

УДК: 551.4.013:631.459

DOI: 10.35595/2414-9179-2021-2-27-241-252

М.А. Кондратьева¹, А.Н. Чашчин¹**ОЦЕНКА ЭРОЗИОННОЙ ОПАСНОСТИ РЕЛЬЕФА НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ****АННОТАЦИЯ**

На базе цифровой модели рельефа (ЦМР) по обобщенным данным из USGS STRM DEM и ASTER GDEM с разрешением 3" с помощью ГИС-технологий выполнен морфометрический анализ территории Пермского края в масштабе 1:2,5 млн и создана серия морфометрических карт, а также оценочная карта эрозионной опасности рельефа. Согласно результатам морфометрического анализа, значения показателя вертикального расчленения рельефа в регионе варьируют в пределах 0–623 м при средних значениях показателя 44 м. Крутизна склонов изменяется от 0 до 40° при средних значениях 3°. Горизонтальное расчленение, рассчитанное на основе сети тальвегов постоянных и временных водотоков, изменяется в интервале 0,145–1,202 км/км². Сравнение указанных морфометрических показателей на ключевых участках с данными, полученными традиционными методами морфометрического анализа, выявило их совпадение на уровне выделяемых градаций. Формированию значительного эрозионного потенциала территории Пермского края способствуют следующие геоморфологические факторы: широкое развитие склоновых поверхностей с перепадом высот свыше 50 м и уклонами, превышающими 3°. В соответствии с результатами картометрического анализа такие условия характеризуют 35 % площади региона. Более половины площади региона (60 %) имеют среднюю густоту эрозионного расчленения 0,5–0,8 км/км², еще 36 % площади характеризуется умеренными значениями показателя 0,2–0,5 км/км².

Рассчитанный индекс энергии рельефа имеет значения 3–13 баллов, на его основе выделены 4 категории эрозионной опасности рельефа. В соответствии с полученными результатами, большая часть территории Пермского края (63,0 %) характеризуется слабоэрозионноопасным рельефом, 36,6 % средне- и сильноэрозионноопасным. Доля земель, рельеф которых характеризуется нулевым эрозионным потенциалом, составляет 0,4 % площади края.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: эрозионная опасность, цифровая модель рельефа, SRTM, ASTER, ГИС-технологии, Пермский край, морфометрический анализ.

Mariya A. Kondrateva², Aleksey N. Chashchin²**ASSESSMENT OF EROSION RISK OF RELIEF BASED ON THE DIGITAL MODELING****ABSTRACT**

On the basis of a digital elevation model (DEM) based on generalized data from USGS STRM DEM and ASTER GDEM with a resolution of 3" with the help of GIS technologies, a

¹ Пермский государственный аграрно-технологический университет, ул. Петропавловская, д. 23, 614000, Пермь, Россия *e-mail:* pochva@pgsha.ru

² Perm State Agro-Technological University, Petropavlovskaya str., 23, 614000, Perm, Russia, *e-mail:* pochva@pgsha.ru

morphometric analysis of the territory of the Perm Territory at a scale of 1:2.5 million was carried out and a series of morphometric maps was created, as well as an assessment map of the erosion hazard of the relief. According to the results of morphometric analysis, the values of the index of vertical dissection of the relief in the region vary within the range of 0–623 m with an average value of 44 m. The steepness of slopes varies from 0 to 40° with average values of 3°. The horizontal dissection, determined on the basis of the thalweg network of permanent and temporary streams, varies in the range of 0.145–1.202 km/km². Comparison of morphometric indicators in key areas with the data obtained by traditional methods of morphometric analysis revealed their coincidence at the level of gradations. The following geomorphological facies curtains: wide development of slope surfaces with elevation differences over 50 m and slopes exceeding 3°. According to the results of cartometric analysis, such conditions characterize 35 % of the region's area. More than half of the region's area (60 %) has an average density of erosional dissection of 0.5–0.8 km/km², another 36% of the area is characterized by moderate values of 0.2–0.5 km/km².

The calculated relief energy index has a value of 3–13 points; on its basis, 4 categories of relief erosion hazard were identified. In accordance with the results obtained, most of the Perm Territory (63.0 %) is characterized by a low erosion hazardous relief, 36.6 % by a medium and highly erosion hazardous. The share of land, the relief of which is characterized by zero erosion potential, is 0.4 % of the region's area.

KEYWORDS: erosion hazard, digital elevation model, SRTM, ASTER, GIS technologies, Perm region, morphometric analysis.

ВВЕДЕНИЕ

В Пермском крае водная эрозия является одним из наиболее негативных факторов деградации почв и агроландшафтов, источником загрязнения поверхностных вод, нарушения экологического равновесия в природно-антропогенных геосистемах. По масштабу проявления эрозионных процессов регион занимает одно из первых мест в зоне Нечерноземья, площади эродированных пахотных угодий оцениваются в 932 тыс. га, еще 219 тыс. га кормовых угодий являются потенциально эрозионноопасными [Скрябина, 1990]. Одним из важнейших факторов, определяющих эрозионный потенциал территории, является рельеф. Его влияние определяется воздействием на формирование и перераспределение атмосферных осадков, распределение почв, растительности, типов использования земель [Осинцева, 2003; Papaiordanidi and etc., 2019]. Расчёт эрозионного потенциала рельефа в зависимости от используемой методики смыва может быть разным, однако все исследователи сходятся во мнении, что это функция от крутизны и длины склонов. Оценка потенциальной опасности эрозии по условиям рельефа может быть выполнена на основе комплекса морфометрических показателей, таких как вертикальное и горизонтальное расчленения рельефа, уклоны поверхности. Геоинформационные технологии и глобальные ЦМР существенно упрощают получение количественного материала о рельефе и успешно используются в морфометрическом анализе [Mondal and etc., 2017; Ramesh. Dikpal and etc., 2017; Bogale, 2021]. Для расчёта морфометрических характеристик в настоящее время используют ЦМР, построенные на регулярной растровой основе. Наиболее востребованными большинством исследователей на сегодняшний день являются модели рельефа, полученные в ходе выполнения миссий SRTM. Радарная топографическая съёмка Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) – глобальная ЦМР с разрешением 1" и 3". ЦМР SRTM покрывает территорию, расположенную между 60° с.ш и 56° ю.ш. Съёмка проводилась в период с 11 по 22 февраля 2000 г с помощью SIR-C- и X-SAR-сенсоров, работающих по технологии радиолокационного синтезирования апертуры [Farr and etc., 2017].

Однако STRM не обеспечивает полного покрытия данными для всех регионов России. В частности, для северных территорий страны (выше 60° с.ш.) используются ЦМР из других источников, имеющих больший охват покрытия. Наиболее часто упоминаемый пример – модель рельефа «ASTER GDEM». Глобальная цифровая модель рельефа ASTER GDEM создана на основе сопоставления стереоснимков, выполненных посредством усовершенствованного спутникового радиометра теплового излучения и отражения (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer). Охват съёмки миссии ASTER покрывает территорию между 83° северной и южной широт фрагментами с разрешением 1". В настоящее время модель существует в двух версиях [Reuter and etc., 2009]. Все версии моделей SRTM и ASTER GDEM распространяются с использованием географических координат на основе референц-эллипсоида WGS84.

Обобщение таких разнородных данных: USGS STRM DEM и ASTER GDEM, а также информацию о рельефе из топографических карт представляет проект Viewfinder Panoramas, автором которого является Jonathan de Ferranti [Ferranti, 2014]. Результат его работы содержит синтез цифровой информации о высотах, охватывающей почти всю планету. Эти открытые данные представлены на сайте¹.

Основной характеристикой ЦМР, которая определяет точность производных морфометрических величин, является ошибка определения абсолютной высоты. Средние ошибки по высоте в различных версиях моделей колеблются от долей метра до 10–11 м по модулю [Думит, 2007; Оньков и др., 2012; Мальцев и др., 2018; Frey, 2018], средние ошибки уклонов варьируют от 2.54° до 7.37° для SRTM и 1.21–4.73° для ASTER GDEM [Szabó G. and etc., 2015].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе были использованы цифровые данные о рельефе собранные из глобальных ЦМР USGS STRM DEM и ASTER GDEM в проекте Viewfinder Panoramas [Ferranti, 2014] с разрешением 3" (размер ячейки 90 × 90 м).

Расчет морфометрических показателей рельефа осуществлялся в соответствии с методиками, описанными в работах Д.М. Курловича [2013, 2014], В.А. Михайлова [2015]. Оценка эрозионной опасности рельефа производилась на основе методических подходов, изложенных в работах Н.В. Осинцевой [2003], Е.А. Позаченюк [2016], А.И. Павловой [2016].

Расчет морфометрических показателей рельефа, все карты и атрибутивные базы данных к ним созданы с помощью программы QGIS версии 3.16.6 в системе координат: EPSG:32640–WGS 84 / UTM zone 40N; координатная сетка построена на основе системы координат: EPSG:4326–WGS 84. При выполнении карты эрозионной опасности использовался метод классификации «Переклассификация значений в наборе растров по единой шкале».

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Территории Пермского края располагается в пределах северо-восточной окраины Восточно-Европейской равнины и западных склонов Среднего и Северного Урала. Отметки высот в равнинной части края составляют 200–400 м. В центральной и южной частях Восточно-Европейской равнины преобладает возвышенный рельеф с высотами 250–446 м.

¹ Viewfinder Panoramas. Электронный ресурс: <http://www.viewfinderpanoramas.org> (дата обращения 20.01.2021).

Низменный рельеф с отметками 110-200 м характерен для северных районов, долины реки Кама и её притоков. Минимальная высота 66 м над уровнем моря соответствует урезу воды Камы на юго-западе края. Рельеф Среднего Урала низкогорный с высотами 600–800 м и наивысшей отметкой 994 м (г. Средний Басег). Для Северного Урала типичны высоты 800–1400 м, здесь же находится наивысшая высотная отметка региона 1469 м (г. Тулымский Камень).

Для оценки эрозионной опасности рельефа была создана серия базовых морфометрических карт: крутизны склонов, вертикального и горизонтального расчленения.

Крутизна склонов относится к числу важнейших базовых морфометрических показателей. Геоморфологическое значение этого параметра состоит в том, что он определяет скорость перемещения потоков вдоль земной поверхности под действием гравитации. В условиях таежно-лесной зоны начальные признаки эрозии почв появляются при уклонах поверхности чуть более 2°, а при уклонах более 3° в следствии значительного развития эрозии рекомендовано исключение из севооборотов пропашных культур и проведение противоэрозионных мероприятий. Значения данного параметра, установленные традиционными методами, для территории Пермского края изменяются от 1 до 6–7° в равнинной части и достигают 10–35° в горной [Шимановский, 1985].

Построение карты крутизны склонов на основе раstra ЦМР выполнено с помощью инструмента «Крутизна» в модуле QGIS «Морфометрический анализ». Полученные значения уклонов поверхности на территории края варьируют от 0 до 40° (табл. 1). Незначительные уклоны поверхности до 1° преобладают на севере равнинной части, на юге крутизна склонов возрастает до значений 5–8°. Максимальные значения показателя характерны для горной части края, где они достигают 15 и более градусов (рис. 1а). В целом на долю поверхностей с крутизной более 3° приходится 35 % площади региона.

Карта вертикального расчленения рельефа (базисов эрозии) характеризует амплитуду колебания высот в пределах участка местности и является важным фактором, определяющим эрозионную опасность рельефа. Расчёт вертикального расчленения выполнен в среде QGIS для сетки квадратов 1 × 1 км. Для расчёта глубины расчленения использован инструмент программы QGIS «Зональная статистика». С помощью раstra ЦМР создана атрибутивная таблица векторной сетки, содержащая информацию о минимальной и максимальной высотах и в которой выполнялась операция «вычесть». На основе векторного полигонального слоя был создан вектор центроидов с атрибутом разности максимальной и минимальной абсолютных высот в пределах каждого квадрата. Грид-модель «Вертикальное расчленение рельефа» выполнена путём интерполяции данных слоя центроидов по методу «Регуляризованный сплайн с натяжением» (рис. 1а).

Вертикальное расчленения имеет тесную связь с гипсометрией, наивысшие показатели вертикального расчленения приурочены к максимальным отметкам рельефа [Шимановский, 1985; Копылов, 2019]. Полученные минимальные и максимальные значения показателя составили 0 и 623 м при средних значениях 44 м (табл. 1). Приводимые в литературе данные о крайних значениях показателя существенно разнятся. Так, по данным Л.А. Шимановского [1985], минимальные и максимальные значения составляют соответственно 4 и 1077 м, по материалам И.С. Копылова [2019], – это 1 и 1240 м. Вместе с тем, анализ распределения значений вертикального расчленения удовлетворительно согласуется с данными Л.А. Шимановского [1985], приводимыми для основных геоморфологических районов региона. В равнинной части края вертикальное расчленение рельефа изменяется от 0–50 м на севере до 100–200 м на юге, в горной возрастает до максимальных величин 400–600 м.

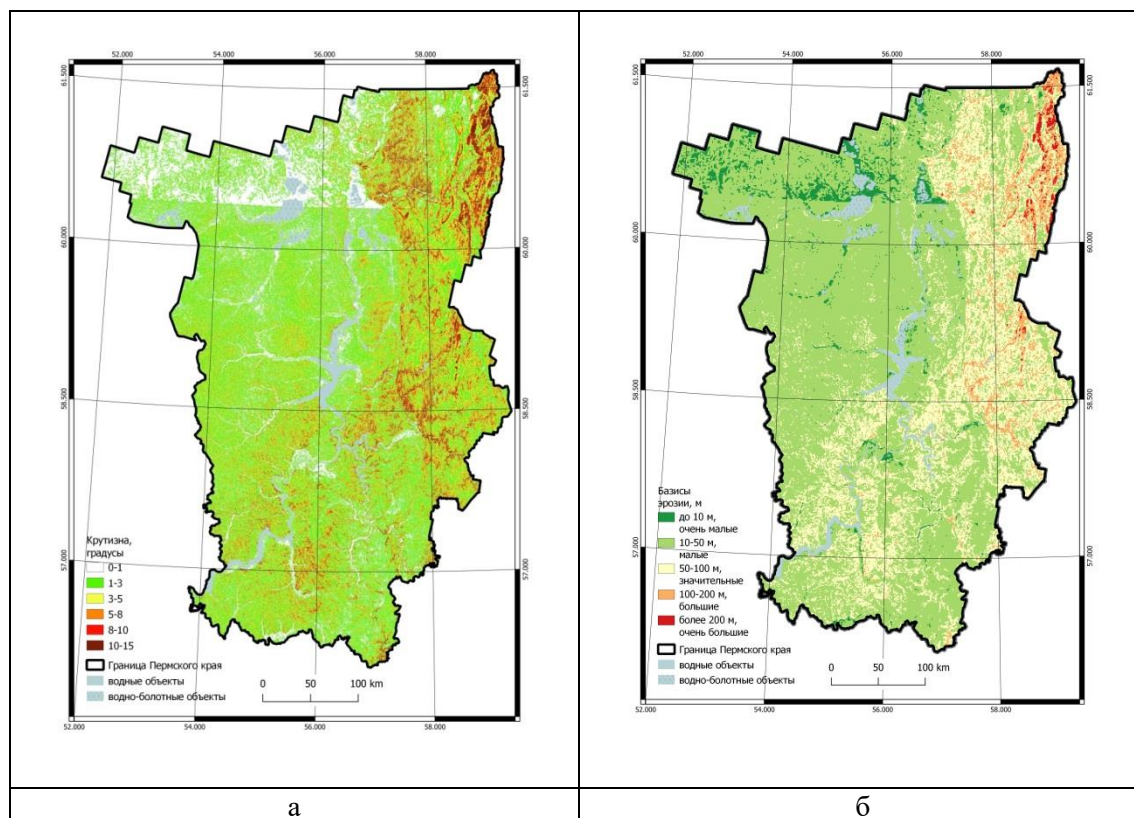


Рис. 1. Карты крутизны склонов (а) и вертикального расчленения (б)
 Fig. 1. Slope steepness (a) and vertical dismemberment of a territory (b) maps

Горизонтальное расчленение поверхности рельефа характеризуется суммарной длиной линий тальвегов, приходящихся на единицу площади. Данный морфометрический параметр позволяет оценить величину площади водосборов и длину склонов. Так, формирование объема воды, способного к размыву дернового слоя, может происходить при густоте расчленения 0,4–0,8 м/км² при условии значительного перепада высот [Путилин, 1988]. Величины горизонтального расчленения находятся в обратной зависимости с вертикальным расчленением рельефа, поскольку распределение водной массы по многочисленным водотокам снижает энергию глубинного расчленения территории [Шимановский, Шимановская, 1970].

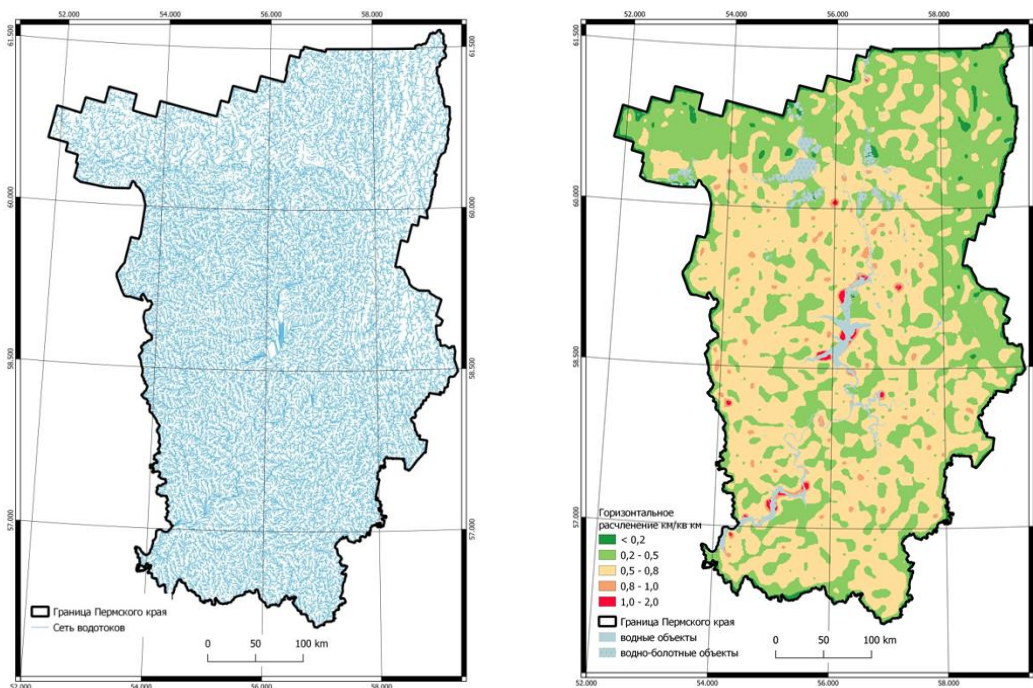
Для определения густоты эрозионного расчленения рельефа с помощью инструмента QGIS SAGA Basic terrain analysis из растра SRTM в векторный слой извлекались линии тальвегов постоянных и временных водотоков. Общее количество извлечённых линий тальвегов составило 46920 с минимальной и максимальной длиной 64 и 34615 м соответственно (рис. 2а).

Табл. 1. Данные описательной статистики морфометрических показателей
 Table 1. Descriptive statistics of morphometric indicators

Морфометрические показатели	Значения		
	мин.	макс.	среднее
Длина линий тальвегов, м	64	34615	1804
Вертикальное расчленение, м	0	623	44
Горизонтальное расчленение, км/км ²	0,145	1,202	0,516
Крутизна склонов, градусы	0	40	3

Расчет густоты расчленения рельефа осуществлялся для сетки квадратов 8×8 км векторного полигонального слоя с последующим преобразованием данных в векторный слой центроидов, на основе которого была создана грид-модель «Горизонтальное расчленение рельефа».

Густота эрозионного расчленения изменяется от $0,145$ до $1,202$ км/км², составляя в среднем $0,516$ км/км². Фоновыми значениями для территории региона являются величины $0,5$ – $0,8$ км/км² (рис. 2б). Максимальная густота эрозионного расчленения, превышающая $1,0$ км/км², отмечается в центральных и южных районах равнинной части края, в то время как север и восток края характеризуются низкой и умеренной величиной горизонтального расчленения $0,2$ – $0,5$ км/км² и менее. Имеющиеся в научных источниках данные, полученных на основе анализа картографических материалов, характеризуются значительным разбросом значений. Так, по данным О.Л. Шимановской, Л.А. Шимановского [1970], густота речной сети в крае колеблется в пределах $0,01$ – $1,73$ км/км², составляя в среднем $0,66$ км/км². По данным О.Л. Алексеевой [1982] и И.С. Копылова [2019], значения данного показателя находятся в пределах $0,2$ – $1,5$ и $0,1$ – $1,5$ км/км² соответственно. В работе О.А. Скрыбиной [1990] приводятся значения густоты долинно-балочной сети в регионе $0,26$ – $0,96$ км/км².



а

б

Рис. 2. Карты эрозионной сети (а) и горизонтального расчленения (б)

Fig. 2. Maps of the erosion network (a) and of the horizontal dismemberment (b)

Оценка эрозионной опасности рельефа выполнена на основе комплекса рассчитанных морфометрических показателей. Их индивидуальная оценка производилась по шестибальной шкале в соответствии с градациями, принятыми в почвенно-картометрической практике (табл. 2). Категории эрозионной опасности рельефа выделены на основе интегрального показателя энергии рельефа, определяемого как сумма индивидуальных оценочных баллов показателей вертикального и горизонтального

расчленения, а также преобладающей крутизны склонов. Данный показатель позволяет судить о вероятности и динамике проявления процессов водной эрозии.

Табл. 2. Оценочные шкалы морфометрических показателей рельефа
Table 2. Evaluation scales of morphometric parameters of the relief

Балл	Горизонтальное расчленения рельефа, км/км ²	Вертикальное расчленения рельефа, м	Уклоны поверхности, °
1	<0,2	<10	<1,5
2	0,2-0,5	10-50	1,5-3
3	0,5-0,8	50-100	3-6
4	0,8-1,0	100-200	6-8
5	1-2	>200	8-12
6	>2	-	>12

Преобразование непрерывных растров морфометрических характеристик рельефа в дискретные растры баллов осуществлялось методом переклассификации (по типу «Переклассификация значений в наборе растров по единой шкале») в растровом калькуляторе QGIS. В ходе процесса геообработки было создано 4 промежуточных дискретных растра с балльными оценками показателей крутизны склонов, вертикального и горизонтального расчленения, а также интегральной оценки энергии рельефа (рис. 3а). Последующий пересчёт в категории эрозионной опасности (рис. 3б) выполнен из растра интегральной оценки энергии рельефа.

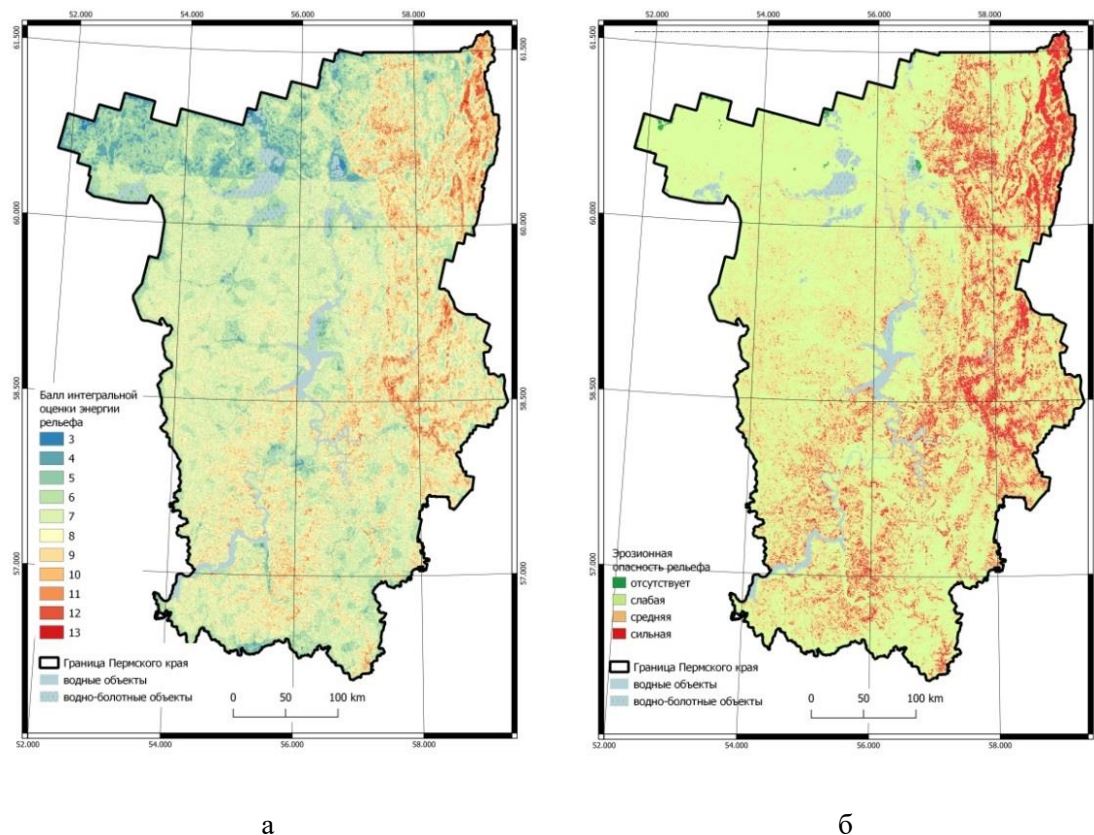


Рис. 3. Карты интегральной оценки энергии рельефа (а) и эрозионной опасности рельефа (б)
Fig. 3. Maps of the integrated assessment of the energy of the relief (a) and categories of erosion hazard (b)

Интегральная оценка энергии рельефа (табл. 3) изменяется в диапазоне значений 3–13 при средних значениях 7 баллов. Минимальные значения 3–5 баллов соответствуют низменному рельефу севера края, долины Камы и ее притоков, максимальные 11–13 баллов получены для горного рельефа на востоке региона.

Табл. 3. Распределение территории Пермского края по категориям эрозионной опасности рельефа
Table 3. Distribution of the area of the Perm Territory by categories of erosion hazard of the relief

Категории эрозионной опасности рельефа	Интегральная оценка эрозионной опасности, баллы	Площадь,	
		км ²	% от общей площади
Отсутствует	3	559,03	0,4
Слабая	4-7	101190,80	63,0
Средняя	8-9	43784,64	27,3
Сильная	10-13	15006,21	9,3

В соответствии со значениями интегрального балла эрозионной опасности путём экспертного оценивания на территории региона выделено 4 категории рельефа (табл. 3). На долю земель со средней и сильной эрозионной опасностью рельефа приходится около 37 % площади региона. Основные ареалы земель с сильной эрозионной опасностью сосредоточены на юге и востоке края. Этому способствуют преобладание уклонов свыше 3° и значительные базисы эрозии, превышающие 50 м. Учитывая тот факт, что основные площади обрабатываемых земель располагаются на юге равнинной части края, риск развития водной эрозии почв в этой части региона здесь наиболее высок. Это подтверждают данные о смытых почвах: в южных районах края доля средне- и сильносмытых почв на пашне достигает 55 % от её площади [Скрябина, 1990]. Слабая эрозионная опасность характерна для рельефа севера и крайнего северо-востока равнинной части региона, долины Камы и ее притоков. Низкий эрозионный потенциал связан с незначительными уклонами, не превышающими 3°, и слабым вертикальным расчленением рельефа в пределах 0–50 м. При общей невысокой распаханности в этой части региона доля слабосмытых почв на пашне не превышает 25 % [Скрябина, 1990].

ВЫВОДЫ

Разнообразие геоморфологических условий на территории Пермского края определяют различия в потенциале её эрозионной опасности. Для оценки эрозионной опасности рельефа на основе глобальной ЦМР построена серия мелкомасштабных карт, отображающие базовые морфометрические показатели: крутизна склонов, вертикальное и горизонтальное расчленение. Формированию значительного эрозионного потенциала на территории края способствуют следующие условия: значительное участие поверхностей рельефа с вертикальным расчленением более 50 м и уклонами поверхности свыше 3°, на долю которых приходится 35 % площади. Низкая эрозионная опасность характеризует рельеф с вертикальным расчленением в пределах 10–50 м и уклонами поверхности 1–3°. Полученные с помощью ЦМР значения горизонтального расчленения отличаются слабым варьированием: 96 % территории края отнесены к двум градациям показателя с умеренным и средним расчленением 0,2–0,8 км/км². Таким образом, их влияние на интегральную оценку эрозионной опасности рельефа следует признать незначительным.

Построенная карта эрозионной опасности рельефа содержит 4 категории, выделенные на основе экспертного оценивания: 63 % площади края характеризуются

слабоэрозионноопасным рельефом, 35 % средне- и сильноэрозионноопасным. Доля земель, рельеф которых характеризуется нулевым эрозионным потенциалом, составляет менее 0,5 % площади региона.

Полученные морфометрические карты, а также оценочная карта эрозионной опасности рельефа региона могут быть использованы для оценки рисков развития эрозии при планировании хозяйственной деятельности в сфере сельского и лесного хозяйства, промышленного и коммунального строительства. Опробованная методика оценки эрозионной опасности рельефа на основе данных глобальных ЦМР USGS STRM DEM и ASTER GDEM, может быть успешно реализована в других регионах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеева О.Л.* Суммарная расчлененность рельефа Пермской области. Физико-географические основы развития и размещения производительных сил Нечерноземного Урала: Междувед. сб. науч. трудов. Пермь: Перм. ун-т, 1982. С. 54–63.
2. *Думит Ж.А.* К вопросу об ошибках цифрового моделирования рельефа (морфометрический аспект). Географические исследования Краснодарского края: Сб. науч. тр. Краснодар: КубГУ, 2007. Вып. 2. С. 49–53.
3. *Копылов И.С.* Морфонеотектоническая система оценки геодинамической активности: монография. Пермь, 2019. 131 с. Электронный ресурс: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/mono/kopylov-morfoneotektonicheskaya-sistema-ocenki-geodinamicheskoy-aktivnosti.pdf> (дата обращения 20.01.2021)
4. *Курлович Д.М.* Морфометрический ГИС-анализ рельефа Беларуси. Земля Беларуси. 2013. № 4. С. 42–48.
5. *Курлович Д.М.* Пространственная дифференциация и динамика морфоструктур Белорусского Поозерья. Минск: БГУ, 2014. 158 с.
6. *Мальцев К.А., Голосов В.Н., Гафуров А.М.* Цифровые модели рельефа и их использование в расчётах темпов смыва почв на пахотных землях. Ученые записки Казанского университета. Сер. Естественные науки. 2018. Т. 160. Кн. 3. С. 514–530.
7. *Михайлов В.А.* Комплексный морфометрический анализ Тарханкутского полуострова с помощью ГИС. Современные научные исследования и инновации. 2015. № 2. Электронный ресурс: <http://web.snauka.ru/issues/2015/02/46640> (дата обращения 20.01.2021).
8. *Оньков И.В., Онянова Т.Я., Шилыева О.Ю.* Исследование точности радарных ЦМР, построенных по снимкам ALOS PALSAR и модели SRTM, в зависимости от вида отражающей поверхности. Геоматика. 2012. № 4. С. 33–36.
9. *Осинцева Н.В.* Оценка эрозионной опасности рельефа территории г. Томска. Вопросы географии Сибири. Вып. 25. Томск: Томский гос. ун-т, 2003. С. 56–66.
10. *Павлова А.И.* Применение методов цифрового моделирования рельефа для картографирования эрозионных земель. В мире научных открытий. 2016. №2(74) С. 159–167.
11. *Позаченюк Е.А., Петлюкова Е.А.* ГИС-анализ морфометрических показателей рельефа Центрального предгорья главной гряды Крымских гор для целей ландшафтного планирования. Учёные записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. Т. 2 (68). 2016. №2. С. 95–111.
12. *Путилин А.Ф.* Оврагообразование на юго-востоке Западной Сибири. Новосибирск, 1988. 81 с.

13. *Скрябина О.А.* Водная эрозия почв и борьба с ней. Пермь: Пермское книжное издательство, 1990. 246 с.
14. *Шимановская О.Л., Шимановский Л.А.* Густота речной сети Пермской области и закономерности ее формирования. Физико-географические основы развития и размещения производительных сил Нечерноземного Урала: Межвуз. сб. науч. трудов. Пермь: Перм. ун-т, 1970. С. 102–110.
15. *Шимановский Л.А.* Геоморфологическое районирование Пермской области. Физико-географические основы развития и размещения производительных сил Нечерноземного Урала: Межвуз. сб. науч. трудов. Пермь: Перм. ун-т, 1985. С. 66–79.
16. *Bogale A.* Morphometric analysis of a drainage basin using geographical information system in Gilgel Abay watershed, Lake Tana Basin, upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Appl. Water Sci.* 2021. V. 11 (122). P. 1–7. DOI: 10.1007/s13201-021-01447-9.
17. *Farr T.G., Rosen P.A., Caro E. and etc.* The Shuttle Radar Topography Mission. *Rev. Geophys.* 2007. V. 45. No 2. Art. RG2004. P. 1–33. DOI: 10.1029/2005RG000183.
18. *Ferranti J.* Viewfinder panoramas. 2014: Digital elevations data. Электронный ресурс: URL: <http://viewfinderpanoramas.org/dem3.html> (дата обращения 10.04.2021).
19. *Frey H., Paul F.* On the suitability of the SRTM DEM and ASTER GDEM for the compilation of topographic parameters in glacier inventories. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 2012. V. 18. P. 480–490. DOI: 10.1016/j.jag.2011.09.020.
20. *Mondal A., Khare D., Kundu S., Mukherjee S., Mukhopadhyay A., Mondal S.* Uncertainty of soil erosion modelling using open source high resolution and aggregated DEMs. *Geosci. Frontiers.* 2017. V. 8. No 3. P. 425–436. DOI: 10.1016/j.gsf.2016.03.004.
21. *Papaiordanidis S., Gitas I.Z., Katagis T.* Soil erosion prediction using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in Google Earth Engine (GEE) cloud-based platform. *Dokuchaev Soil Bulletin.* 2019. V. 100. P. 36–52. DOI: 10.19047/0136-1694-2019-100-36-52.
22. *Ramesh L. Dikpal, Renuka Prasad T. J., Satish K.* Evaluation of morphometric parameters derived from Cartosat-1 DEM using remote sensing and GIS techniques for Budigere Amanikere watershed, Dakshina Pinakini Basin, Karnataka, India. *Appl. Water Sci.* 2017. V. 7. P. 4401–4414. DOI: 10.1007/s13201-017-0585-6.
23. *Reuter H.I., Nelson A., Strobl P., Mehl W., Jarvis A.* A first assessment of Aster GDEM tiles for absolute accuracy, relative accuracy and terrain parameters. 2009 IEEE Int. Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2009. V. 5. P. 240–243. DOI: 10.1109/IGARSS.2009.5417688.
24. *Szabó G., Singh S.K., Szabó S.* Slope angle and aspect as influencing factors on the accuracy of the SRTM and the ASTER GDEM database. *Phys. Chem. Earth, Parts A/B/C.* 2015. V. 83–84. P. 137–145. DOI: 10.1016/j.pce.2015.06.003.

REFERENCES

1. *Alekseeva O.L.* The total dissection of the relief of the Perm region. Physical and geographical bases of development and distribution of productive forces of the Non-Chernozem Urals: Interv. Sat. scientific. works. Perm: Izdatel'stvo Permskogo universiteta, 1982. P. 54–63 (in Russian).
2. *Bogale A.* Morphometric analysis of a drainage basin using geographical information system in Gilgel Abay watershed, Lake Tana Basin, upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Appl. Water Sci.* 2021. V. 11 (122). P. 1–7. DOI: 10.1007/s13201-021-01447-9.

3. *Dumit Zh.A.* On the issue of errors in digital modeling of relief (morphometric aspect). Geographic studies of the Krasnodar Territory: Ser. Natural Sciences. Krasnodar: KubSU, 2007. Issue. 2. P. 49–53.
4. *Farr T.G., Rosen P.A., Caro E. and etc.* The Shuttle Radar Topography Mission. Rev. Geophys. 2007. V. 45. No 2. Art. RG2004. P. 1–33. DOI: 10.1029/2005RG000183.
5. *Ferranti J.* Viewfinder panoramas. 2014: Digital elevations data. Web resource. URL: <http://viewfinderpanoramas.org/dem3.html> (accessed 10.04.2021).
6. *Frey H., Paul F.* On the suitability of the SRTM DEM and ASTER GDEM for the compilation of topographic parameters in glacier inventories. Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf. 2012. V. 18. P. 480–490. DOI: 10.1016/j.jag.2011.09.020.
7. *Kopylov I.S.* Morphoneotectonic system for assessing geodynamic activity: monograph Perm, 2019. 131 p. Web resource: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/mono/kopylov-morfoneotektonicheskaya-sistema-ocenkegeodinamicheskoy-aktivnosti.pdf> (accessed 20.01. 2021) (in Russian).
8. *Kurlovich D.M.* Morphometric GIS analysis of the relief of Belarus. Land of Belarus. 2013. No 4. P. 42–48 (in Russian).
9. *Kurlovich D.M.* Spatial differentiation and dynamics of morphostructures of the Belarusian Poozerie. Minsk: BSU, 2014. 158 p. (in Russian).
10. *Maltsev K.A., Golosov V.N., Gafurov A.M.* Digital Elevation Models and Their Use for Assessing Soil Erosion Rates on Arable Lands. Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series. Ser. Natural Sciences. 2018. V. 160. No 3. P. 514–530 (in Russian).
11. *Mikhailov V.A.* Complex morphometric analysis of the Tarkhankut peninsula using GIS. Modern scientific research and innovations. 2015. No 2. Web resource: <http://web.snauka.ru/issues/2015/02/46640> (accessed 20.01.2021) (in Russian).
12. *Mondal A., Khare D., Kundu S., Mukherjee S., Mukhopadhyay A., Mondal S.* Uncertainty of soil erosion modelling using open source high resolution and aggregated DEMs. Geosci. Frontiers. 2017. V. 8. No 3. P. 425–436. DOI: 10.1016/j.gsf.2016.03.004.
13. *Onkov I.V., Onyanova T.Ya., Shilyaeva O.Yu.* Investigation of the accuracy of radar DEMs built from ALOS PALSAR images and SRTM model, depending on the type of reflecting surface. Geomatics. 2012. No 4. P. 33–36 (in Russian).
14. *Osintseva N.V.* Assessment of the erosion hazard of the relief of the territory of Tomsk. Questions of the geography of Siberia. Issue 25. Tomsk: Tomsk state. un-t, 2003. P. 56–66 (in Russian).
15. *Papaiordanidis S., Gitas I.Z., Katagis T.* Soil erosion prediction using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in Google Earth Engine (GEE) cloud-based platform. Dokuchaev Soil Bulletin. 2019. V. 100. P. 36–52. DOI: 10.19047/0136-1694-2019-100-36-52.
16. *Pavlova A.I.* Application of digital terrain modeling methods for mapping erosional lands. In the world of scientific discoveries. 2016. No 2(74). P. 159–167 (in Russian).
17. *Pozachenyyuk E.A., Petlyukova E.A.* GIS analysis of morphometric indicators of the relief of the Central foothills of the main ridge of the Crimean mountains for the purposes of landscape planning. Scientific notes of the Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky. Geography. Geology. V. 2(68). 2016. No 2. P. 95–111 (in Russian).
18. *Putilin A.F.* Gully formation in the southeast of Western Siberia. Novosibirsk, 1988. 81 p. (in Russian).
19. *Ramesh L. Dikpal, Renuka Prasad T.J., Satish K.* Evaluation of morphometric parameters derived from Cartosat-1 DEM using remote sensing and GIS techniques for Budigere Amanikere watershed, Dakshina Pinakini Basin, Karnataka, India. Appl. Water Sci. 2017. V. 7. P. 4401–4414. DOI: 10.1007/s13201-017-0585-6.

20. *Reuter H.I., Neison A., Strobl P., Mehl W., Jarvis A.* A first assessment of Aster GDEM tiles for absolute accuracy, relative accuracy and terrain parameters. 2009 IEEE Int. Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2009. V. 5. P. 240–243. DOI: 10.1109/IGARSS.2009.5417688.
 21. *Scriabina O.A.* Water erosion of soil and its control. Perm: Permskoye knizhnoye izdatel'stvo, 1990. 24 p. (in Russian).
 22. *Shimanovskaya O.L., Shimanovsky L.A.* The density of the river network of the Perm region and the patterns of its formation. Physical and geographical bases of development and distribution of productive forces of the Non-Chernozem Urals. Perm: Izdatel'stvo Permskogo universiteta, 1970. P. 102–110 (in Russian).
 23. *Shimanovsky L.A.* Geomorphological zoning of the Perm region. Physical and geographical bases of development and distribution of productive forces of the Non-Chernozem Urals. Perm: Izdatel'stvo Permskogo universiteta, 1985. P. 66–79 (in Russian).
 24. *Szabó G., Singh S.K., Szabó S.* Slope angle and aspect as influencing factors on the accuracy of the SRTM and the ASTER GDEM databases. Phys. Chem. Earth. Parts A/B/C. 2015. V. 83–84. P. 137–145. DOI: 10.1016/j.pce.2015.06.003.
-