ГИДРОГЕОЛОГИЯ И ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

Научная статья
УДК 551.3.053
https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-4-458-470

Морфометрический анализ для выявления особенностей формирования паводковых потоков (на примере Улан-Баторской агломерации)

Елена Александровна Козырева[a], Артем Александрович Рыбченко[b], Содномсамбуу Дэмбэрэл[c]
[a,b]*Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия*
[c]*Институт астрономии и геофизики Монгольской академии наук, г. Улан-Батор, Монголия*
Автор, ответственный за переписку: Козырева Елена Александровна, kozireva@crust.irk.ru

Резюме. Водные потоки, обладающие значительным расходом воды, имеют высокую разрушительную силу и могут приводить к катастрофическим последствиям. Для освоенных предгорных внутриконтинентальных территорий флювиальные процессы, вызванные неравномерным распределением дождевых осадков по площади, носят угрожающий характер. Целью данной работы являлся количественный морфометрический анализ территории для выявления особенностей формирования паводковых потоков. С использованием бассейнового подхода был выполнен анализ водосборных бассейнов и их ранжирование. На основе SRTM-снимков, фондового картографического материала при использовании геоинформационного программного обеспечения авторами были построены специализированные электронные карты, позволяющие получить количественные параметры, отражающие морфометрию анализируемых бассейнов: геометрию бассейнов, дренажную сеть и рельеф местности. На примере территории Улан-Баторской агломерации показано, как исходные морфометрические параметры бассейнов и водотоков (длина, ширина, площадь, периметр, эрозионное расчленение, плотность дренажной сети, коэффициент рельефа, коэффициент Мелтона и др.) формируют особенности паводковых потоков. Для освоенных территорий исходные данные по морфометрии водосборных бассейнов являются основой составления специализированных карт, которые используются при планировании и строительстве. Сочетание морфометрических показателей на территории Улан-Баторской агломерации свидетельствует о том, что в отдельных водосборных бассейнах возможно формирование крупных паводков и развитие опасных грязекаменных потоков.

Ключевые слова: поверхностные водотоки, морфометрия рельефа, водосборные бассейны, сели, паводки, подтопление, природные геологические опасности, количественные морфометрические показатели

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта ученого совета по направлению «Научная школа Иркутского национального исследовательского технического университета совместно с Российской академией наук» № 01-РАН-21. При проведении исследования использовано оборудование центра коллективного пользования «Геодинамика и геохронология» Института земной коры СО РАН в рамках гранта № 075-15-2021-682.

Для цитирования: Козырева Е. А., Рыбченко А. А., Дэмбэрэл С. Морфометрический анализ для выявления особенностей формирования паводковых потоков (на примере Улан-Баторской агломерации) // Науки о Земле и недропользование. 2021. Т. 44. № 4. С. 458–470. https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-4-458-470.

HYDROGEOLOGY AND ENGINEERING GEOLOGY

Original article

Morphometric analysis for flood flow formation feature identification (on example of Ulaanbaatar agglomeration)

Elena A. Kozyreva[a], Artem A. Rybchenko[b], Sodnomsambuu Demberel[c]
[a,b]*Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia*
[c]*Institute of Astronomy and Geophysics, Mongolian Academy of Sciences, Ulaanbaatar, Mongolia*
Corresponding author: Elena A. Kozyreva, kozireva@crust.irk.ru

© Козырева Е. А., Рыбченко А. А., Дэмбэрэл С., 2021

Abstract. Water flows with significant flow rate feature a high destructive force and can lead to catastrophic consequences. Fluvial processes caused by uneven distribution of rain precipitation over the area pose risks to the developed inland foothill territories. The purpose of this study is to carry out a quantitative morphometric analysis of the territory in order to identify the formation features of flood flows. The analysis and ranking of catchment basins are performed using a basin approach. On the basis of SRTM images and the use of stock cartographic material in the GIS program the authors have built specialized electronic maps that allow to obtain quantitative parameters reflecting the morphometry of the basins under analysis including basin geometry, drainage network and terrain relief. On example of the Ulaanbaatar agglomeration territory it is shown how initial morphometric parameters of basins and watercourses (length, width, area, perimeter, erosion dissection, drainage network density, terrain relief coefficient, Melton coefficient, etc.) form the features of flood flow. For developed territories, the initial data on the catchment basin morphometry constitute the basis for compilation of specialized maps to be used in planning and construction. The combination of morphometric indicators on the territory of the Ulaanbaatar agglomeration indicates that there is possibility of large flood formation and development of dangerous mudstone flows in some catchment basins.

Keywords: surface watercourses, relief morphometry, catchment basins, mudflows, floods, flooding, natural geological hazards, quantitative morphometric indicators

Funding: the research was conducted under the grant from the Academic Council in the direction “Scientific School of Irkutsk National Research University in cooperation with the Russian Academy of Sciences” no. 01-RAS-21. The conducted research involved the use of the equipment of the Centre of Shared Use “Geodynamics and Geochronology” of the Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences supported by the grant no. 075-15-2021-682.

For citation: Kozyreva E. A., Rybchenko A. A., Demberel S. Morphometric analysis for flood flow formation feature identification (on example of Ulaanbaatar agglomeration). *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use.* 2021;44(4):458-470. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-4-458-470.

Введение

Поверхностные водные потоки – как временные, так и постоянные – при высоких показателях расхода водотока способны приобретать значительную разрушительную силу. В связи с этим они становятся причиной социального и экономического ущерба на заселенных территориях [1–3]. Важным вопросом при исследовании разрушительных процессов, вызванных поверхностными водотоками, является выявление морфометрических показателей водосборных бассейнов как фактора, влияющего на формирование паводковых потоков [4–6]. Определение количественных морфометрических характеристик и их взаимосвязи с формированием паводковых водных и грязекаменных потоков актуально для многих горных и предгорных районов мира [7–9]. В условиях изменяющегося климата актуальность формирования паводковых потоков возрастает [10–12].

Интересен в этом отношении район Улан-Баторской агломерации в Монголии. Монголия расположена внутри Азиатского континента, климатические условия страны резко континентальные с небольшим количеством атмосферных осадков, в теплый период выпадает 93 % годового количества осадков. Несмотря на небольшое количество осадков, дождевые паводки на территории Монголии происходят достаточно часто. Согласно литературным источникам, они фиксировались в 1613, 1623, 1695, 1696, 1701, 1715, 176, 1830 и 1868 гг. [13]. По данным систематических наблюдений паводки отмечались в 1966, 1967, 1971, 1974, 1976, 1982, 1984–1986, 1988, 1989, 1993 и 1994 гг. на следующих реках: Селенга, Дэлгэр-Мурен, Онон, Орхон, Туул, Хараа-Гол и Иро [13].

Город Улан-Батор расположен вдоль долины реки Туул и впадающих в нее рек – Толгойтын-Гол, Сэлбэ-Гол, Улиастайн-Гол и других. На основе исторических и опубликованных данных установлено, что паводки на территории городской агломерации Улан-Батора отмечались в 1778, 1915, 1966, 1982, 2000, 2003, 2004, 2009, 2015, 2016, 2018, 2019 и 2020 гг. По информационным источникам Международного движения Красного Креста и Красного Полумесяца в 2009 г. с 16 по 26 июля в результате наводнения погибли 26 человек[1]. Прохождения крупных паводковых вод в столице Монголии случались 20 июня 2015 г. и 21 июля 2016 г. Следствием природной

[1] DREF operation final report 2010 // Ifrc.org. [Электронный ресурс]. URL: https://www.ifrc.org/docs/appeals/09/MDRMN002FR.pdf. (12.08.2021).

катастрофы в 2019 г. снова стали человеческие жертвы – погибли 12 человек[2], в 2020 г. в результате наводнения погибли 8 человек[3]. По причине недостаточности информации у нас нет возможности разделить паводковые потоки на водные и грязекаменные, однако на основании морфометрических параметров и характеристик выпадения атмосферных осадков мы предполагаем, что грязекаменные потоки (сели) имели место. Целью данного исследования является морфометрический анализ рельефа и оценка предрасположенности водосборных бассейнов к формированию паводковых потоков на территории города Улан-Батора.

Материалы и методы исследований

Геологические условия района исследований. Район Улан-Баторской агломерации находится в центре Азиатского континента (рис. 1). Исследуемая территория относится к Центрально-Хэнтэйской горно-складчатой области Хэнтэйской горной провинции – области преимущественно новейших сводово-глыбовых поднятий.

В геологическом строении исследуемого района представлены коренные отложения девона (D_{1-2} и D_{2-3}) – метаморфизованные песчаники, алевролиты, туфопесчаники, туффиты; отложения юры (J_{2-3}) – граниты, гранит-порфириты с биотитом, мусковит; осадочные отложения карбона (C_{1-2} и C_{2-3}), сложенные метаморфизованными песчаниками, филлитовыми сланцами, алевролитами, и отложения мела (K_1) – песчаники, алевролиты, конгломераты, гравелиты. Рыхлые неоген-четвертичные отложения (N_2-Q) представлены глиной, галькой, песками, супесью и суглинком различного генезиса. В конусах выноса наблюдаются глыбовый материал, дресва, щебень, слабосцементированные брекчии [14].

Геоморфологические условия района исследований. По морфогенетическому признаку на исследуемой территории выделяются денудационно-тектонические, структурно-денудационные и аккумулятивные типы рельефа [14]. Территория Улан-Баторской агломерации

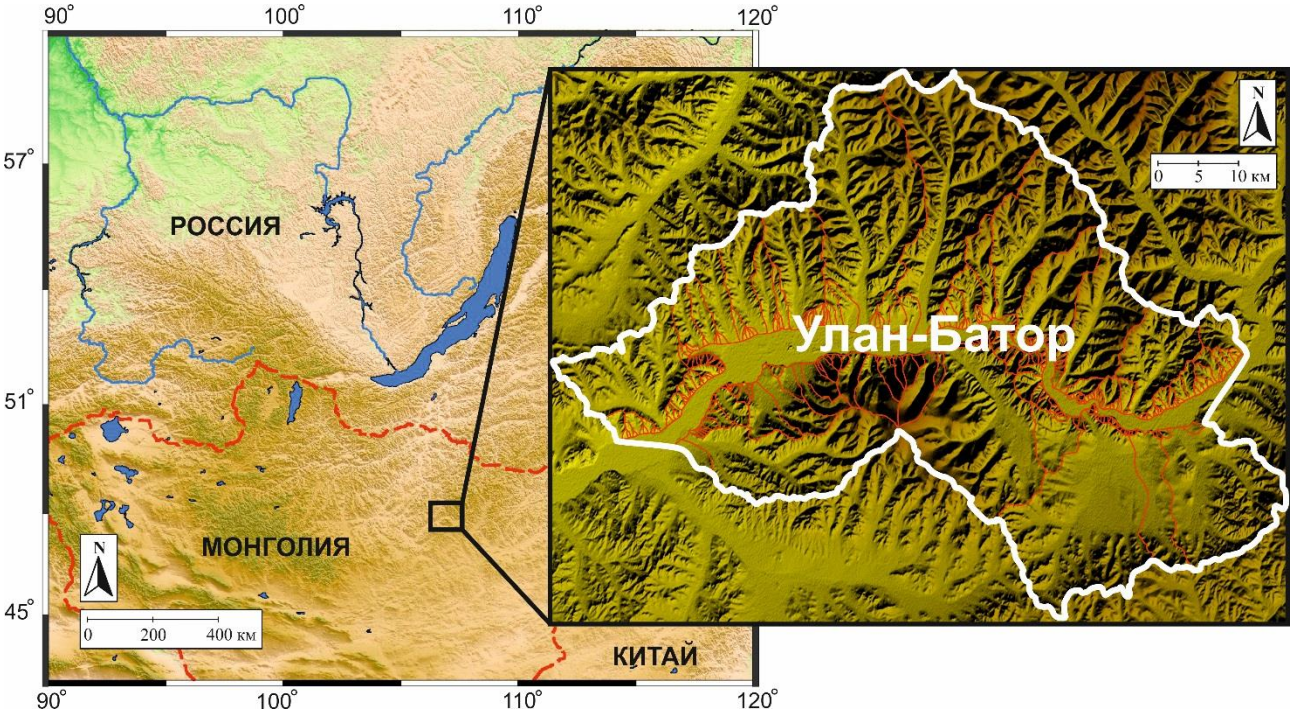

Рис. 1. Географическое положение территории
Fig. 1. Geographical location of the territory

[2] Mongolia – floods in Ulaanbaatar and Töv Province leave 12 dead // Floodlist.com. [Электронный ресурс]. URL: https://floodlist.com/asia/mongolia-flooding-june-2019. (12.08.2021).
[3] Mongolia – floods leave 8 dead, 2,300 homes damaged // Floodlist.com. [Электронный ресурс]. URL: https://floodlist.com/asia/mongolia-floods-july-2020. (12.08.2021).

располагается в районах долинных комплексов, предгорных шлейфов и конусов выноса горного обрамления. Наиболее удобные для освоения территории сложены рыхлыми аллювиально-делювиально-пролювиальными отложениями неоген-четвертичного возраста. Горные и предгорные территории поставляют продукты выветривания горных пород в русла временных водотоков и речных долин, формируя конусы выноса.

Климат. Климат территории резко континентальный, характеризуется суровой и холодной зимой, небольшим количеством осадков и большими суточными и сезонными колебаниями температуры [15]. Улан-Батор является одной из самых холодных столиц в мире, среднегодовая температура здесь составляет -0,7 °С. Среднегодовое количество осадков – 200–250 мм, годовое распределение неравномерное [16–18], основное количество выпадает в теплый период года с мая по сентябрь, что составляет около 89 % от среднего годового объема, месячный же максимум составляет 227 мм (июнь 1967 г.), суточный максимум – 91 мм (сентябрь 1997 г.).

Анализ дождевых осадков за период 2010–2014 гг. по метеостанциям Алтан-Булаг, Буан-Угха, Монгун-Морт и Улан-Батор показывает их неравномерное распределение. Так, например, количество дней с осадками не менее 10 мм в сутки составило от 10 дней в 2010 г. и до 21 дня в 2013 г.; с осадками не менее 20 мм в сутки – от 3 дней в 2010 г. и до 6 дней в 2011 и 2013 гг.; с осадками не менее 30 мм в сутки – от 1 до 2 дней (рис. 2). Максимальное суточное количество осадков за этот период составило 85,3 мм 7 июля 2014 г. по данным метеостанции Монгун-Морт, что более чем в два раза превышает суточные максимумы 2010–2013 гг.

Основой для получения морфологических параметров водосборных бассейнов Улан-Баторской агломерации являлись топографическая карта масштаба 1:100000 и цифровая модель рельефа (SRTM-снимки с разрешением 90 м) исследуемой территории.

Результаты исследований

Морфометрический анализ водосборных бассейнов Улан-Баторской агломерации осуществлялся на основе их морфологических параметров. По имеющемуся картографическому материалу были выделены водосборные бассейны и водотоки, базисом эрозии которых является р. Туул. Выделенные водотоки и водосборы представляют собой цифровые линии и полигоны, вынесенные в качестве электронных слоев в геоинформационных системах MapInfo и Global Mapper, где осуществляюсь их последующее редактирование. Эти программные комплексы позволяют осуществлять необходимые манипуляции с количественными данными выбранных элементов – водотоков, бассейнов – и считыванием данных с цифровой модели рельефа в автоматическом режиме (рис. 3).

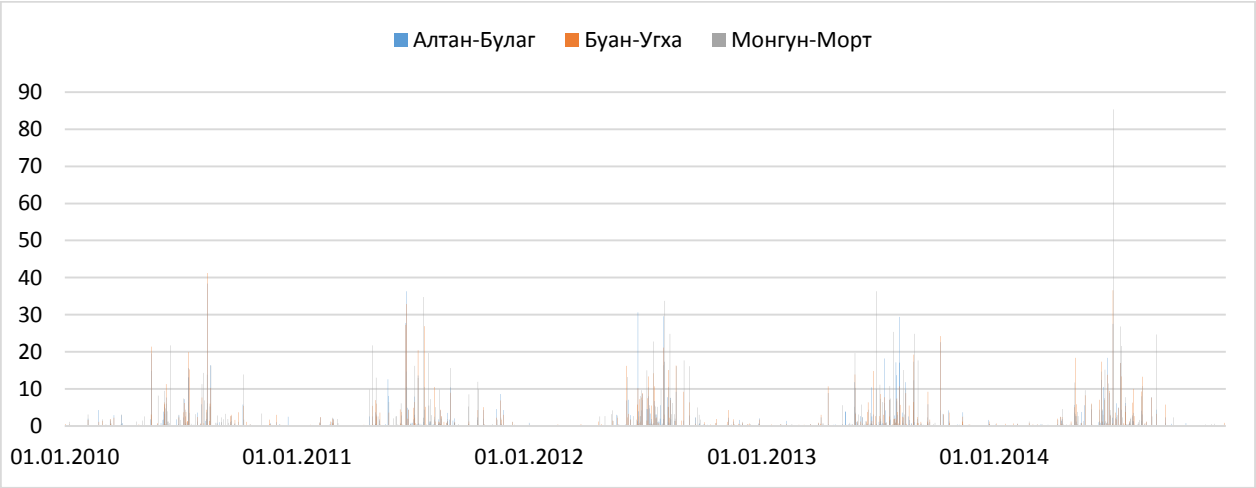

Рис. 2. Суточное количество осадков в районе г. Улан-Батора (1306 м) по данным метеостанций Алтан-Булаг, Буан-Угха, Монгун-Морт в период с 1 января 2010 г. по 31 декабря 2014 г.
Fig. 2. Daily amount of precipitation in the Ulan-Bator area (1306 m) according to the data of AltanBulag, Byan-Ukhaa, MongunMort weather stations in the period from January 1, 2010 to December 31, 2014

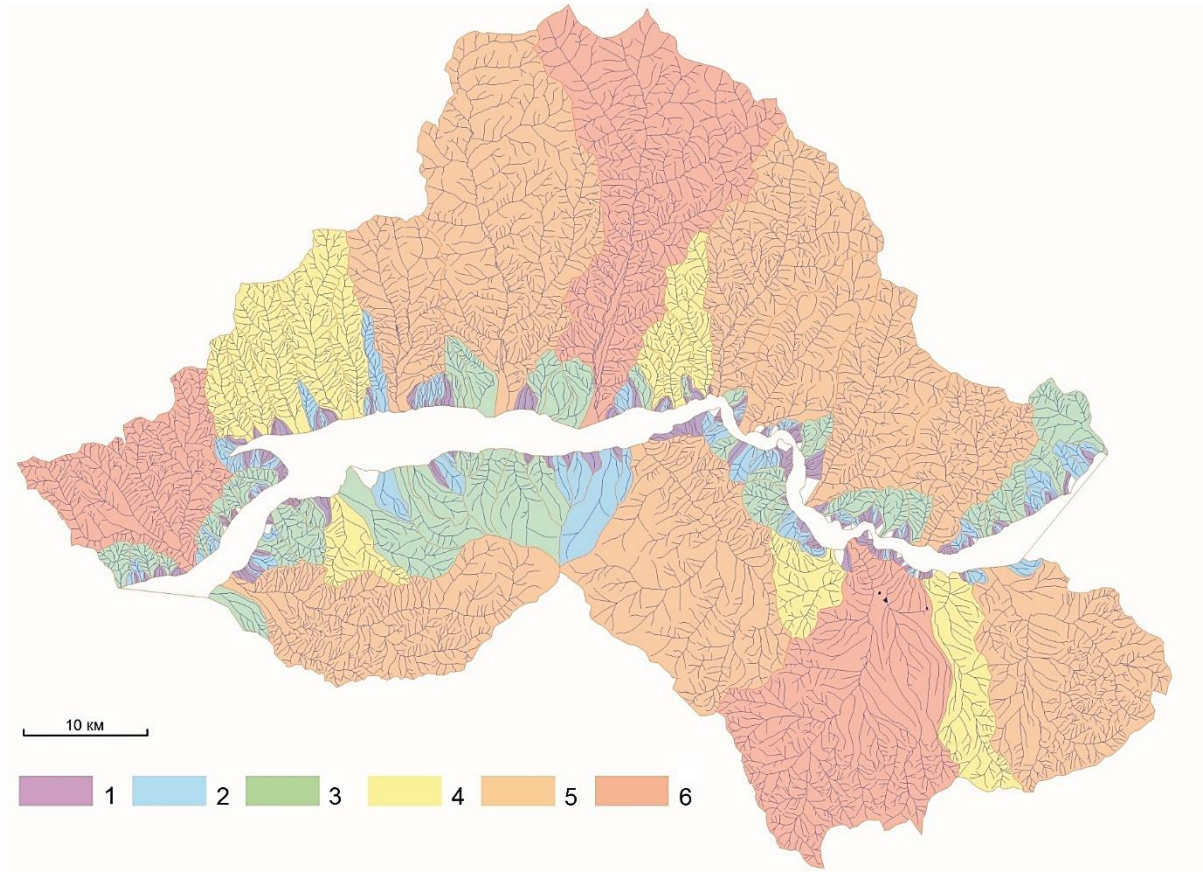

Рис. 3. Ранжирование водосборных бассейнов по порядку:
1–6 – порядок водосборов по Хортону
Fig. 3. Ranking of catchment basins in order:
1–6 – catchment order according to Horton

Для исследуемой территории выделено 303 водосборных бассейна. По наличию дренажной сети бассейны разделены по таксономическому уровню методом Р. Хортона [19]. С использованием данного метода выделенные водосборные бассейны ранжируются от 1 до 6 порядков (см. рис. 3).

Далее в ходе исследования для каждого бассейна были получены различные морфометрические показатели, характеризующие геометрию бассейна, дренажную сеть, рельеф.

Геометрия бассейна. К этой группе относятся параметры, характеризующие количественные показатели бассейнов, отражающие их геометрию: длина, ширина, площадь, периметр и форма. Данные длины, ширины, площади и периметра получены по оцифрованным картам в программе MapInfo. Расчетный размер формы бассейнов R_c определяется по формуле

$$R_c = 12{,}57 \cdot (A / P^2)^4;$$

где A – площадь бассейна, км^2; P – периметр бассейна, км.

Структура дренажной сети. В эту группу включены параметры, характеризующие дренажную сеть бассейнов: протяженность водотоков, густота и глубина эрозионного расчленения, частота водных потоков в бассейне.

Данные общей протяженности водотоков в бассейне получены в результате сложения длин всех водотоков в каждом из исследуемых бассейнов.

Густота эрозионного расчленения K, км/км^2, представляет собой соотношение суммарной длины водотоков в бассейне L, км, и его площади A, км^2 [20]:

$$K = L / A.$$

Глубина эрозионного расчленения H (высота бассейна), м, определяется как разность

[4] Miller V. C. Quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics in the Clinch Mountain area, Virginia and Tennessee: technical report. New York: Columbia University, 1953.

между абсолютными максимальными и минимальными отметками в пределах водосборного бассейна $H_{макс}$ и $H_{мин}$, м:

$$H = H_{макс} - H_{мин}.$$

Частота водотоков в бассейне F_s определяется соотношением числа водотоков всех порядков $\sum N_u$, ед., и площади бассейна A, км^2 [21]:

$$F_s = (\sum N_u) / A.$$

Характер рельефа. Данная группа включает в себя показатели, которые характеризуют особенности рельефа территории: высота, средний уклон бассейна, порядок водотока по Хортону, расчетный коэффициент рельефа, коэффициент Мелтона.

Высота и средний уклон были получены путем обработки информации цифровых моделей рельефа. Определение порядков водотоков осуществлялось по топографической карте.

Коэффициент рельефа R_h определяется соотношением глубины эрозионного расчленения H, км, и его длины L, км [20]:

$$R_h = H / L.$$

Расчет коэффициента Мелтона M представляет собой соотношение глубины эрозионного расчленения H, км, и его площади A, км^2 [22, 23]:

$$M = H / A^{0,5}.$$

Показатель коэффициента Мелтона отражает условия развития флювиальных процессов разного типа – наводнений, водокаменных и селевых потоков. По данному коэффициенту для различных регионов выделены определенные закономерности в развитии флювиальных процессов. Более высокие показатели коэффициента Мелтона характерны для водосборных бассейнов, в которых могут формироваться селевые потоки.

Авторами была проанализирована форма бассейна (округлая, вытянутая). При значении коэффициента округлости, близком к 1, форма бассейна соответствует кругу. В водосборном бассейне круглой формы время добегания для водотоков примерно одинаковое, что формирует в основном русле кратковременный водный поток с большим расходом. В вытянутом бассейне время добегания разное, что формирует более продолжительный по времени водный поток с меньшим расходом.

Синтетические карты. По результатам представленных выше расчетов построены синтетические карты, отражающие морфометрические параметры исследуемых бассейнов. Карты условно разделены на группы, характеризующие определенные морфометрические параметры.

Первая группа характеризует параметры геометрии бассейнов, такие как длина, ширина, площадь, периметр и форма бассейнов.

Для исследуемой территории Улан-Баторской агломерации по выполненной методике установлено, что длина бассейнов варьирует в значительных пределах. Длина самого протяженного бассейна составляет 33,68 км, самый короткого – 0,4 км. Средняя ширина водосборных бассейнов изменяется в диапазоне от 0,17 до 11,18 км. Площади бассейнов на исследуемой территории варьируют от мелких водосборов с минимальной площадью 0,09 км^2 до крупных водосборов с площадью до 305,38 км^2. Периметр бассейнов меняется от 1,38 до 109,83 км.

Показатель формы бассейна демонстрирует геометрию бассейна в плане и отражает его способность концентрировать и формировать значительный расход потока воды за короткое время или наличие низких значений расхода за длительный промежуток времени. Округлый бассейн способен формировать поверхностный водоток с высоким расходом воды за короткое время. Полученные значения варьируют от 0,06 до 0,85, среднее значение – 0,53. На исследуемой территории выделяется 27 бассейнов округлой и 40 бассейнов вытянутой формы. Показатель вытянутости бассейна демонстрирует возможность формирования низких расходов воды в течение длительного времени (рис. 4).

Вторая группа характеризует параметры дренажной сети бассейнов. В нее включены протяженность водотоков, густота эрозионного расчленения (плотность дренажа), глубина эрозионного расчленения, частота водотоков в бассейне.

Общая длина всех водотоков в бассейне (протяженность) в зависимости от изрезанности, площади бассейнов и плотности водотоков меняется от 0,26 до 701,86 км. Густота эрозионного расчленения определяется со-

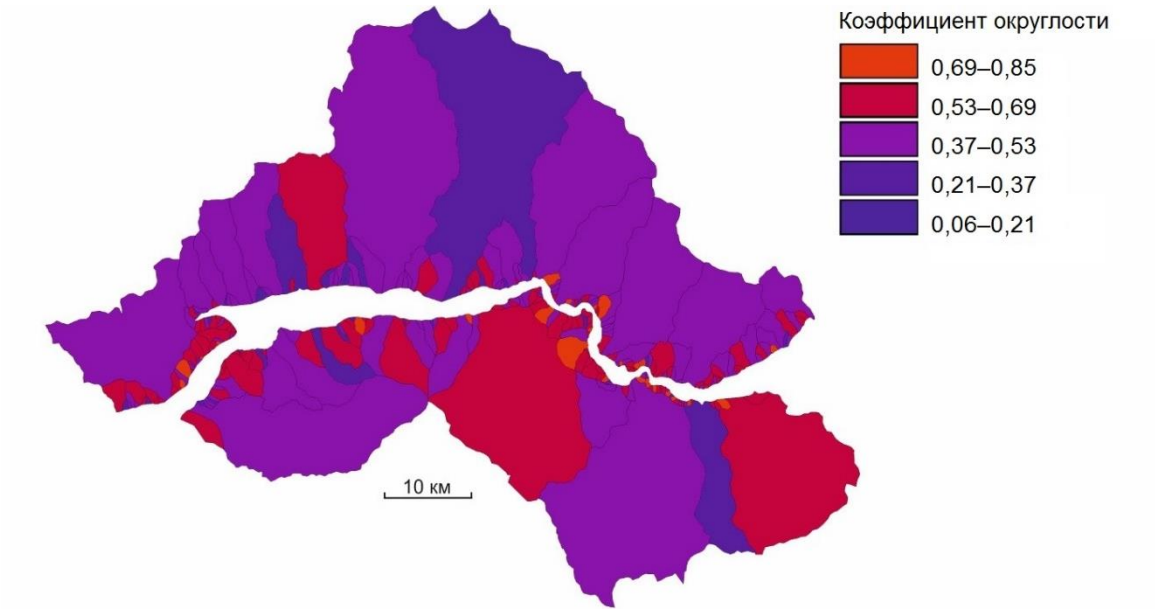

Рис. 4. Карта-схема коэффициента округлости водосборных бассейнов
Fig. 4. Schematic map of catchment basin roundness ratio

отношением суммарной длины водотоков водосборного бассейна к площади этого водосборного бассейна и характеризует плотность развития эрозионной сети в бассейне. На исследуемой территории она варьирует от 0,64 до 4,65 км/км², среднее значение густоты эрозионного расчленения на исследуемой территории составляет 2,47 км/км² (рис. 5, *а*).

Глубина эрозионного расчленения водосборного бассейна определяется превышением максимальной высоты над минимальной в одном бассейне. Она является одним из основных показателей, характеризующих энергетический потенциал рельефа. Чем больше глубина эрозионного расчленения, тем больше энергетический потенциал. В результате анализа было установлено, что глубина расчленения водосборных бассейнов изменяется от 42 до 1026 м.

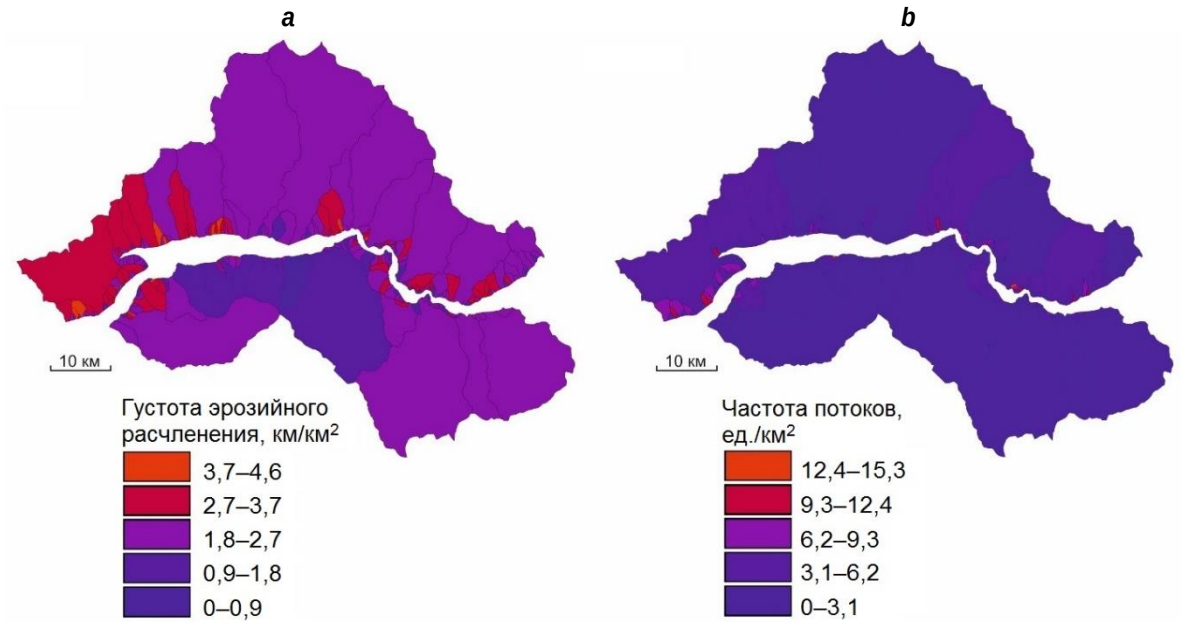

Рис. 5. Карты-схемы густоты эрозионного расчленения (a) и частоты потоков (b) водосборных бассейнов
Fig. 5. Schematic maps of erosion dissection density (a) and flow frequency (b) of catchment basins

Частота водных потоков характеризует отношение числа водотоков всех порядков к площади водосбора. Высокие показатели частоты водотоков предопределены низкими инфильтрационными свойствами горных пород, горным рельефом местности и редкой растительностью либо ее отсутствием. Этот показатель для территории столицы Монголии и прилегающих территорий в границах агломерации изменяется от 0,21 до 15,23 (рис. 5, *b*).

Третья группа характеризует параметры рельефа бассейнов и включает в себя такие показатели, как высота, средний уклон бассейна, порядок водотока по Хортону и коэффициент рельефа, а также коэффициент Мелтона.

Для района Улан-Баторской агломерации характерно наличие горного обрамления, потому высота водосборных бассейнов достигает максимального значения в 2257 м. При этом средний показатель уклона бассейна варьирует от 1,19 до 21,68°. Как было указано выше, по определению методом Хортона на исследуемой территории выделяются бассейны от 1 до 6 порядков.

В ходе исследования был произведен расчет показателя коэффициента рельефа водосборного бассейна – одного из важных показателей для оценки возможности формирования флювиальных процессов в локальном водосборе. Данный показатель для исследуемой территории меняется в диапазоне от 0,02 до 0,44 (рис. 6, *a*).

Использование коэффициента Мелтона в морфометрическом анализе позволяет определить преобладающее развитие флювиальных процессов в бассейне. По полученным данным для исследуемой территории показатель Мелтона водосборных бассейнов достаточно низок: среднее значение коэффициента Мелтона равно 0,25; максимальное значение – 0,65; минимальное значение – 0,02 (рис. 6, *b*).

Обсуждение полученных результатов

Обработка данных цифровой модели рельефа и использование геоинформационных технологий дает возможность автоматизировать работы по получению морфометрических параметров водосборных бассейнов на исследуемой территории, что позволяет значительно сократить время обработки морфометрических параметров водосборов, а также рассматривать большое количество объектов исследования (водосборных бассейнов), вести расчеты для большой по площади территории.

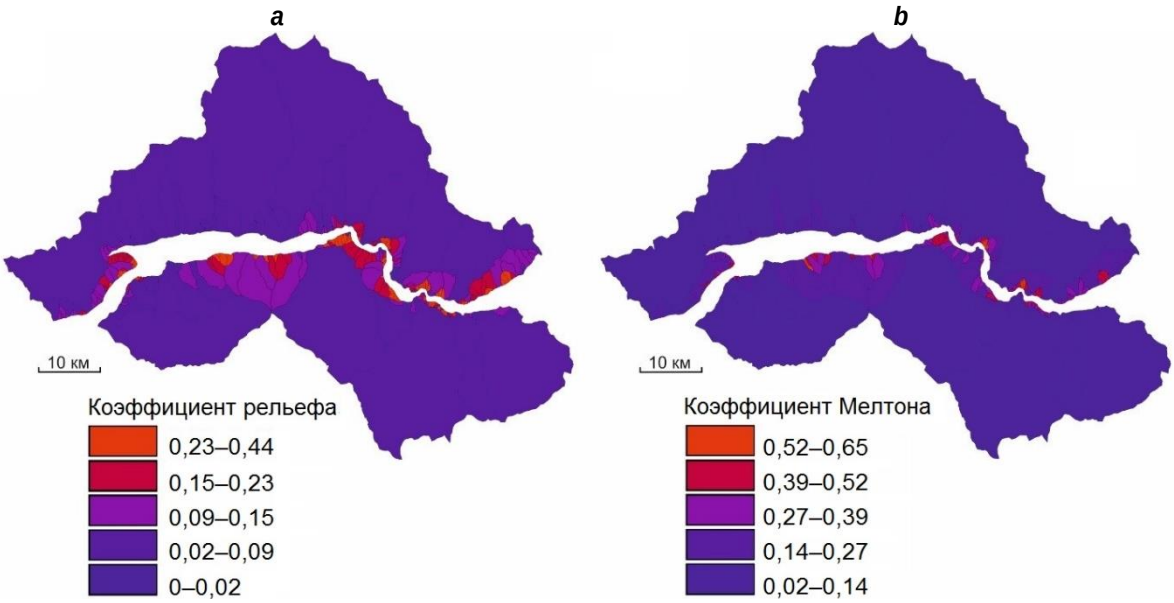

Рис. 6. Карты-схемы коэффициента рельефа (a) и коэффициента Мелтона (b) водосборных бассейнов
Fig. 6. Schematic maps of a terrain relief coefficient (a) and Melton coefficient (b) of catchment basins

Статистическая обработка количественных морфометрических данных водосборных бассейнов, их анализ и группировка очень важны при оценке условий формирования экстремальных геологических процессов флювиального генезиса. Полученная данным путем специальная информация позволяет оценить природный потенциал анализируемой территории для формирования тех или иных флювиальных процессов.

Карты параметров геометрии бассейнов демонстрируют предрасположенность части водосборных бассейнов к концентрации водных потоков и способности за короткое время формировать высокие расходы потоков воды. В округлых бассейнах за короткий период времени могут сформироваться водные потоки с большим, чем в вытянутых бассейнах, расходом воды. В ходе исследования выделено 17 округлых бассейнов. Именно для них характерно формирование катастрофически быстрых событий: в короткий промежуток времени на этой территории возможны наводнения и сели. По 63 бассейнам установлены параметры среднего значения округлости. 199 бассейнов, в свою очередь, имеют вытянутую форму и способны стабильно долгое время удерживать низкие расходы водных потоков. Такое долгое по времени движение потоков объясняется тем, что бассейны имеют короткие притоки и длинное основное русло. В таких бассейнах с большей долей вероятности будут формироваться подтопления долин и проявляться различные эрозионные формы – овраги, промоины.

Характеристика дренажной сети и ее количественные морфометрические параметры очень важны при оценке формирования поверхностных водотоков, поскольку водная составляющая является главным фактором при формировании флювиальных процессов. Расход воды, время формирования потока, инфильтрационные параметры зоны аэрации бассейнов – все эти показатели отражаются в особенностях проявления процессов и в их динамике. Анализ электронных карт в группе «параметры дренажной сети» показал, что каждый водосборный бассейн имеет свои особенности формирования поверхностного водостока. Формирование потоков происходит в разных геолого-геоморфологических условиях. Области с максимальной густотой расчленения соответствуют участкам денудационно-аккумулятивного и денудационно-тектонического рельефа с глубиной расчленения 200–500 м, а также мощностью рыхлых делювиально-пролювиальных отложений 10–30 м и мощностью озерно-аллювиальных-пролювиальных отложений до 100–120 м. Глубина расчленения рельефа отражает морфометрические характеристики бассейнов, определяющие эрозионный потенциал рельефа – один из главных факторов развития линейной эрозии.

Отражение инфильтрационных свойств грунтов присутствует в показателе частоты водных потоков. Частота водных потоков выше в тех бассейнах, поверхность которых слабо впитывает в себя воду. В таких условиях в каждом, даже слабовыраженном понижении, формируется временное русло. Превалируют процессы поверхностного стока, сток рассредоточен, отмечаются большие потери водной составляющей. В бассейнах с низким показателем частоты водных потоков формируется больший по объему и направленности поверхностный сток. Низкие показатели свойственны участкам, сложенным горными породами с большей инфильтрационной способностью.

Группа, объединяющая показатели, характеризующие особенности рельефа местности, отражает предрасположенность к формированию водных потоков и способность формировать потоки разной плотности – от водных до грязекаменных (сели). Из литературных источников известно, что для анализируемых территорий свойственно формирование флювиальных процессов, если коэффициент Мелтона выше 0,3. Чем выше данный показатель, тем выше вероятность формирования водных потоков большей плотности. Исходя из полученных количественных показателей коэффициента Мелтона, для территории Улан-Баторской агломерации водосборы разделены на группы с разной потенциальной предрасположенностью формирования потоков: паводки и водные потоки, водокаменные и грязекаменные потоки (сели).

Заключение

Использование методики анализа морфометрических характеристик водосборных бассейнов на основе обработки цифровой модели рельефа с применением геоинформационных технологий обеспечивает получение необходимого объема достоверной количественной информации. Полученные количественные данные дают возможность проводить ранжирование водосборных бассейнов исследуемой территории по различным морфометрическим параметрам, определять природный потенциал водосборного бассейна для формирования преобладающих типов флювиальных процессов.

Установленные морфометрические особенности водосборных бассейнов позволяют составлять и наглядно демонстрировать графические отчеты, карты, схемы, специализированные крупномасштабные планы и разномасштабные карты, просчитывать сценарии развития поверхностного стока, обоснованно составлять оценки степени опасности проявления экстремальных геологических процессов на освоенных городских территориях.

В ходе проведенного исследования для территории Улан-Баторской агломерации авторами впервые получены количественные параметры морфометрии водосборных бассейнов и построен ряд специализированных аналитических карт, дающих представление о потенциале исследуемой территории для формирования групп флювиальных процессов. Установлено, что в отдельных водосборных бассейнах исследуемой территории возможно формирование крупных паводков и развитие опасных селевых потоков.

Специализированные аналитические карты, построенные на основе морфометрических параметров рельефа, позволяют дать оценку предрасположенности территории к формированию быстротекущих катастрофических процессов, связанных с прохождением паводочного стока в период ливневых осадков, как затяжных, так и кратковременных. Кроме того, полученная база данных морфометрических показателей исследуемой территории в будущем может являться основой для моделирования и рассмотрения разных сценариев прогнозного развития внутриконтинентальных районов в условиях меняющегося климата, а именно частоты и количества атмосферных осадков.

Список источников

1. Jonkman S. N., Penning-Rowsell E. Human instability in floods flows // Journal of the American Water Resources Association. 2008. Vol. 44. Iss. 5. P. 1208–1218. https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2008.00217.x.

2. Marchi L., Borga M., Preciso E., Gaume E. Characterisation of selected extreme flash floods in Europe and implications for flood risk management // Journal of Hydrology. 2010. Vol. 394. Iss. 1-2. P. 118–133. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.017.

3. Ahmadalipour A., Moradkhani H. A data-driven analysis of flash flood hazard, fatalities, and damages over the CONUS during 1996–2017 // Journal of Hydrology. 2019. Vol. 578. P. 124106. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124106.

4. Diakakis M. A method for flood hazard mapping based on basin morphometry: application in two catchments in Greece // Natural Hazards. 2011. Vol. 56. Iss. 3. P. 803–814. https://doi.org/10.1007/s11069-010-9592-8.

5. Bathrellos G. D., Karymbalis E., Skilodimou H. D., Gaki-Papanastassiou K., Baltas E. A. Urban flood hazard assessment in the basin of Athens Metropolitan city, Greece // Environmental Earth Sciences. 2016. Vol. 75. Iss. 4. P. 319. https://doi.org/10.1007/s12665-015-5157-1.

6. Meraj G., Romshoo S. A., Yousuf A. R., Altaf S., Altaf F. Assessing the influence of watershed characteristics on the flood vulnerability of Jhelum basin in Kashmir Himalaya // Natural Hazards. 2015. Vol. 77. Iss. 1. P. 153–175. https://doi.org/10.1007/s11069-015-1605-1.

7. Angillieri M. Y. E. Morphometric analysis of Colangüil river basin and flash flood hazard, San Juan, Argentina // Environmental Geology. 2008. Vol. 55. Iss. 1. P. 107–111. https://doi.org/10.1007/s00254-007-0969-2.

8. Parveen R., Kumar U., Singh V. K. Geomorphometric characterization of Upper South Koel basin, Jharkhand: a remote sensing & GIS approach // Journal of Water Resource and Protection. 2012. Vol. 4. Iss. 12. P. 1042–1050. https://doi.org/10.4236/jwarp.2012.412120.

9. Waikar M. L., Nilawar A. P. Morphometric analysis of a drainage basin using geographical information system: a case study // International Journal of Multidisciplinary and Current Research. 2014. Vol. 2. P. 179–184.

10. Kleinen T., Petschel-Held G. Integrated assessment of changes in flooding probabilities due to climate change // Climatic Change. 2007. Vol. 81. Iss. 3-4. P. 283–312. https://doi.org/10.1007/s10584-006-9159-6.

11. Halmstad A., Najafi M. R., Moradkhani H. Analysis of precipitation extremes with the assessment of regional climate models over the Willamette River basin, USA // Hydrological Processes. 2013. Vol. 27. Iss. 18. P. 2579–2590. https://doi.org/10.1002/hyp.9376.

12. Kundzewicz Z. W., Kanae S., Seneviratne S. I., Handmer J., Nicholls N., Peduzzi P., et al. Flood risk and climate change: global and regional perspectives // Hydrological Sciences Journal. 2014. Vol. 59. Iss. 1. P. 1–28. https://doi.org/10.1080/02626667.2013.857411.

13. Oyunbaatar D. Floods in Mongolia // Restec.or.jp. [Электронный ресурс]. URL: https://www.restec.or.jp/geoss_ap3/pdf/day2/WG/WG2/Short_Country_Reports/08_Mongolia.pdf. (12.08.2021).

14. Семинский К. Ж., Леви К. Г., Джурик В. И., Козырева Е. А., Саньков В. А., Турутанов Е. Х. Опасные геологические процессы и прогнозирование чрезвычайных ситуаций природного характера на территории Центральной Монголии / отв. ред. Д. П. Гладкочуб. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2017. 331 с.

15. Sato T., Kimura F., Kitoh A. Projection of global warming onto regional precipitation over Mongolia using a regional climate model // Journal of Hydrology. 2007. Vol. 333. Iss. 1. P. 144–154. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.07.023.

16. Saizen I., Tsutsumida N. The rapid development of settlements in flood-prone areas in peri-urban Ulaanbaatar, Mongolia: monitoring and spatial analysis using VHR satellite imageries // Land use management in disaster risk reduction / eds. M. Banba, R. Shaw. Tokyo: Springer, 2017. P. 137–148.

17. Ashley S. T., Ashley W. S. Flood fatalities in the United States // Journal of Applied Meteorology and Climatology. 2008. Vol. 47. Iss. 3. P. 805–818. https://doi.org/10.1175/2007JAMC1611.1.

18. Khishigjargal M., Dulamsuren C., Leuschner H. H., Leuschner C., Hauck M. Climate effects on inter- and intra-annual larch stemwood anomalies in the Mongolian forest-steppe // Acta Oecologica. 2014. Vol. 55. P. 113–121. https://doi.org/10.1016/j.actao.2013.12.003.

19. Horton R. E. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology // Bulletin of the Geological Society of America. 1945. Vol. 56. Iss. 3. P. 275–370. https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2.

20. Horton R. E. Drainage-basin characteristics // Eos, Transactions, American Geophysical Union. 1932. Vol. 13. Iss. 1. P. 350–361. https://doi.org/10.1029/TR013i001p00350.

21. Schumm S. A. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey // Bulletin of the Geological Society of America. 1956. Vol. 67. Iss. 5. P. 597–646. https://doi.org/10.1130/0016-7606(1956)67[597:EODSAS]2.0.CO;2.

22. Melton M. A. The geomorphic and paleoclimatic significance of alluvial deposits in southern Arizona // The Journal of Geology. 1965. Vol. 73. Iss. 1. P. 1–38.

23. Auzina L. I., Parshin A. V. System-integrated GIS-based approach to estimating hydrogeological conditions of oil-and-gas fields in Eastern Siberia // IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science. 2016. Vol. 33. P. 012060. https://doi.org/10.1088/1755-1315/33/1/012060.

References

1. Jonkman S. N., Penning-Rowsell E. Human instability in floods flows. *Journal of the American Water Resources Association.* 2008;44(5):1208-1218. https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2008.00217.x.

2. Marchi L., Borga M., Preciso E., Gaume E. Characterisation of selected extreme flash floods in Europe and implications for flood risk management. *Journal of Hydrology*. 2010;394(1-2):118-133. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.017.

3. Ahmadalipour A., Moradkhani H. A data-driven analysis of flash flood hazard, fatalities, and damages over the CONUS during 1996–2017. *Journal of Hydrology*. 2019;578:124106. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124106.

4. Diakakis M. A method for flood hazard mapping based on basin morphometry: application in two catchments in Greece. *Natural Hazards*. 2011;56(3):803-814. https://doi.org/10.1007/s11069-010-9592-8.

5. Bathrellos G. D., Karymbalis E., Skilodimou H. D., Gaki-Papanastassiou K., Baltas E. A. Urban flood hazard assessment in the basin of Athens Metropolitan city, Greece. *Environmental Earth Sciences*. 2016;75(4):319. https://doi.org/10.1007/s12665-015-5157-1.

6. Meraj G., Romshoo S. A., Yousuf A. R., Altaf S., Altaf F. Assessing the influence of watershed characteristics on the flood vulnerability of Jhelum basin in Kashmir Himalaya. *Natural Hazards*. 2015;77(1):153-175. https://doi.org/10.1007/s11069-015-1605-1.

7. Angillieri M. Y. E. Morphometric analysis of Colangüil river basin and flash flood hazard, San Juan, Argentina. *Environmental Geology*. 2008;55(1):107-111. https://doi.org/10.1007/s00254-007-0969-2.

8. Parveen R., Kumar U., Singh V. K. Geomorphometric characterization of Upper South Koel basin, Jharkhand: a remote sensing & GIS approach. *Journal of Water Resource and Protection*. 2012;4(12):1042-1050. https://doi.org/10.4236/jwarp.2012.412120.

9. Waikar M. L., Nilawar A. P. Morphometric analysis of a drainage basin using geographical information system: a case study. *International Journal of Multidisciplinary and Current Research*. 2014;2:179-184.

10. Kleinen T., Petschel-Held G. Integrated assessment of changes in flooding probabilities due to climate change. *Climatic Change*. 2007;81(3-4):283-312. https://doi.org/10.1007/s10584-006-9159-6.

11. Halmstad A., Najafi M. R., Moradkhani H. Analysis of precipitation extremes with the assessment of regional climate models over the Willamette River basin, USA. *Hydrological Processes*. 2013;27(18):2579-2590. https://doi.org/10.1002/hyp.9376.

12. Kundzewicz Z. W., Kanae S., Seneviratne S. I., Handmer J., Nicholls N., Peduzzi P., et al. Flood risk and climate change: global and regional perspectives. *Hydrological Sciences Journal*. 2014;59(1):1-28. https://doi.org/10.1080/02626667.2013.857411.

13. Oyunbaatar D. *Floods in Mongolia*. Available from: https://www.restec.or.jp/geoss_ap3/pdf/day2/WG/WG2/Short_Country_Reports/08_Mongolia.pdf. [Accessed 12th August 2021].

14. Seminsky K. Zh., Levi K. G., Dzhurik V. I., Kozyreva E. A., San'kov V. A., Turutanov E. Kh. *Hazardous geological processes and forecasting of natural disasters in the territory of Central Mongolia*. Irkutsk: Irkutsk State University; 2017. 331 p. (In Russ.).

15. Sato T., Kimura F., Kitoh A. Projection of global warming onto regional precipitation over Mongolia using a regional climate model. *Journal of Hydrology*. 2007;333(1): 144-154. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.07.023.

16. Saizen I., Tsutsumida N. The rapid development of settlements in flood-prone areas in peri-urban Ulaanbaatar, Mongolia: monitoring and spatial analysis using VHR satellite imageries. In: Banba M., Shaw R. (eds.*). Land use management in disaster risk reduction*. Tokyo: Springer; 2017. p.137–148.

17. Ashley S. T., Ashley W. S. Flood fatalities in the United States. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2008;47(3):805-818. https://doi.org/10.1175/2007JAMC1611.1.

18. Khishigjargal M., Dulamsuren C., Leuschner H. H., Leuschner C., Hauck M. Climate effects on inter- and intra-annual larch stemwood anomalies in the Mongolian forest-steppe. *Acta Oecologica*. 2014;55:113-121. https://doi.org/10.1016/j.actao.2013.12.003.

19. Horton R. E. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Bulletin of the Geological Society of America*. 1945;56(3):275-370. https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2.

20. Horton R. E. Drainage-basin characteristics. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*. 1932;13(1): 350-361. https://doi.org/10.1029/TR013i001p00350.

21. Schumm S. A. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. *Bulletin of the Geological Society of America*. 1956;67(5):597-646. https://doi.org/10.1130/0016-7606(1956)67[597:EODSAS]2.0.CO;2.

22. Melton M. A. The geomorphic and paleoclimatic significance of alluvial deposits in southern Arizona. *The Journal of Geology*. 1965;73(1):1-38.

23. Auzina L. I., Parshin A. V. System-integrated GIS-based approach to estimating hydrogeological conditions of oil-and-gas fields in Eastern Siberia. *IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science*. 2016;33: 012060. https://doi.org/10.1088/1755-1315/33/1/012060.

Информация об авторах / Information about the authors

Козырева Елена Александровна,
доктор геолого-минералогических наук,
заместитель директора по научной работе,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
kozireva@crust.irk.ru,
https://orcid.org/000-002-0568-65-61.
Elena A. Kozyreva,
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.),
Deputy Director for Research,
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russia,
kozireva@crust.irk.ru,
https://orcid.org/000-002-0568-65-61.

Рыбченко Артем Александрович,
кандидат геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник Лаборатории инженерной геологии и геоэкологии,
Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
rybchenk@crust.irk.ru,
https://orcid.org/0000-0003-2615-8423.
Artem A. Rybchenko,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Senior Researcher, Laboratory of Engineering Geology,
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russia,
rybchenk@crust.irk.ru,
https://orcid.org/0000-0003-2615-8423.

Дэмбэрэл Содномсамбуу,
доктор геолого-минералогических наук,
академик Монгольской академии наук,
директор,
Институт астрономии и геофизики Монгольской академии наук,
г. Улан-Батор, Монголия,
demberel@iag.ac.mn,
https://orcid.org/0000-0002-1023-0075.
Sodnomsambuu Demberel,
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.),
Academician of the Mongolian Academy of Sciences,
Director,
Institute of Astronomy and Geophysics, Mongolian Academy of Sciences,
Ulaanbaatar, Mongolia,
demberel@iag.ac.mn,
https://orcid.org/0000-0002-1023-0075.

Вклад авторов / Contribution of the authors

Публикация подготовлена совместно российско-монгольским коллективом. Полевые работы и сбор материала проведены совместно. Данные из средств массовой информации, а также климатические данные предоставлены монгольскими коллегами. Статистическая обработка, построение электронных карт и получение расчетных характеристик, аналитическая работа выполнены российскими коллегами.

The publication was prepared by a joint Russian-Mongolian team. Field work and collection of material were carried out jointly. Media information as well as climate data were provided by Mongolian colleagues. Russian colleagues performed statistical processing and electronic mapping, obtained design characteristics and carried out analytical work.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 03.08.2021; одобрена после рецензирования 12.10.2021; принята к публикации 16.11.2021.
The article was submitted 03.08.2021; approved after reviewing 12.10.2021; accepted for publication 16.11.2021.