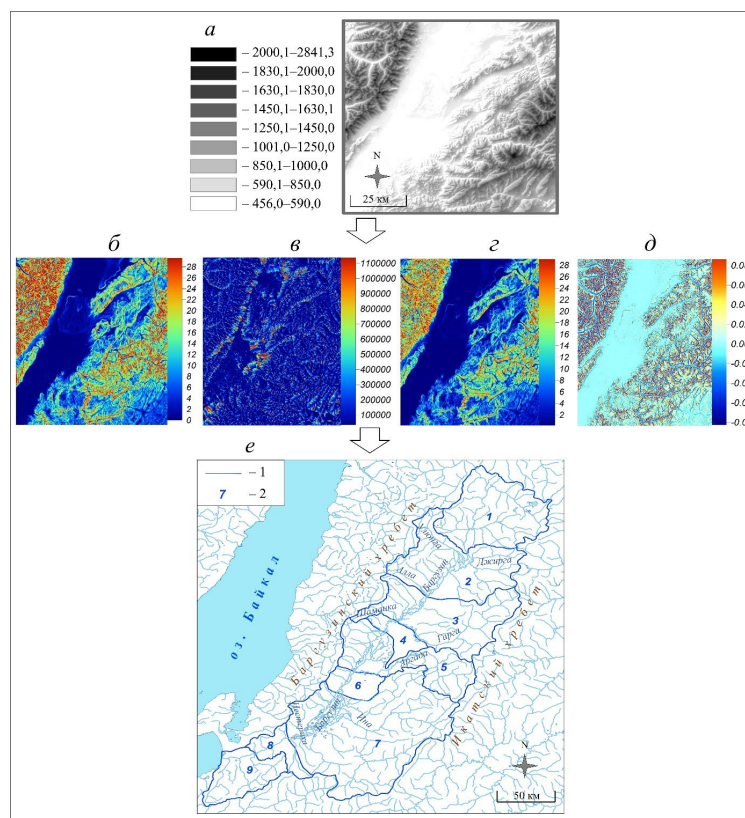


Рис. 2. Методика геоморфометрического анализа для геоинформационной диагностики наводнений:

а) цифровая модель рельефа (фрагмент); б) индекс уклона рельефа; в) индекс аккумуляции потока; г) индекс потенциала плоскостной эрозии; д) индекс баланса геомасс; е) гидрологические участки; 1 – границы гидрологических участков, 2 – номера гидрологических участков

Выделение и точную оценку планово-высотных параметров рельефа на земной поверхности обеспечил геоморфометрический анализ [13–15], который является эффективным методом при оценке влияния рельефа на функционирование геосистем. В данном исследовании использовались геометрические параметры рельефа – индексы программной среды Saga GIS [16], характеризующие особенности морфологии территории и определяющие скорость и интенсивность потоков вещества и энергии, а также динамику склоновых процессов. К этой группе относятся: высота рельефа; уклон рельефа; индекс баланса геомасс; индекс расчлененности рельефа; индекс аккумуляции потока; индекс потенциала плоскостной эрозии; индекс мощности эрозии (см. рис. 2, б–д).

В результате совмещения ЦМР и векторных слоев карты «Ландшафты Восточной Сибири» [17] выполнен экспертный ланд-

шафтно-гидрологический анализ, позволивший установить гидрологические особенности и морфологию котловины и провести укрупненное деление территории бассейна р. Баргузин на отдельные топологические единицы – гидрологические участки с характерными геоморфологическими параметрами и природными условиями, способствующими формированию и развитию наводнений (см. рис. 2, е). Созданное векторное покрытие гидрологических участков является основой для последующего картографирования опасности наводнений и их рисков для хозяйства и населения.

Для картографической оценки риска от наводнений использовался вероятностно-площадной подход [18, 19]. Показатель «удельный физический риск» используется при сравнительной оценке и характеризует удельные потери с единицы площади в пределах оцениваемой территории за единицу времени и рассчитывается по формуле:

$R(sf) = P(H) \times V(H)$, где $P(H)$ – частота возникновения опасности; $V(H)$ – уязвимость территории, определяемая по формуле: $V(H) = S(H) \div S(T)$, где $S(H)$ – площадь поражения опасностью; $S(T)$ – общая площадь оцениваемой территории. Этот показатель важен для расчетов вероятных ущербов от наводнений – экономический риск и сельскохозяйственный риск. Затем численные показатели рисков переведены в баллы по пятиступенчатой шкале – очень высокий, высокий, средний, низкий, очень низкий [20].

Результаты и обсуждение

Показатель «величина наводнений» индивидуален для каждой реки и определяется гидрологическими условиями и морфологией долины (см. рис. 1, а). Он рассчитан как разница максимального подъема уровня воды над критическим уровнем выхода воды на пойму [20]. Вероятная граница площади затопления рассчитывается на основе показателя величины наводнений по топографической основе и разновременным космическим снимкам (см. рис. 1, б).

Уровни воды в р. Баргузин по исследуемым гидрологическим постам составляют от 111 до 253 см. Максимальные значения характерны для периода летних паводков. Исключительные подъемы отмечаются на отдельных участках в местах сужения долины и неразвитой поймы. Превышение уровня воды выше критических отметок может достигать около 0,8–0,9 м, в среднем течении – 0,3–0,5 м и в устьевой части до 0,8 м вследствие подпора уровнем Байкала. Средние наводнения встречаются с вероятностью до 0,2–0,3 м, при которых затоплению подвергаются сельскохозяйственные угодья и отдельные объекты инфраструктуры, и экстремальные 0,04–0,1 м с масштабным затоплением хозяйственных объектов.

Формирование наводнений начинается в верховьях р. Баргузин. Превышение критического уровня здесь составляет 0,8–0,9 м. При выходе в котловину происходит распластывание воды по пойме и уровни резко падают. Значительное воздействие на развитие экстремальных паводков оказывают ее левобережные и правобережные притоки в котловинной части. Причем основные левобереж-

ные притоки (рр. Аргада, Гарга, Ина) вносят весьма существенный вклад в формирование наводнений. Так, максимальный срочный расход р. Аргада составляет 557 м³/с (1978 г.); р. Ина достигает 1390 м³/с (1970 г.) при среднемноголетнем 513 м³/с. Но тем не менее, правобережные притоки многочисленны (более 30 постоянных и временных горных водотоков восточного крутого склона Баргузинского хребта), они в сумме дают также большой объем водной массы. Следует отметить, что в многоводные годы прослеживается синхронность паводочных пиков на левобережных и правобережных притоках.

Горный рельеф, резкие уклоны предопределяют моментальный подъем воды по притокам, с быстрым сбросом воды в долину. Однако, вследствие регулирующей функции поймы, интенсивность подъема уровня во время паводков на р. Баргузин составляет в среднем 1,0–1,5 м/сутки, спада 0,7–1,0 м/сутки. Подъем воды по времени колеблется от 3–7 до 10 и более дней (1973 г. – 19 дней), спад – 10–17 дней. Продолжительность стояния высоких отметок в пределах от 8–10 дней до 22 и более, может достигать 32 суток (1971, 1973 гг.).

В верховьях в условиях резко расчлененного горного рельефа, больших уклонов, узких долин (восточный склон Баргузинского хребта и западный склон Икатского хребта) происходит быстрый сброс воды – показатели опасности высокие, но зоны затопления незначительны. В котловинной части при резком расширении долины в условиях ее низкой равнинности с высокой степенью заболоченности и заозерности (естественная зарегулированность) происходит распластывание потока по пойме, уровни воды падают, но при этом резко увеличиваются размеры затоплений. Уровни воды в котловинной части реки повышаются на двух участках – в местах сужения поймы вследствие прижимов и дополнительного привноса водной массы рек Шаманка, Гарга и других притоков, а также р. Аргада. При выходе из котловины в условиях узкой долины, ограниченной отрогами Голондинского и Баргузинского хребтов, уровни высокие, зоны затопления незначительны. В устьевой части при выходе реки на небольшую прибрежную низменность, распо-

ложенную вокруг Баргузинского залива, паводочные пики несколько сглаживаются, но вследствие подпора (зарегулированности озера и подъема уровня) происходит нарушение естественного стока и при высоких уровнях воды в реке усиливаются процессы заболачивания и подтопления прибрежных территорий.

Установлено, что в результате максимальных наводнений площадь территорий, подверженная затоплению, достигает 1 457,2 км², что составляет 6,9 % территорий бассейна. Совмещение слоев гидрологических участков [21] и зоны затопления со слоем сельскохозяйственных угодий позволило установить, что всего в среднем затопляется 34,4 км² пашни, 407,4 км² сенокоса, 405,6 км² пастбища. Наибольшему затоплению подвержены земли котловинной части – участки 2, 3, 5, 7. Наибольшая площадь пашни подвержена затоплению на гидрологических участках 3, 5, 7. Затопление пастбищ происходит на участках 2, 5, 7, сенокоса – на участках 3, 5, 7. По причине отсутствия леса в котловинной части бассейна затоплению подвержены небольшие колки, больше всего лесной растительности затопляется на участке 2. Затоплению и подтоплению подвергаются более 30 населенных пунктов. Площади земель населенных пунктов составляют 8 км² (рис. 3, а, б).

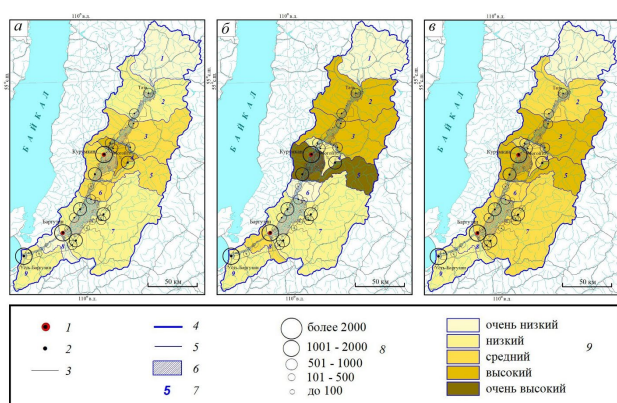


Рис. 3. Риски при прохождении наводнений на р. Баргузин:

а) индивидуальный риск; б) сельскохозяйственный риск; в) интегральный риск; 1 – центры административных районов; 2 – прочие населенные пункты; 3 – автомобильные дороги; 4 – граница бассейна; 5 – границы участков; 6 – зона затопления; 7 – номер участка; 8 – численность населения в населенных пунктах, чел.; 9 – удельный риск

Результаты расчетов за весь период исследования показывают, что в среднем при наводнениях в бассейне поражается около 219 км²/год. Высокие показатели отмечаются в котловинной части реки на участках 5 (67 км²/год) и 7 (64 км²/год), что составляет более половины всех затопляемых земель. Значительные потери несет сельскохозяйственная отрасль, поскольку это самые продуктивные сельскохозяйственные угодья на территории бассейна. Ежегодно временно выводится из оборота около 130 км² сельскохозяйственных земель (сенокосы, пастбища). Прямой ущерб для республики при наиболее масштабном наводнении (1 % обеспеченности) на р. Баргузин оценивается более 27 млрд руб. Экономический риск от наводнений оценивается в 3 221,61 млн руб. в год. Из них ущербы для поселений – около 173 млн руб. в год, что составляет около 6 % всех возможных потерь [22]. Большинство территорий поселений расположены на безопасных отметках. Затоплению и подтоплению подвергаются частично в основном села нижнего течения р. Баргузин.

Карта интегрального риска от наводнений создана по результатам обобщенного анализа показателей, частных карт рисков – пораженности территории в целом, сельскохозяйственных угодий и населения (см. рис. 3, в). Высоким уровнем риска обладают участки котловинной части р. Баргузин (участки 3, 5), как наиболее сельскохозяйственно-освоенные, хотя по рассмотренным показателям опасности относительно менее опасны. Участки 8, 9 характеризуются низким уровнем пораженности, но при этом имеют высокие показатели опасности.

Заключение

Особенности паводковых наводнений в бассейне р. Баргузин заключаются в следующем: в верховьях, а также на притоках характерны резкие колебания уровней (быстрые, высокие подъёмы), в среднем течении реки (при выходе реки в котловину и ниже) колебания уровней имеют весьма сглаженный характер, что обусловлено «распластыванием» паводков и регулирующим влиянием развитой заболоченной поймы. Уровни подъема

воды над критическим уровнем небольшие. Глубина затопления поймы не превышает 1,0–1,5 м, но при этом значительно увеличиваются площади (зоны поражения), а также длительность стояния высоких отметок уровня из-за относительно небольших уклонов земной поверхности. Максимальная глубина затопления за период наблюдений составляет 253 см. При экстремальных паводках на отрезке впадения реки в оз. Байкал в связи с поднятием уровня озера происходит подпор воды, что затрудняет естественный сток. Участок при впадении реки характеризуется интенсивным подтоплением низинных прибрежных территорий. В связи с поднятием уровня и постоянного подтопления прибрежной части территории с. Усть-Баргузин село перенесено с правобережной части поймы на левобережье (терраса оз. Байкал).

Выделяются основные многоводные периоды, в которых регистрируется серия наводнений на реках бассейна р. Баргузин: 1931–1942 гг.; 1966–1975 гг. 1984–1992 гг. Периодичность 9, 16–24 лет. В настоящее время – наступление очередного многоводного периода с высокой вероятностью наводнений.

Территориальный анализ предполагаемых ущербов по административным районам свидетельствует, что показатели рисков для районов равны. Для Курумканского района он составляет 49,8 %; Баргузинского – 50,2 %. При масштабном наводнении оба района несут значительные потери для сельскохозяйственной отрасли.

Применение геоинформационной технологии для параметризации рельефа способствовало автоматизации операций геоморфологического дешифрирования и анализа ЦМР, обеспечило объективную дифференциацию территории бассейна р. Баргузин на отдельные гидрологические участки, характеризующиеся схожими физико-географическими параметрами развития наводнений, а также снизило субъективизм экспертных решений и полученных результатов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках государственного задания Байкальского института природопользования СО РАН (№ АААА-А21-121011990023-1 и № FWSU-2026-0009).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Воронова А. Е., Рублев И. В., Соловьева И. А., Панов Д. Ю., Гордеева О. С., Батанов Д. В., Завьялова Д. Ю., Косторная А. А. Спутниковый мониторинг экстремального наводнения в Иркутской области 2019 года. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 1. С. 263–266.
2. Шаликовский А. В., Лепихин А. П., Тиунов А. А., Курганович К. А., Морозов М. Г. Наводнения в Иркутской области 2019 года. Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2019. № 6. С. 48–65.
3. Дугарова Г.Б. Анализ и оценка последствий наводнения в г. Тулуне (Иркутская область). ЭКО. 2021. № 1 (559). С. 130–150.
4. Василевская Л. Н., Лисина И. А., Василевский Д. Н., Агеева С. В., Подвербная Е. Н. Метеорологические условия формирования сильного наводнения в бассейне реки Амур в 2019 году. Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 2 (376). С. 90–108.
5. Кондратьева Л. М., Уткина А. С., Кулаков В. В. Изменение качества подземных вод в зоне речной фильтрации во время наводнения на реке Амур. Вода: химия и экология. 2019. № 3-6. С. 7–14.
6. Шинкаренко С. С., Барталев С. А., Лупян Е. А. Мониторинг последствий наводнения в Оренбургской области при половодье на реке Урал в 2024 году. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 3. С. 339–347.
7. Libra: браузер для открытых спутниковых снимков Landsat 8 [Электронный ресурс]. <https://libra.developmentseed.org/> (дата обращения 13.03.2022).
8. Топографическая карта. М-6 1:100 000. М. : КБ «Панорама», 2015. 16 л.
9. Бурятский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды [Электронный ресурс]. <https://www.meteorf.gov.ru/about/structure/cgms/3072/> – (дата обращения 25.06.2022).
10. Zevenbergen L.W., Thorne C.R. Quantitative Analysis of Land Surface Topography. Earth Surface Processes and Landforms. 1987. Vol. 12(1). P. 47–56.

11. Skidmore A. A. Comparison of techniques for calculating gradient and aspect from a gridded digital elevation model. // *International Journal of Geographical Information Systems*. 1989. № 3(4). P. 323–334.
12. Zhou Q., Liu X. (2004). Error Analysis on Grid-Based Slope and Aspect Algorithms. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70(8), 957–962.
13. Pike R.J. Geomorphometry – Diversity in quantitative surface analysis. *Progress in Physical Geography*, 2000. Vol. 24.
14. Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. *Developments in Soil Science*, vol. 33. Hengl T., Reuter H.I. (Eds.). 2008. 772 p.
15. Florinsky I. V. (2016). *Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology*. Elsevier // Academic Press, Amsterdam. 486 p.
16. Saga GIS: System for Automated Geoscientific Analyses [Электронный ресурс] <https://saga-gis.sourceforge.io/en/index.html> (дата обращения 13.08.2024).
17. Михеев В. С. Ряшин В. А. Ландшафты юга Восточной Сибири. Карта. М. : ГУГК, 1977. 4 листа.
18. Кичигина Н. В. Корытный Л. М. Районирование Восточной Сибири по опасности наводнений. *География и природные ресурсы*. 1997. № 3. С. 50–60.
19. Оценка и управление природными рисками. Тематический том. Под ред. А. Л. Рогозина. М.: Изд-во «КРУК», 2003. 320 с.
20. Борисова Т. А. Теоретико-методические подходы исследования природно-антропогенных рисков на Байкальской природной территории // *Безопасность жизнедеятельности*. 2010. № 2. С. 40–45.
21. Карта сельскохозяйственных угодий Республики Бурятии М-6 1:100 000. М.: ЦПИП «ВИСХАГИ-Центр», 2015. 8 л.
22. Борисова Т. А. Природно-антропогенные риски в бассейне оз. Байкал. – Новосибирск. Изд-во «ГЕО», 2013. 126 с.

REFERENCES

1. Voronova, A. E., Rublev, I. V., Solovieva, I. A., Panov, D. Yu., Gordeeva O. S., Batanov D. V., Zavyalova D. Yu., Kostornaya, A. A. (2020). Satellite monitoring of extreme flooding in the Irkutsk region in 2019. *Sovremennyye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Modern problems of remote sensing of the Earth from space]*, 17(1), 263-266 [in Russian].
2. Shalikovskiy, A. V., Lepikhin, A. P., Tiunov, A. A., Kurganovich, K. A., Morozov, M. G. (2019). Floods in the Irkutsk region in 2019. *Vodnoye khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravleniye [Water management of Russia: problems, technologies, management]*, 6, 48-65 [in Russian].
3. Dugarova, G. B. (2021). Analysis and assessment of the consequences of the flood in Tulun (Irkutsk region). *Eko [ECO]*, 1 (559), 130-150 [in Russian].
4. Vasilevskaya, L. N., Lisina, I. A., Vasilevsky, D. N., Ageeva, S. V., Podverbnaya, E. N. (2020). Meteorological conditions for the formation of severe floods in the Amur River basin in 2019. *Gidrometeorologicheskiye issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological research and forecasts]*, 2 (376), 90-108 [in Russian].
5. Kondratieva, L. M., Utkina, A. S., Kulakov, V. V. (2019). Changes in groundwater quality in the river filtration zone during the flood on the Amur River. *Voda: khimiya i ekologiya [Water: chemistry and ecology]*, 3(60). 7-14 [in Russian].
6. Shinkarenko, S. S., Bartalev, S. A., Lupyan, E. A. (2024). Monitoring the consequences of flooding in the Orenburg region during the flood on the Ural River in 2024. *Modern problems of remote sensing of the Earth from space [Sovremennyye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa]*, 21(3), 339-347 [in Russian].
7. Libra: browser for open satellite images Landsat 8. Retrieved from <https://libra.developmentseed.org/> (date of access 03.13.2022) [in English].
8. Topographic map (2015). Scale 1:100 000. Moscow: KB "Panorama", 16 sheets [in Russian].
9. Buryat Center for Hydrometeorology and Environmental Monitoring. Retrieved from <https://www.meteorf.gov.ru/about/structure/cgms/3072/> (date of access 06.25.2022) [in Russian].

10. Zevenbergen, L. W., Thorne, C. R. (1987). Quantitative Analysis of Land Surface Topography. *Earth Surface Processes and Landforms*, 12(1), 47-56 [in English].
11. Skidmore, A. A. (1989). Comparison of techniques for calculating gradient and aspect from a gridded digital elevation model. *International Journal of Geographical Information Systems*, 3(4). 323-334 [in English].
12. Zhou, Q., Liu, X. (2004). Error Analysis on Grid-Based Slope and Aspect Algorithms. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70(8), 957-962 [in English].
13. Pike, R.J. (2000). Geomorphometry – Diversity in quantitative surface analysis. *Progress in Physical Geography*, 24 [in English].
14. Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Developments in Soil Science. (2008). Hengl T., Reuter H.I. (Eds.). 33. 772 p. [in English].
15. Florinsky, I. V. (2016). Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology. *Elsevier, Academic Press, Amsterdam*. 486 p. [in English].
16. Saga GIS: System for Automated Geoscientific Analyses. Retrieved from <https://saga-gis.sourceforge.io/en/index.html> (date of access 13.08.2024) [in English].
17. Mikheev, V. S. Ryashin, V. A. (1977). Map “Landscapes of the south of Eastern Siberia”. M. : GUGiK, 4 sheets [in Russian].
18. Kichigina, N. V., Korytny, L. M. (1997). Zoning of Eastern Siberia by flood hazard *Geografiya i prirodnyye resursy [Geography and natural resources]*, 3, 50–60 [in Russian].
19. Assessment and management of natural risks. Thematic volume. (2003). Ed. A.L. Rogozin. – Moscow: Publishing house “KRUK”, 320 p. [in English].
20. Borisova, T. A. (2010). Theoretical and methodological approaches to the study of natural and anthropogenic risks in the Baikal natural territory. *Life safety [Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti]*, 2, 40-45 [in Russian].
21. Map of agricultural lands of the Republic of Buryatia (20150. Scale 1:100 000. Moscow: TsPIP "VISKHAGI-Center", 8 sheets [in Russian].
22. Borisova, T. A. (2013). *Natural and anthropogenic risks in the Lake Baikal basin [Prirodno-anthropogennyye riski v bassejne oz. Baykal]*. Novosibirsk: Publishing house "GEO", 126 p. [in Russian].

Об авторах

Андрей Николаевич Бешенцев – доктор географических наук, профессор РАН, заведующий лабораторией геоинформационных систем.

Татьяна Анатольевна Борисова – кандидат географических наук, старший научный сотрудник.

Author details

Andrey N. Beshentsev – DSc, Professor of the RAS, Head of the Laboratory of Geoinformation Systems.

Tatyana A. Borisova – PhD, Senior Researcher.

Получено / Received 26.08.2025

Поступила после рецензирования / Revised 13.11.2025

Принята к публикации / Accepted 20.04.2026