

Морфометрическая характеристика рельефа и оценка эрозионной опасности бассейна р. Калаус на основе цифрового моделирования

Евгений Г. Мишвелов¹, Артем И. Корниенко¹, Надира О. Гусейнова²,
Эдуард Е. Тихонов³, Елена Н. Павленко³

¹Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, Россия

²Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия

³НТИ (филиал) Северо-Кавказский федеральный университет, Невинномысск, Россия

Контактное лицо

Евгений Г. Мишвелов, доктор биологических наук, профессор, кафедра экологии и биогеографии, Северо-Кавказский федеральный университет; 355000 Россия, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1. Тел. +79614973994

Email mishvelov@mail.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-2004-9429>

Формат цитирования

Мишвелов Е.Г., Корниенко А.И., Гусейнова Н.О., Тихонов Э.Е., Павленко Е.Н. Морфометрическая характеристика рельефа и оценка эрозионной опасности бассейна р. Калаус на основе цифрового моделирования // Юг России: экология, развитие. 2024. Т.19, N 2. С. 147-159. DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-13

Получена 6 ноября 2023 г.

Прошла рецензирование 24 декабря 2023 г.

Принята 15 января 2024 г.

Резюме

Цель – проведение анализа эрозионной опасности в границах водосборного бассейна р. Калаус.

Использованы отраслевые и кадастровые карты, цифровая модель рельефа, космоснимки, официальные данные министерств и ведомств. Основой для проведения моделирования выступали геоинформационные системы – QGIS и SAGA GIS.

Приведены результаты ГИС-моделирования эрозионной опасности на территории бассейна р. Калаус. На основе цифровой модели рельефа (ЦМР) SRTM рассчитаны базовые морфометрические показатели рельефа: крутизну склонов, вертикальное и горизонтальное расчленение рельефа. На основе морфометрических показателей проведен интегральный расчет энергии рельефа и эрозионной опасности, создана серия соответствующих тематических карт. Полученные значения крутизны склонов в границах бассейна варьируют от 0° до 51° при средних значениях в 2,5°. Горизонтальное расчленение варьирует в интервале от 0 до 0,84 км/км², а базисы эрозии характеризуются разбросом значений от -15,0 до 248,6 м, при среднем значении в 33,0 м. Формированию эрозионного потенциала рельефа бассейна способствует расположение значительной части территории на отрогах Ставропольской возвышенности с широко развитыми уклонами. На основе рассчитанного раstra интегрального показателя энергии рельефа выделены 3 категории эрозионной опасности. Большая часть бассейна р. Калаус (58,4 %) характеризуется слабой эрозионной опасностью, еще 39,0 % территории приходится на среднюю эрозионную опасность, оставшиеся 2,9 % – к территориям с сильной эрозионной опасностью. Проведенная на основе ЦМР классификация форм поверхности рельефа по методу Ивахаши и Пайка показывает гораздо большую распространенность крутых склонов с высокой выпуклостью в юго-западной части бассейна р. Калаус.

Выявленные особенности уровня эрозионной опасности земель бассейна р. Калаус рекомендуется учитывать в прединвестиционной, предпроектной и проектной градостроительных сферах для территорий административных единиц, расположенных в границах бассейна, их ценность при планировании рационального землепользования также очевидна. Результаты работы могут быть использованы для проведения аналогичной оценки в других регионах, в первую очередь при организации сельскохозяйственного производства.

Ключевые слова

Речной бассейн, река Калаус, эрозионная опасность, Ставропольский край, ГИС-технологии, морфометрический анализ, сельскохозяйственные земли, SRTM, формы рельефа.

Morphometric characteristics of the relief and assessment of erosional hazards of the Kalaus River basin, Russia, based on digital modelling

Evgeny G. Mishvelov¹, Artem I. Kornienko¹, Nadira O. Guseynova²,
Edward E. Tikhonov³ and Elena N. Pavlenko³

¹North Caucasus Federal University, Stavropol, Russia

²Dagestan State University, Makhachkala, Russia

³NTI (branch) of the North Caucasus Federal University, Nevinnomyssk, Russia

Principal contact

Evgeny G. Mishvelov, Doctor of Biological Sciences,
Professor, Department of Ecology and
Biogeography, North Caucasus Federal University;
1 Pushkin St, Stavropol, Russia 3550000.
Tel. +79614973994
Email mishvelov@mail.ru
ORCID <https://orcid.org/0000-0003-2004-9429>

How to cite this article

Mishvelov E.G., Kornienko A.I., Guseynova N.O.,
Tikhonov E.E., Pavlenko E.N. Morphometric
characteristics of the relief and assessment of
erosional hazards of the Kalaus River basin, Russia,
based on digital modelling. *South of Russia:
ecology, development*. 2024; 19(2):147-159. (In
Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2024-2-13

Received 6 November 2023

Revised 24 December 2023

Accepted 15 January 2024

Abstract

In this work, the main goal was to analyse the erosional hazards within the boundaries of the Kalaus River catchment area.

The paper analyses the erosive state of the region's lands, for which industry and cadastral maps, a digital elevation model and satellite images were used. Official data of ministries and departments were used. Geographic information systems – QGIS and SAGA GIS – served as the basis for modelling. The article presents the results of GIS modeling of erosional hazards in the territory of the Kalaus River basin. Based on the (DEM) SRTM digital elevation model, the basic morphometric indicators of the relief were calculated: steepness of the slopes and vertical and horizontal dissection of the relief. Based on morphometric indicators, an integral calculation of the energy of relief and erosion hazard was carried out and a series of relevant thematic maps was created. The values of slope steepness obtained within the boundaries of the basin range from 0° to 51° with average values of 2.5°. The horizontal dissection varies in the range from 0 to 0.84 km/km², and the erosion bases are characterized by a range of values from – 15.0 to 248.6 m, with an average value of 33.0 m. The formation of the erosional potential of the basin's relief is facilitated by the location of a significant part of the region on the spurs of the Stavropol Upland, which have widely developed slopes. Based on the calculated raster of the integral energy index of the relief, 3 categories of erosional hazard are identified. Most of the basin of the Kalaus River (58.4 %) is characterised by a low erosion hazard, another 39.0 % of the territory presents an average erosion hazard, and the remaining 2.9 % belongs to territories with a strong erosion hazard. The classification of relief surface shapes based on the Iwahashi and Pike method, which was carried out on the basis of a DEM, shows a much greater prevalence of steep slopes with high convexity in the southern part of the Kalaus River basin.

The identified features of the level of erosional hazard of the lands of the Kalaus River basin are recommended to be taken into account in pre-investment, pre-design and urban project planning of the territories of administrative units located within the boundaries of the basin. Despite the fact that the results of GIS analysis cannot completely replace field erosion surveys, their value as a tool for planning rational land use is obvious. The results of the work can be used to carry out a similar assessment in other regions, primarily in the organisation of agricultural production.

Key Words

River basin, Kalaus River, erosion hazard, Stavropol Territory, GIS technologies, morphometric analysis, agricultural lands, SRTM, landforms.

ВВЕДЕНИЕ

В Стратегии пространственного развития Российской Федерации на период до 2025 года «пространственное развитие» трактуется как совершенствование системы расселения и территориальной организации экономики, в том числе за счет проведения эффективной государственной политики регионального развития. В документе констатируется рост концентрации производства сельскохозяйственной продукции на территориях РФ с наиболее благоприятными агроклиматическими и почвенными условиями. К таковым, безусловно, относится большая часть земель Южного федерального округа (ЮФО) и Северо-Кавказского федерального округа (СКФО).

Аграрный сектор, к примеру, Ставропольского края обеспечивает порядка 10 % валового сбора зерна в РФ, и в период с 2014 г. 9 раз превышал планку производства зерна в 8 млн т. Два года (2016 и 2017 гг.) стали рекордными – урожай превысил 10 млн т., на зерно при этом приходится 75 % стоимости всей сельскохозяйственной продукции края. Подобная нагрузка на земли сельскохозяйственного назначения, в первую очередь на пашню, обуславливает необходимость более внимательного отношения к факторам формирования почвенного плодородия и целостности почвенного покрова, даже при соблюдении необходимых технологических регламентов.

В то же время, климатические изменения последних десятилетий хотя и носили в целом положительный для растениеводства Ставропольского края характер, но при этом сопровождалось обострением проявления ряда неблагоприятных погодных явлений, увеличивающих риски для растениеводства. Например, зафиксирован значительный рост активных температур в засушливых районах при снижении количества осадков, что существенно повысило вероятность возникновения засух, действие которых усугубляется суховеями, сильными ветрами и пыльными бурями, что, в свою очередь, влияет на скорость и масштабы проявления эрозии почв. Кроме того, возросла повторяемость интенсивных осадков, приводящих к активизации экзогенных, в частности, водно-эрозионных процессов [1; 2].

В этой связи проблема сохранности почв в условиях реструктуризации и интенсификации растениеводства даже при положительных изменениях биопродуктивности климата приобретает новую остроту. Современные инструменты и технологии дистанционного зондирования Земли позволяют своевременно выявлять, оценивать и прогнозировать тренды развития динамических процессов для территорий со сложным рельефом в условиях нестабильного климата и повышенных антропогенных нагрузок. Мониторинг и оценка современного состояния в первую очередь актуальны для земель сельскохозяйственного назначения, именно по этой причине в настоящей работе объектом исследования послужил бассейн реки Калаус (доля земель сельскохозяйственного назначения более 90 %), а предметом – склоновые процессы территорий бассейна.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Применение ГИС-технологий в настоящее время становится неотъемлемой частью работ при исследовании и

оценке эрозионных процессов на территориях различного масштаба. Доступность исходных данных с достаточным для анализа пространственным разрешением в совокупности с быстрым развитием информационных технологий позволяют в сжатые сроки проводить объективную дистанционную оценку эрозионной трансформации поверхности рельефа. Подобная работа проделана отечественными и зарубежными специалистами для самых разнообразных по условиям территорий [3–8].

Вопросам региональной специфики эрозионных процессов Северо-Кавказского федерального округа России посвящено довольно большое количество работ [9–14]. Это связано, с одной стороны, с высоким сельскохозяйственным потенциалом региона, а с другой, обостряющимися, при интенсификации антропогенной деятельности, проблемами деградации земель. Кроме прочего, СКФО входит в перечень приоритетных регионов Российской Федерации для развития агропромышленного комплекса. Ставропольский край играет в этом ведущую роль, площадь земель сельскохозяйственного назначения здесь составляет более 6100 тыс. га. Эродированные земли при этом, по оценкам исследователей, составляют 914 тыс. га, что делает Ставропольский край вторым после республики Дагестан регионом СКФО по этому показателю [13].

Оценка эрозионной опасности в настоящей работе базируется на расчете базовых морфометрических показателей рельефа, использующихся в большинстве работ, связанных с исследованием эрозионных процессов. Методики определения морфометрических показателей подробно изложены в работах В. А. Михайлова [15], М.А. Кондратьевой [16], Д.М. Курловича [17]. Интегральная оценка эрозионной опасности базируется на методических подходах, разработанных в трудах Е.А. Позаченюк [18], А.И. Павловой [6]. Интегральный показатель энергии рельефа рассчитывался по методике, предложенной М.А. Кондратьевой [16].

Основой для проведения расчета морфометрических показателей рельефа в настоящей работе являются данные ЦМР SRTM с разрешением 1" (30 м), распространяемые NASA. Получение и подготовка данных ЦМР для дальнейшего анализа осуществлялась с помощью инструментария QGIS 3.34.0 и SAGA GIS 7.8.2, гидрологическая коррекция и заполнение замкнутых понижений раstra осуществлялись по алгоритму Ванга-Лю [19].

Обширный набор инструментов QGIS 3.34.0 позволяет проводить все необходимые операции по расчету подготовке базовых растров, отражающих такие морфометрические характеристики территории как крутизна склонов, вертикальное и горизонтальное расчленение рельефа. Интегральная оценка эрозионной опасности рельефа выполнена в среде QGIS 3.34.0 на основе полученных показателей. Для снижения дискретности растров оценки эрозионной опасности применялся инструмент Simple Filter в SAGA GIS. Классификация форм поверхности рельефа выполнялась с помощью инструмента Terrain Surface Classification (Iwahashi and Pike) в SAGA GIS. Математический анализ полученных данных выполнен с помощью Excel 2021.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Подавляющая часть бассейна р. Калаус приурочена к территориям Ставропольской возвышенности, только в северо-восточной самой нижней части водосбор переходит на Манычскую впадину, являющуюся окраиной Прикаспийской низменности.

Представляющая собой широкое куполообразное поднятие, Ставропольская возвышенность достигает максимальных отметок высот в своей юго-западной части, постепенно понижаясь в восточном и северном направлении. Река Калаус и ее притоки расчленяют террасированными долинами высокие платообразные массивы возвышенности, формируя особый рельеф территории с водоразделами, депрессиями и равнинами.

Склонам ассиметричных речных долин территории присуще широкое развитие оползневых процессов. На севере и востоке бассейна протекает пологонаклонная равнина, расчлененная долинами и балками водотоков, зачастую временных. Некоторые из этих притоков обводнены из Право-Егорлыкской оросительной системы (ПЕОС).

Юго-восточную окраину бассейна занимают Прикалаусские высоты, образующие водораздел между р. Кумой и р. Калаус. В этой части, подступающие к долине р. Калаус склоны, характеризуются наибольшей крутизной.

Бассейн р. Калаус располагается сразу в четырех климатических зонах, определяемых по коэффициенту увлажнения (K_v). Нижняя часть водосбора расположена в зоне незначительного увлажнения ($K_v = 0,22-0,33$), часть бассейна выше по течению до г. Светлоград, занимает очень засушливую зону – $K_v = 0,33-0,44$. Среднее течение р. Калаус относится к засушливой зоне с $K_v = 0,44-0,55$. Верхнее течение располагается в полусухой зоне с $K_v = 0,55-0,77$. Климат бассейна, таким образом, весьма неоднороден и изменяется от резко-континентального в нижнем течении р. Калаус до умеренно-континентального в верховьях. Количество осадков увеличивается с движением на юг, если в нижнем течении выпадает 300–400 мм осадков, то в верхней части бассейна этот показатель возрастает до 550–650 мм. Среднесуточные температуры в пределах водосбора изменяются незначительно и в среднем для января составляют от $-3,5$ до $-5,0^\circ\text{C}$, для июля $22-24^\circ\text{C}$ [20].

Бассейн р. Калаус занимает три почвенно-климатические зоны: полупустынную с преобладанием светло-каштановых почв, умеренно-засушливую степь с черноземами обыкновенными и южными, а также сухую степь с темно-каштановыми и каштановыми почвами [21].

Длина р. Калаус составляет 436 км, а площадь ее бассейна 9,8 тыс. км². Гидрографическая сеть водосбора р. Калаус неоднородна. В верхнем течении большее развитие получает левобережная часть бассейна, в которой сконцентрированы практически все притоки р. Калаус этой части – Большой Янкуль, Горькая, Кугутка и ряд мелких водотоков. После г. Светлорада развитие получает правобережная часть бассейна с единственным крупным притоком – р. Айгурка.

На главном водотоке бассейна в настоящее время действуют 3 гидропосты: с. Воздвиженское, г. Светлоград и с. Сергиевское. Средний многолетний модуль стока по гидропостам р. Калаус находится в пределах $0,39-0,86$ л/(с × км²). Для притоков р. Грачевка

и р. Чла характерен достаточно большой модуль стока $1,11-2,16$ л/(с × км²), тогда как для р. Айгурка это значение существенно ниже – $0,05$ л/(с × км²).

Руслу рек бассейна сильноизвилисты и глубоко врезаны в пойму. Коэффициент извилистости весьма высок и составляет в среднем $1,12-1,2$, а на отдельных участках достигает $1,25$ и выше. Коэффициент густоты речной сети в верхнем течении Калауса изменяется от $0,4$ до $0,5$ км/км², в среднем – $0,2-0,4$ км/км², в нижнем – $0,1-0,2$ км/км² [20; 22].

В естественных условиях р. Калаус – небольшая типичная для степных и полупустынных зон юга России река, режим которой в значительной степени зависит от осадков. Естественный годовой сток р. Калаус в створе с. Воздвиженского на 33 % состоит из грунтовой составляющей, на 52 % из снеговой, дождевая составляет всего 10 %.

Обводнение р. Калаус в 1968 году привело к увеличению стока на 300 % в верхнем течении и на 200 % в среднем и нижнем. Одновременно с этим вдвое увеличился сток наносов, что привело к резкому повышению мутности воды. Увеличившийся сток запустил процессы трансформации русла р. Калаус, при которых происходит усиление глубинной эрозии за счет стремления реки выработать новый продольный профиль. Такое положение дел подчеркивает важность изучения антропогенной трансформации территории и связанных с этим рисков.

В целях ГИС-анализа эрозионной опасности были созданы базовые тематические карты, отражающие такие морфометрические характеристики рельефа как крутизна склонов, вертикальное и горизонтальное расчленение, которые явились основой для последующей интегральной оценки эрозионной опасности территории бассейна р. Калаус.

Одним из важнейших базовых показателей, применяемых при анализе эрозионного состояния рельефа, выступает крутизна склонов, отражающая не что иное, как скорость перемещения потоков вдоль земной поверхности под действием гравитации. С увеличением крутизны склонов пропорционально увеличивается и скорость потока, а, соответственно, вырастает и ущерб, наносимый почвам. Механизированная сельскохозяйственная обработка земель с уклонами $2-5^\circ$ требует применения противоэрозионных технологий.

Для территории Ставропольского края в целом характерны невысокие значения крутизны склонов. Практически 65 % площади края характеризуются уклонами менее 1° . В диапазоне $1-2^\circ$ находится еще 20 % территории, что в сумме делает пригодными для неограниченной механизированной обработки почвы 85 % земель. Территории с уклонами более 5° , преимущественно используемые в качестве пастбищ и сенокосов, занимают 3,8 %, из которых только 0,5 % характеризуются углами больше 10° [23; 24].

Крутизна склонов в настоящем исследовании рассчитывалась на основе раstra ЦМР с использованием инструмента «Крутизна» в модуле «Анализ рельефа» QGIS. Полученные значения в границах бассейна варьируют от 0° до 51° (рис. 1). Уклоны практически на одной трети бассейна не превышают 1° . Это характерно преимущественно для территорий нижнего течения р. Калаус, в особенности зоны Манычской впадины. В целом, уклоны на 77 % территории не превышают 5° , что меньше среднего значения

по краю. Уклоны более 5° отмечены примерно для 10 % территории, из них 2,3 % территории характеризуются значениями уклонов выше 10°. В основном они приуро-

чены к Прикалаусским высотам и южной части бассейна, наиболее расчлененной долинами (табл. 1).

Таблица 1. Распределение территории бассейна р. Калаус в зависимости от крутизны склонов
Table 1. Distribution of the territory of the Kalaus River basin according to steepness of slopes

| Крутизна склонов в градусах Steepness of slopes in degrees | Площадь, га Area, hectares | Доля, в % от площади бассейна Share, as % of the river basin area |
|--|-------------------------------|--|
| <=1 | 282656,6 | 28,7 |
| 1–3 | 473258,2 | 48,1 |
| 3–5 | 132547,7 | 13,5 |
| 5–8 | 56241,0 | 5,7 |
| 8–10 | 16743,3 | 1,7 |
| 10–15 | 17694,4 | 1,8 |
| >15 | 4769,4 | 0,5 |
| Итого / Total | 983910,6 | 100 |
| Значения крутизны склонов по бассейну, градусы / Slope steepness values for the basin, degrees | | |
| Минимум / Minimum | Максимум / Maximum | Среднее / Average value |
| 0,0 | 51,3 | 2,5 |

Важным фактором, отражающим эрозионную опасность территории, является вертикальная расчлененность рельефа (базисы эрозии). Геоморфологический смысл этого показателя заключается в определении амплитуды колебания высот в пределах участка местности. Базис эрозии отражает нижний предел развития эрозионного процесса, водный поток здесь теряет силу и становится не способен далее углубить свое ложе.

Для расчета базисов эрозии территории использовалась сетка квадратов со стороной 1 км, в ячейках которой с помощью инструмента «Зональная статистика» в QGIS рассчитывалась разность максималь-

ной и минимальной абсолютных высот. На основе созданных по каждой части сетки зональной статистики центроидов, интерполяцией по методу RST (Регуляризованный сплайн с натяжением) при помощи инструмента «v.surf.rst» модуля «GRASS» была выполнена GRID-модель «Вертикальное расчленение рельефа» (рис. 1).

Две трети территории бассейна р. Калаус характеризуется отметками базисов эрозии на уровне 10–50 м. Базисы эрозии выше 200 метров практически не встречаются и занимают всего 0,1% площади (табл. 2).

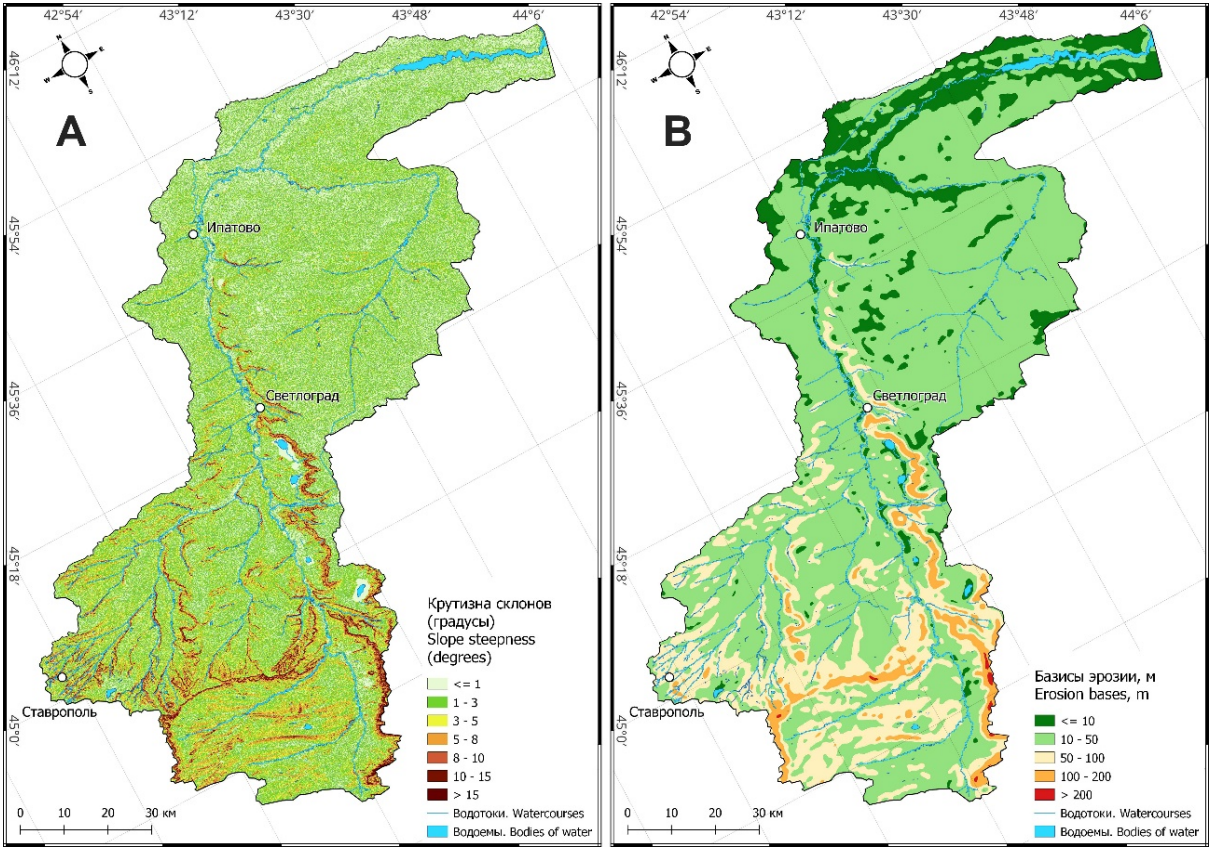


Рисунок 1. Карты крутизны склонов (А) и вертикального расчленения (В) территории бассейна р. Калаус
Figure 1. Maps of slope steepness (A) and vertical dissection (B) of the territory of the Kalaus River basin

Таблица 2. Распределение территории бассейна р. Калаус в зависимости от высоты базиса эрозии
Table 2. Distribution of the territory of the Kalaus River basin depending on the height of the erosion base

| Базисы эрозии, м Erosion bases, m | Площадь, га Area, hectares | Доля, в % от площади бассейна Share, in % of the river basin area |
|---|-------------------------------|--|
| <= 10 | 118475,3 | 12,0 |
| 10–50 | 664657,3 | 67,6 |
| 50–100 | 163788,1 | 16,6 |
| 100–200 | 35954,3 | 3,7 |
| >200 | 1040,2 | 0,1 |
| Итого / Total | 983915,1 | 100,0 |
| Значения высоты базиса эрозии по бассейну, м Values of the height of the erosion base in the basin, m | | |
| Минимум / Minimum | Максимум / Maximum | Среднее / The average value |
| -15,0 | 248,6 | 33,0 |

Горизонтальное расчленение рельефа определяется суммой длин тальвегов, приходящихся на единицу площади территории [25]. Показано, что объемы воды, приводящие к размыву дернового склона, могут формироваться при густоте расчленения 0,4–0,8 км/км² при условии значительного перепада высот [26].

Для построения векторного слоя тальвегов использовался инструмент «Basic Terrain Analysis» в SAGA GIS. Общее количество извлеченных тальвегов всех порядков составило 72681. Водотоки территории подразделяются на 7 порядков. Водотоки 1–2 порядков наиболее многочисленны, но в то же время не

представляют интереса для дальнейшего анализа, так как практически не выражены на местности. Более того, учет водотоков этих порядков значительно искажает результаты расчета. Общее количество тальвегов 3–7 порядков – 19221.

Расчет горизонтального расчленения рельефа выполнялся для сетки квадратов со стороной 8 км. В каждой ячейке сетки была собрана статистика о суммарной длине тальвегов, после чего создан слой центроидов с соответствующей атрибутивной таблицей. Значения интерполировались с использованием метода RST (рис. 2).

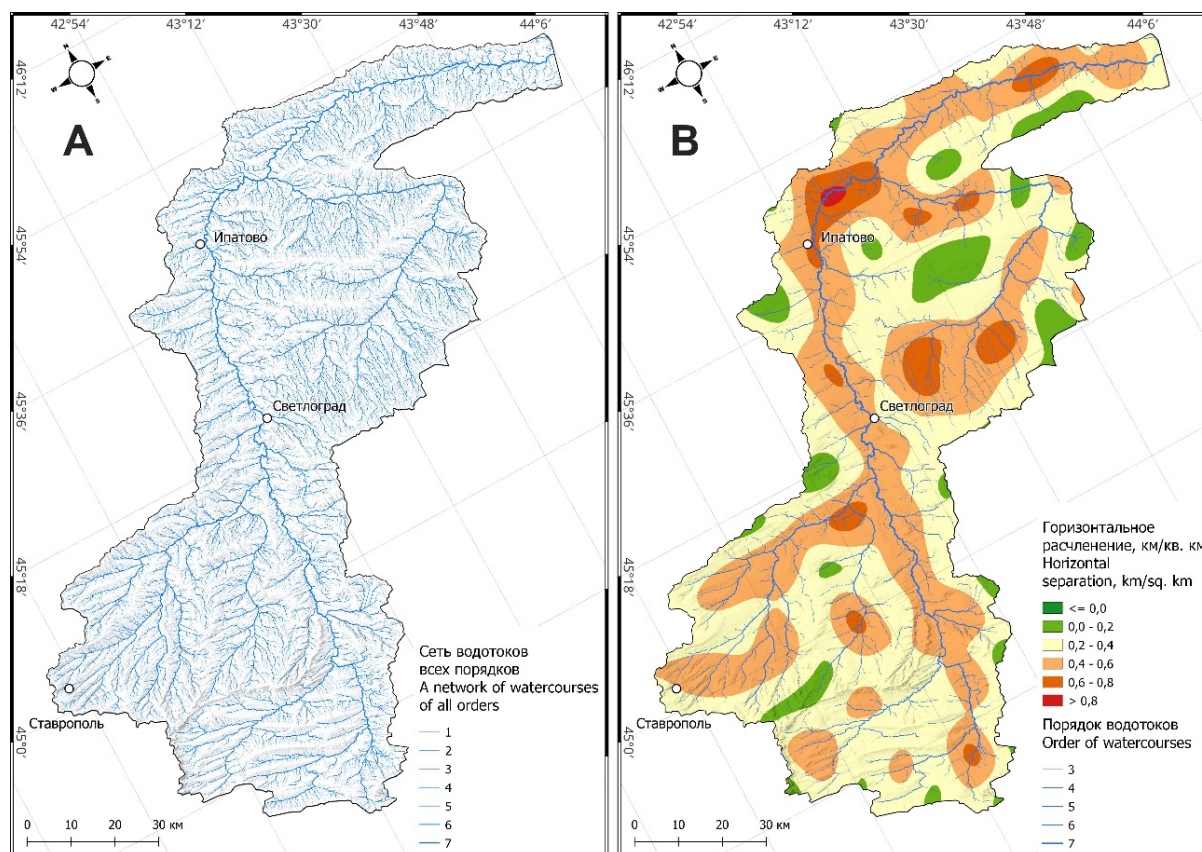


Рисунок 2. Карты сети водотоков (А) и горизонтального расчленения рельефа (В) территории бассейна р. Калаус
Figure 2. Maps of the network of watercourses (A) and the horizontal division of the relief (B) of the territory of the Kalaus River basin

Наибольшие значения коэффициента горизонтальной расчлененности рельефа закономерно приурочены к долинам крупнейших водотоков территории – р. Калаус, р. Айгурка с притоками, р. Горькая. Густота

речной сети выше 0,4 км/км² характерна практически для 45 % территории. Только на 0,2% площади бассейна густота водотоков превышает 0,8 км/км² (табл. 3).

Таблица 3. Распределение территории бассейна р. Калаус в зависимости от значения горизонтальной расчлененности рельефа**Table 3.** Distribution of the territory of the Kalaus River basin depending on the value of the horizontal division of the relief

| Горизонтальное расчленение км/км ² Horizontal division into parts km/km ² | Площадь, га Square, hectares | Доля, в % от площади бассейна Share, in % of the area of the pool |
|--|---------------------------------|--|
| 0,0–0,2 | 74098 | 7,5 |
| 0,2–0,4 | 467065 | 47,5 |
| 0,4–0,6 | 387735 | 39,4 |
| 0,6–0,8 | 52988 | 5,4 |
| > 0,8 | 1998 | 0,2 |
| Итого / Total | 983884 | 100 |
| Значения горизонтальной расчлененности рельефа по бассейну, км/км² Values of the horizontal division of the relief by basin, km/km ² | | |
| Минимум / Minimum | Максимум / Maximum | Среднее / The average value |
| 0,0 | 0,84 | 0,14 |

Комплекс рассчитанных морфометрических показателей рельефа позволяет провести оценку эрозионной опасности рельефа. Для этих целей каждому значению показателя присваивался балл от 1 до 6 (табл. 4). Интегральный показатель энергии рельефа, таким образом, определяется как сумма баллов по каждому морфометрическому показателю и позволяет оценить вероятность проявления водной эрозии для территории. К примеру, минимальный балл интеграль-

ного показателя энергии рельефа, равный 3, получается если крутизна склонов на территории менее 1,5° (1 балл), вертикальное расчленение менее 10 м (1 балл), а горизонтальное менее 0,2 км/км² (1 балл). Для расчета раstra интегрального показателя энергии рельефа, исходные растры базовых показателей были проклассифицированы в соответствии с таблицей 4 при помощи инструмента «переклассификация по таблице» в QGIS.

Таблица 4. Шкала оценки морфометрических показателей рельефа территории бассейна р. Калаус**Table 4.** The scale of assessment of morphometric indicators of the relief of the territory of the Kalaus River basin

| Балл Point | Крутизна склонов, градусы Slope steepness, degrees | Вертикальное расчленение, м Vertical dismemberment, m | Горизонтальное расчленение, км/км ² Horizontal separation, km/km ² |
|---------------|---|--|---|
| 1 | <1,5 | <10 | <0,2 |
| 2 | 1,5–3 | 10–50 | 0,2–0,4 |
| 3 | 3–6 | 50–100 | 0,4–0,6 |
| 4 | 6–8 | 100–200 | 0,6–0,8 |
| 5 | 8–12 | >200 | 0,8–1 |
| 6 | >12 | - | >1 |

Полученный растр интегральной оценки энергии рельефа позволяет выделить несколько категорий эрозионной опасности (цит. по М. А. Кондратьевой с изменениями) [16]. Так, в соответствии с предложенной градацией, баллы 3–5 отражают слабую эрозионную опасность, 6–10 – среднюю, выше 11 – сильную (рис. 3) (табл. 5).

Данные таблицы 5 свидетельствуют о том, что доля земель со слабой эрозионной опасностью (от 3 до 5 баллов) самая высокая в бассейне – 58 % (571979 га), в то же время доля земель со средней эрозионной опасностью (6–10 баллов) весьма значительна и достигает 39 % (383799 га), при этом доля земель с высокой эрозионной опасностью (11–13 баллов) не

высока – 2,9 % (28124 га). Анализ гистограммы распределения площади территории по интегральному показателю энергии рельефа (рис. 4) выявил ее правостороннюю асимметрию, при этом модальной оказалась группа, входящая в категорию земель со средней эрозионной опасностью (6 баллов), на нее пришлось 288391 га или 29,3 % всей площади бассейна.

Полученные результаты подтверждаются и с помощью визуального дешифрования спутниковых снимков высокого разрешения с космических аппаратов группировки компании DigitalGlobe, распространяемые Google. На территориях с категорией сильной эрозионной опасности (11–13 баллов) сравнительно чаще развиты эрозионные формы рельефа (рис. 5).

Таблица 5. Распределение территории бассейна р. Калаус по категориям эрозионной опасности рельефа**Table 5.** Distribution of the territory of the Kalaus River basin by categories of erosion hazard of the relief

| Категория эрозионной опасности рельефа Category of erosion hazard of the relief | Диапазон баллов интегральной оценки The range of integral assessment scores | Площадь / area | |
|--|--|----------------|--------------------|
| | | га / hectare | % от общей площади |
| Слабая / Weak | 3–5 | 571979 | 58,4 |
| Средняя / Average | 6–10 | 383799 | 39,0 |
| Сильная / Strong | 11–13 | 28124 | 2,9 |

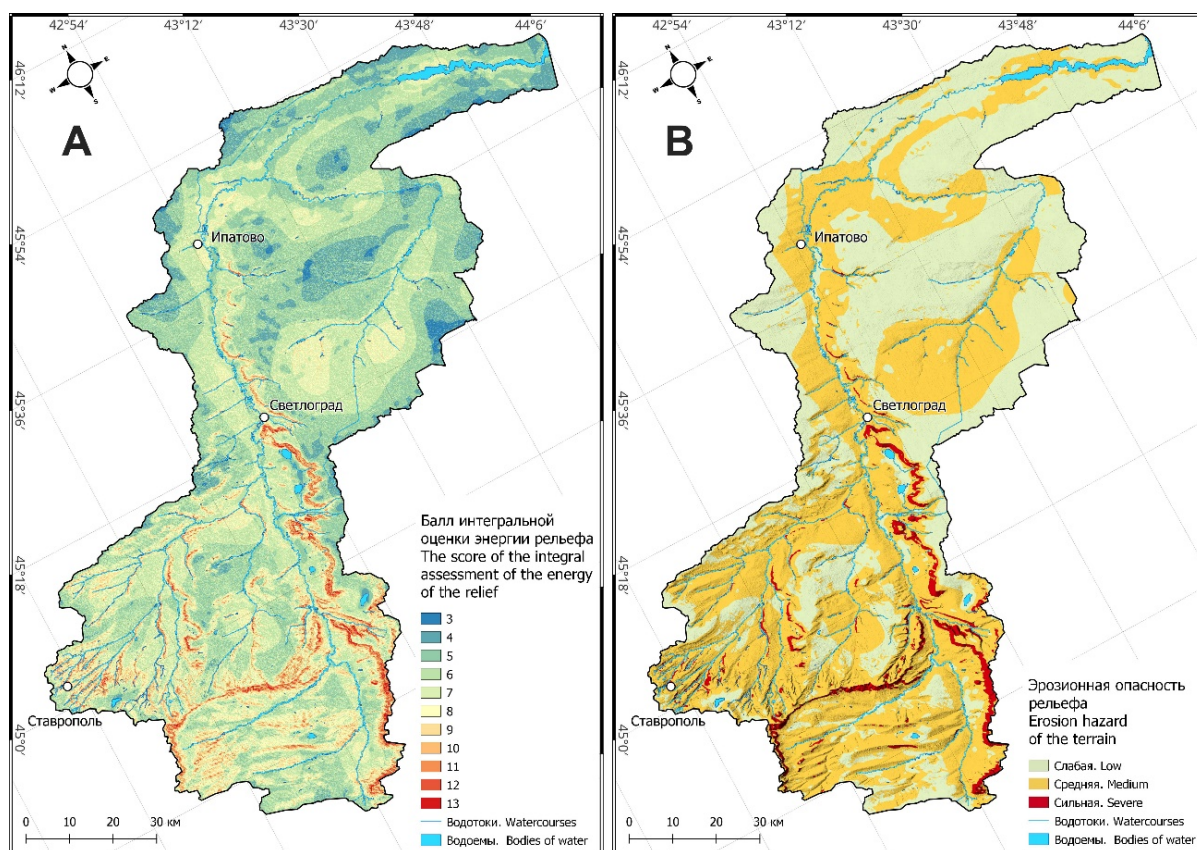


Рисунок 3. Карты оценки интегрального показателя энергии рельефа (А) и эрозионной опасности рельефа (В) территории бассейна р. Калаус

Figure 3. Maps of the assessment of the integral indicator of the energy of the relief (A) and the erosion hazard of the relief (B) of the territory of the Kalaus River basin

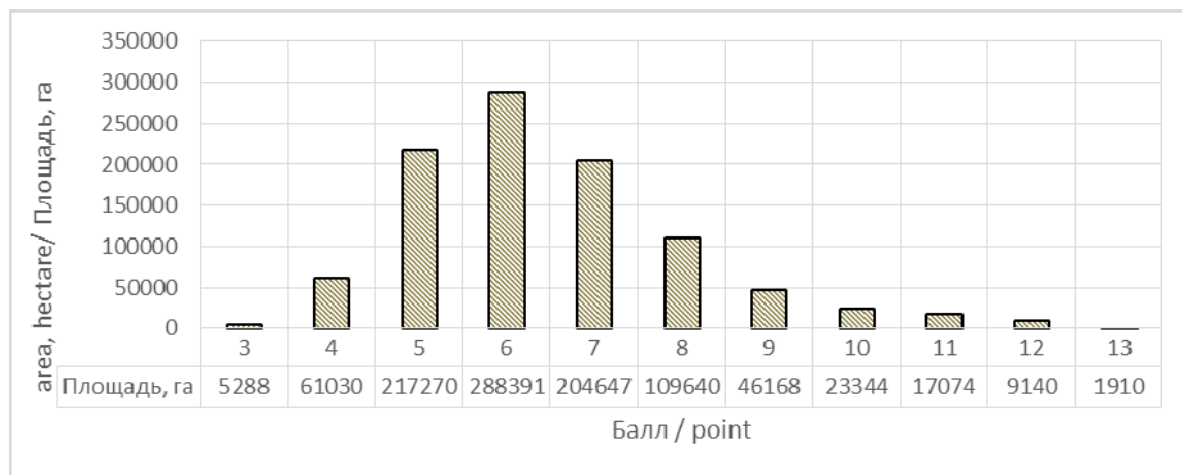


Рисунок 4. Распределение площади территории бассейна р. Калаус по интегральному показателю энергии рельефа

Figure 4. Distribution of the area of the Kalaus River basin according to the integral indicator of relief energy

Основные ареалы земель со средней эрозионной опасностью приурочены к южной части бассейна, занятой Ставропольской возвышенностью, при этом земли, для которых характерна сильная эрозионная опасность, сосредоточены в основном на склонах Прикалаусских высот. С помощью инструмента Terrain Surface Classification (Iwahashi and Pike) в SAGA GIS была выполнена неконтролируемая классификация поверхности рельефа территории на 12 классов. Присвоение форме рельефа того или иного класса по алгоритму Ивахаши и Пайка [27] базируется на сочетании трех

показателей – выпуклости, текстуры и уклона. Полученные данные позволяют с большой точностью говорить о закономерностях распределения эрозионноопасных земель на территории бассейна (рис. 6).

Немаловажной также представляется оценка уровня эрозионной опасности в границах территорий административных единиц, расположенных в бассейне р. Калаус. С этой целью была подготовлена карта, отражающая медианные баллы интегрального показателя энергии рельефа по муниципальным образованиям (рис. 6).

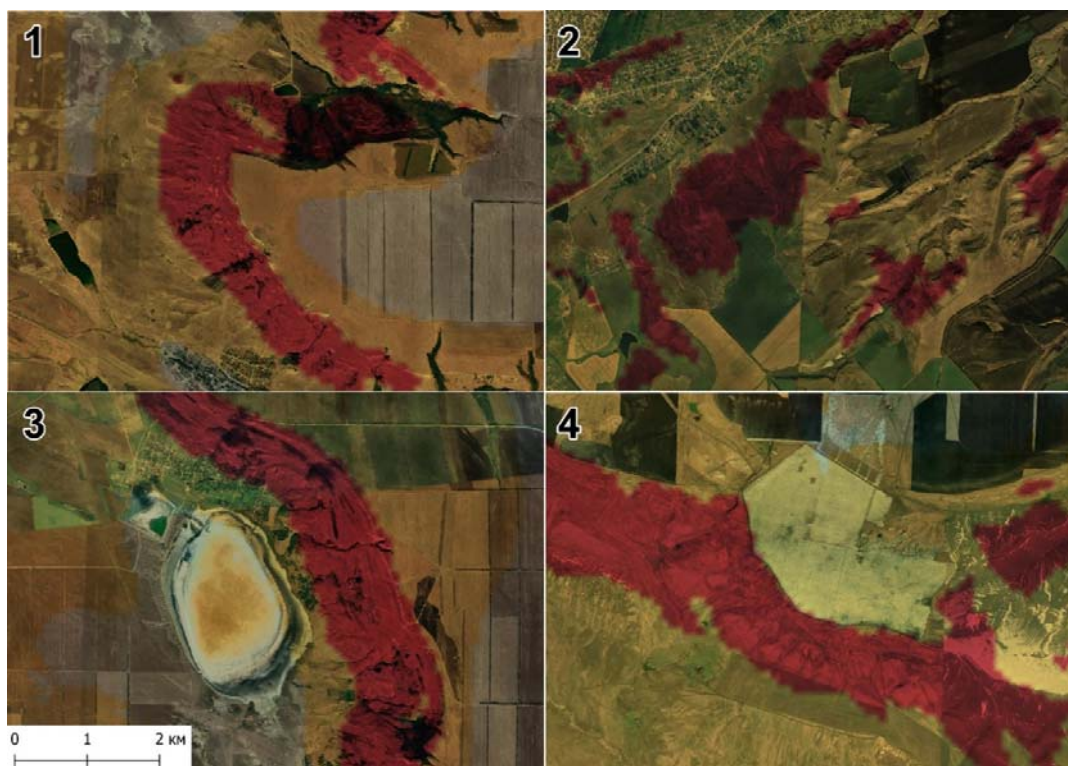


Рисунок 5. Эрозионные формы рельефа на участках с сильной эрозионной опасностью

1 – северная окраина с. Просянка, 2 – восточная окраина с. Надежда, 3 – южная окраина хут. Солёное Озеро, 4 – южная окраина с. Верхний Янкуль

Figure 5. Erosive landforms in areas with severe erosion hazard

1 – the northern outskirts of Prosyanka village, 2 – the eastern outskirts of Nadezhda village, 3 – the southern outskirts of Solenoye Ozero khutor, 4 – southern outskirts of Verkhny Yankul village

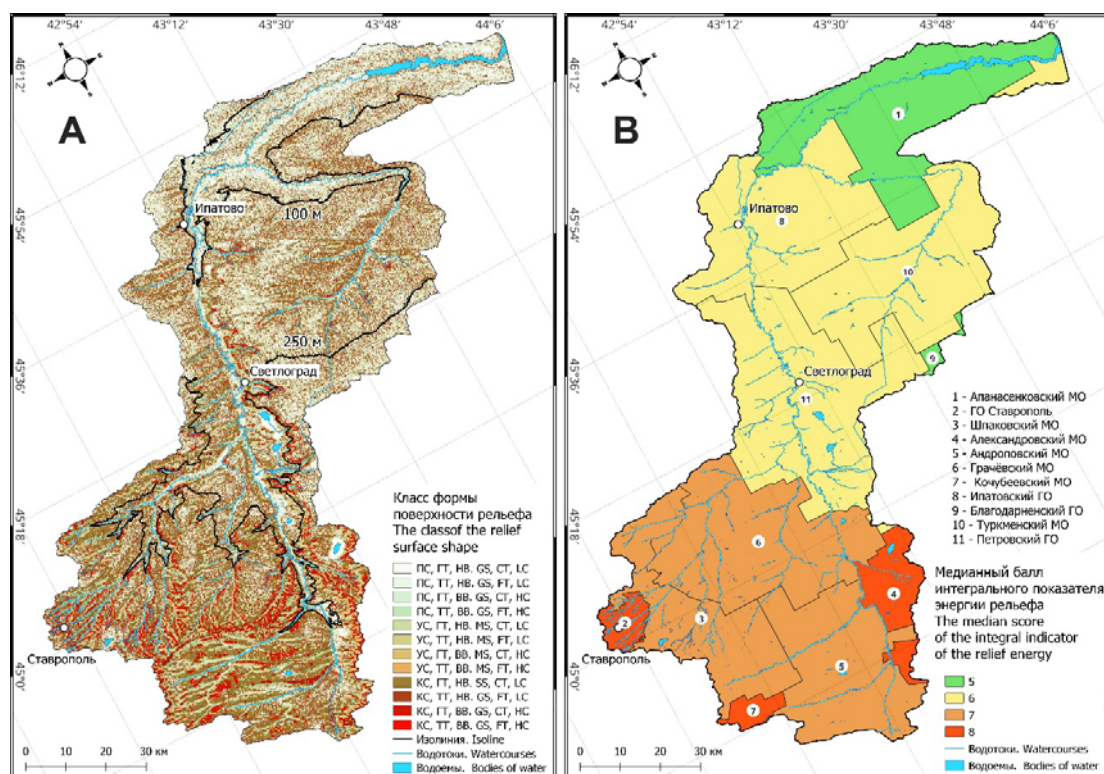


Рисунок 6. Карты классификации форм поверхности рельефа (А) (ПС – пологий склон, УС – умеренный склон, КС – крутой склон, ГТ – грубая текстура, ТТ – тонкая выпуклость, НВ – низкая выпуклость, ВВ – высокая выпуклость) и медианного балла интегрального показателя энергии рельефа по административным образованиям в границах бассейна р. Калаус (В)

Figure 6. Maps of the classification of relief surface shapes (A) (GS – gentle slope, MS – moderate slope, SS – steep slope, CT – coarse texture, FT – fine texture, LC – low convexity, HC – high convexity) and the median score of the integral indicator of relief energy for administrative entities within the boundaries of the Kalaus River basin (B)

Значения на карте медианного балла интегрального показателя энергии рельефа в 7–8 баллов характерны для территорий ГО Ставрополь, Шпаковского МО, Александровского МО, Андроповского МО и Грачевского МО. Медианный балл показателя энергии рельефа равный 6 отмечается для территорий Ипатовского ГО, Петровского ГО и Туркменского МО, минимальные значения в 5 баллов отмечены для Благодарненского ГО и Апанасенковского МО. Таким образом, административные районы края, занимающие Ставропольскую возвышенность и ее отроги характеризуются повышенным баллом интегрального показателя энергии рельефа.

В целом, южная часть бассейна р. Калаус характеризуется сравнительно более высокой эрозионной опасностью. Выше отметки в 250 м н. у. м. меняется характер р. Калаус, уклон водотока здесь значительно возрастает. В этой части бассейна сконцентрирована большая часть крутых склонов с высокой выпуклостью (рис. 6). На такие склоны приходится почти половина земель с высокой эрозионной опасностью (45,7 %) в границах бассейна. Следует отметить, что прослеживается умеренная положительная связь между увеличением значений класса форм поверхности рельефа (крутизна, выпуклость, текстура) (по Ивахаши и Пайку) с одной стороны и интегральным показателем энергии рельефа с другой (коэффициент корреляции $r = 0,37$). Расчет коэффициента корреляции был выполнен для сетки точек со стороной 1 км, всего было создано 9846 точек в границах бассейна. Общая площадь крутых склонов с высокой выпуклостью в границах бассейна составляет 61851 га (6,3 % от площади бассейна), при этом в южной части, с отметками высот выше 250 м, площадь таких склонов – 54273 га (87,7 % от общей площади крутых склонов с высокой выпуклостью в бассейне). Классификация форм поверхности рельефа по алгоритму Ивахаши и Пайка может служить определенным предиктором при оценке риска развития эрозионных процессов, особенно в случае ее комбинирования с другими базовыми показателями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рельеф является одной из важных специфических особенностей при планировании хозяйственной деятельности на той или иной территории. Особую актуальность исследованию эрозионных проблем землепользования на территории Ставропольского края придает его аграрная спецификация. Речные бассейны являются природными геосистемами с четкими естественными границами развивающихся там процессов, в том числе и эрозионных. По этой причине в настоящем исследовании применен бассейновый подход при ГИС-моделировании эрозионной опасности.

На основе ЦМР SRTM рассчитан ряд базовых морфометрических показателей рельефа, позволивших провести интегральную оценку энергии рельефа и его эрозионной опасности. Полученные данные свидетельствуют о том, что практически половина территории бассейна р. Калаус характеризуется средней и высокой эрозионной опасностью, 58 % территории слабоэрозионноопасны. Доля земель с нулевым эрозионным потенциалом совершенно незначительна и составляет всего 0,5 %. Формированию эрозионного потенциала рельефа бассейна способствует расположение значительной части территории на

отрогах Ставропольской возвышенности с широко развитыми уклонами, превышающими 2° и перепадами высот более 50 м. Земли с сильной эрозионной опасностью сосредоточены в основном на склонах Прикалаусских высот. Юго-западная часть бассейна р. Калаус, расположенная выше 250 м над уровнем моря, наиболее подвержена эрозионным рискам. Здесь же наибольшее развитие получают крутые склоны с высокой выпуклостью.

С 2021 года в РФ действует Государственная программа эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения и развития мелиоративного комплекса, предполагающая в том числе формирование достоверных и актуальных сведений о сельскохозяйственных землях, включающих и сведения о степени проявления процессов деградации. Выявленные особенности уровня эрозионной опасности земель бассейна р. Калаус рекомендуется учитывать при проектировании и реализации территориальных комплексных схем градостроительного планирования развития территорий административных единиц, расположенных в границах бассейна. Несмотря на то, что результаты ГИС-анализа не могут полностью заменить полевого эрозионного обследования, ценность их как инструмента планирования рационального землепользования очевидна. Результаты работы могут быть использованы для проведения подобной оценки в других регионах в первую очередь при организации сельскохозяйственного производства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Антонов С.А. Тенденции изменения климата и их влияние на земледелие Ставропольского края // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2017. Т. 66. N 4. С. 43–46.
2. Бадахова Г.Х., Каплан Г.Л., Кравченко Н.А. Изменение климата и экологические риски в Центральном Предкавказье // Материалы IV Международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы современной науки», Москва: ISI-journal. 2016. С. 123–128.
3. Буряк Ж.А. Совершенствование подходов к оценке эрозионной опасности агроландшафтов с использованием ГИС-технологий // Региональные геосистемы. 2014. Т. 29. N 23(194). С. 140–146.
4. Гофаров М.Ю., Кутинов Ю.Г., Болотов И.Н. Оценка развития эрозионных процессов в северотаежных ландшафтах Русской равнины с применением ГИС-технологий // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2005. N 4. С. 362–369.
5. Деревенец Д.К. Применение ГИС-технологий как составной части цифровой экономики с целью повышения эффективности противоэрозионных мероприятий // Инвестиции, строительство, недвижимость как драйверы социально-экономического развития территории и повышения качества жизни населения. 2020. С. 119–126.
6. Павлова А.И. Применение нейронной экспертной системы и ГИС для классификации эрозионных земель // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2014. N 10. С. 312–319.
7. Bilaşco Ş., et al. A GIS-based spatial analysis model approach for identification of optimal hydrotechnical solutions for gully erosion stabilization. Case Study //

- Applied Sciences. 2021. V. 11. N 11. Article ID: 4847. <https://doi.org/10.3390/app11114847>
8. Mendicino G. Sensitivity analysis on GIS procedures for the estimate of soil erosion risk // *Natural Hazards*. 1999. V. 20. N 2. P. 231–253. <https://doi.org/10.1023/A:1008120231103>
 9. Атаев З.В., Братков В.В. Оценка эрозионного расчленения рельефа Северо-Восточного Кавказа методами ГИС-технологий // *Мониторинг. Наука и технологии*. 2012. N 1. С. 63–67.
 10. Бакуменко И.А. Морфометрический анализ территории бассейна реки Калаус Ставропольского края по данным SRTM // *Материалы V-й ежегодной научно-практической конференции Северо-Кавказского федерального университета «Университетская наука – региону»*, Ставрополь: ФГАОУ ВПО «Северо-Кавказский федеральный университет», 2017. С. 224–228.
 11. Братков В.В. и др. Эрозионное расчленение рельефа Северо-Восточного Кавказа как фактор рекреационного освоения территории // *Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки*. 2011. N 4. С. 99–103.
 12. Кирвякова А.В., Андреянов Д.Ю. Мониторинг эрозионных процессов юго-западной части Ставропольской возвышенности и прилегающих территорий Прикубанской равнины // *Вестник Оренбургского государственного университета*. 2011. N 16. С. 151–153.
 13. Мусаев М.Р., Шаповалов Д.А., Широкова В.А., Ключин П.В., Хуторова А.О., Савинова С.В. Экологические проблемы сельскохозяйственного землепользования в Северо-Кавказском федеральном округе // *Юг России: экология, развитие*. 2016. Т. 11. N 3. С. 181–192. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2016-3-181-192>
 14. Шаповалов Д.А., Ключин П.В., Савинова С.В. Экологические проблемы сельскохозяйственного землепользования в Ставропольском крае // *Аридные экосистемы*. 2020. Т. 26. N 2. С. 57–62. <https://doi.org/10.24411/1993-3916-2020-10096>
 15. Михайлов В.А. Комплексный морфометрический анализ Тарханкутского полуострова с помощью ГИС // *Современные научные исследования и инновации*. 2015. N 2. Ч. 4. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2015/02/46640> (дата обращения: 17.03.2024)
 16. Кондратьева М.А., Чашин А.Н. Оценка эрозионной опасности рельефа на основе цифрового моделирования // *ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Международной конференции*. Москва: Географический факультет МГУ, 2021. Т. 27. С. 241–252. <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2021-2-27-241-252>
 17. Курлович Д.М. Морфометрический ГИС-анализ рельефа Беларуси // *Земля Беларуси*. 2013. N 4. С. 42–48. URL: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/92323> (дата обращения: 18.03.2024)
 18. 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 Вернадского В.И. География. Геология*. 2016. Т. 2. N 2. С. 95–111.
 19. Wang L., Liu H. An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling // *International Journal of Geographical Information Science*. 2006. V. 20. N 2. P. 193–213. <http://doi.org/10.1080/13658810500433453>
 20. Батова В.М. Агроклиматические ресурсы Северного Кавказа. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1966. 252 с.
 21. Антыков А.Я., Стоморев А.Я. Почвы Ставрополя и их плодородие. Ставрополь: Ставропольское книжное издательство, 1970. 413 с.
 22. Геращенко И.Н. Особенности гидрографии и гидрологии Северного Кавказа // *Таврический научный обозреватель*. 2017. N 3. С. 106–113.
 23. Лошаков А.В. Охрана агроландшафтов на основе адаптивных проектов землеустройства с учетом зональных особенностей в крайне засушливой зоне Ставропольского края // *Московский экономический журнал*. 2023. N 2. URL: <https://qe.su/nauki-o-zemle/moskovskij-ekonomicheskij-zhurnal-2-2023-31/> (дата обращения: 19.03.2024)
 24. Письменная Е.В., Стукало В., Лошаков А.В., Савинова С.В. Мониторинг состояния земель сельскохозяйственного назначения Центрального Предкавказья // *Вестник АПК Ставрополя*. 2016. Т. 21. N 1. С. 123–126.
 25. Лабанов Г.А. Эрозия и дефляция почв. Москва: Изд-во МГУ, 1993. 200 с.
 26. Путилин А.Ф. Оврагообразование на юго-востоке Западной Сибири. Новосибирск, 1988. 81 с.
 27. Iwahashi J., Pike R.J. Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature // *Geomorphology*. 2007. V. 86. N 3–4. P. 409–440. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.09.012>

REFERENCES

1. Antonov S.A. Trends in climate change and their impact on agriculture in the Stavropol Territory. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Proceedings of the Orenburg State Agrarian University]. 2017, vol. 66, no. 4, pp. 43–46. (In Russian)
2. Badakhova G.Kh., Kaplan G.L., Kravchenko N.A. *Izmenenie klimata i ekologicheskie riski v Tsentral'nom Predkavkaz'e* [Climate change and environmental risks in the Central Caucasus]. *Materialy IV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Problemy i perspektivy sovremennoi nauki»*, Moskva, ISI-journal, 2016 [Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference "Problems and prospects of modern Science", Moscow: ISI-journal, 2016]. Moscow, pp. 123–128. (In Russian)
3. Buryak Zh.A. Improving approaches to assessing the erosion hazard of agricultural landscapes using GIS technologies. *Regional'nye geosistemy* [Regional geosystems]. 2014, vol. 29, no. 23(194), pp. 140–146. (In Russian)
4. Gofarov M.Yu., Kutinov Yu.G., Bolotov I.N. Assessment of the development of erosion processes in the North taiga landscapes of the Russian plain using GIS technologies. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya* [Geoeology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology]. 2005, no. 4, pp. 362–369. (In Russian)
5. Derevenets D.K. The use of GIS technologies as an integral part of the digital economy in order to increase the effectiveness of anti-erosion measures. *Investitsii, stroitel'stvo, nedvizhimost' kak draivery sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya territorii i povysheniya*

- kachestva zhizni naseleniya [Investments, construction, real estate as drivers of socio-economic development of the territory and improvement of the quality of life of the population]. 2020, pp. 119–126. (In Russian)
6. Pavlova A.I. Application of the neural expert system and GIS for the classification of erosive lands. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii i IT-obrazovanie* [Modern information technologies and IT-education]. 2014, no. 10, pp. 312–319. (In Russian)
 7. Bilaşco Ş., et al. A GIS-based spatial analysis model approach for identification of optimal hydrotechnical solutions for gully erosion stabilization. Case Study. *Applied Sciences*, 2021, vol. 11, no. 11, article id: 4847. <https://doi.org/10.3390/app11114847>
 8. Mendicino G. Sensitivity analysis on GIS procedures for the estimate of soil erosion risk. *Natural Hazards*, 1999, vol. 20, no. 2, pp. 231–253. <https://doi.org/10.1023/A:1008120231103>
 9. Ataev Z.V., Bratkov V.V. Estimation of erosion relief partition of the North-Eastern Caucasus by GIS methods. Monitoring. Nauka i tekhnologii [Monitoring. Science and technology]. 2012, no. 1, pp. 63–67. (In Russian)
 10. Bakumenko I.A. Morfometricheskii analiz territorii basseina reki Kalas Stavropol'skogo kraia po dannym SRTM [Morphometric analysis of the territory of the Kalas river basin of the Stavropol Territory according to SRTM data]. *Materialy V ezhegodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii Severo-Kavkazskogo federal'nogo universiteta «Universitetskaya nauka – regionu», Stavropol', FGAOU VPO «Severo-Kavkazskii federal'nyi universitet», 2017* [Materials of the V Annual scientific and practical conference of the North Caucasus Federal University "University Science for the Region", Stavropol: Federal State Educational Institution of Higher Education "North Caucasus Federal University", 2017]. Stavropol, 2017, pp. 224–228. (In Russian)
 11. Bratkov V.V., et al. Erosive dismemberment of the relief of the North-Eastern Caucasus as a factor of recreational development of the territory. *Izvestiya Dagestanskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta. Estestvennye i tochnye nauki* [Dagestan State Pedagogical University Journal. Natural and exact sciences]. 2011, no. 4, pp. 99–103. (In Russian)
 12. Kirvyakova A.V., Andreyanov D.Y. Monitoring of erosion processes in Southwestern Stavropol upland and Prikubanskaya plain. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Orenburg State University]. 2011, no. 16, pp. 151–153. (In Russian)
 13. Musayev M.R., Shapovalov D.A., Shirokova V.A., Klyushin P.V., Khutorova A.O., Savinova S.V. Environmental problems of agricultural land management in the North Caucasian Federal District. *South of Russia: ecology, development*, 2016, vol. 11, no. 3, pp. 181–192. (In Russian) <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2016-3-181-192>
 14. Shapovalov D.A., Klyushin P.V., Savinova S.V. Ecological problems of agricultural land use in the Stavropol Territory. *Arid ecosystems*, 2020, vol. 26, no. 2, pp. 57–62. (In Russian) <https://doi.org/10.24411/1993-3916-2020-10096>
 15. Mikhailov V.A. [Complex morphometric analysis of the Tarkhankut peninsula using GIS]. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovatsii*, 2015, no. 2. (In Russian) Available at: <https://web.snauka.ru/issues/2015/02/46640> (accessed 17.03.2024)
 16. Kondrat'eva M.A., Chashchin A.N. Otsenka erozionnoi opasnosti rel'efa na osnove tsifrovogo modelirovaniya [Assessment of the erosion hazard of the relief based on digital modeling]. *InterGIS. Geoinformatsionnoe obespechenie ustoichivogo razvitiya territorii: Materialy Mezhdunarodnoi konferentsii. Moskva: Geograficheskii fakul'tet MGU, 2021* [InterGIS. Geoinformation support for sustainable development of territories: Materials of the International Conference. Moscow: Faculty of Geography, Moscow State University, 2021]. Moscow, 2021, vol. 27, pp. 241–252. (In Russian). <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2021-2-27-241-252>
 17. Kurlovich D.M. Morphometric GIS analysis of the relief of Belarus. *Zemlya Belarusi*, 2013, no. 4, pp. 42–48. (In Russian) Available at: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/92323> (accessed 18.03.2024)
 18. Pozachenyuk E.A., Petlyukova E.A. GIS-analysis of morphometric relief indicators of the Central foothills of the main ridge of the Crimean Mountains for the purposes of landscape planning. *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni Vernadskogo V.I. Geografiya. Geologiya* [Scientific notes of the Vernadsky V.I. Crimean Federal University. Geography. Geology]. 2016, vol. 2, no. 2, pp. 95–111. (In Russian)
 19. Wang L., Liu H. An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling. *International Journal of Geographical Information Science*, 2006, vol. 20, no. 2, pp. 193–213. <http://doi.org/10.1080/13658810500433453>
 20. Batova V.M. *Agroklimaticheskie resursy Severnogo Kavkaza* [Agro-climatic resources of the North Caucasus]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1966, 252 p. (In Russian)
 21. Antykov A.Ya., Stomarev A.Ya. *Pochvy Stavropol'ya i ikh plodorodie* [Stavropol soils and their fertility]. Stavropol, Stavropol Book Publ., 1970, 413 p. (In Russian)
 22. Gerashchenko I.N. Features of hydrography and hydrology of the North Caucasus. *Tavricheskii nauchnyi obozrevatel'* [The Tauride scientific observer]. 2017, no. 3, pp. 106–113. (In Russian)
 23. Loshakov A.V. [Protection of agricultural landscapes based on adaptive land management projects taking into account zonal features in the extremely arid zone of the Stavropol Territory]. *Moskovskii ekonomicheskii zhurnal*, 2023, no. 2. (In Russian) Available at: <https://qje.su/nauki-o-zemle/moskovskij-ekonomicheskij-zhurnal-2-2023-31/> (accessed 19.03.2024)
 24. Pis'mennaya E.V., Stukalo V., Loshakov A.V., Savinova S.V. Monitoring of the state of agricultural lands in the Central Caucasus. *Vestnik APK Stavropol'ya* [Bulletin of the agroindustrial complex of Stavropol]. 2016, vol. 21, no. 1, pp. 123–126. (In Russian)
 25. Labanov G.A. *Eroziya i deflyatsiya pochv* [Erosion and deflation of soils]. Moscow, MSU Publ., 1993, 200 p. (In Russian)
 26. Putilin A.F. *Ovragoobrazovanie na yugo-vostoke Zapadnoi Sibiri* [Ravine formation in the south-east of Western Siberia]. Novosibirsk, 1988, 81 p. (In Russian)
 27. Iwahashi J., Pike R.J. Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature. *Geomorphology*, 2007, vol. 86, no. 3–4, pp. 409–440. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.09.012>

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Евгений Г. Мишвелов определил идею исследования, выстроил логику исследования, участвовал в полевых исследованиях, структурировал текст статьи в логике исследования, подобрал библиографические источники. Артем И. Корниенко участвовал в полевых исследованиях, составил картографический материал, участвовал в изготовлении графического материала, сформулировал выводы исследования. Надира О. Гусейнова структурировала результаты исследования, участвовала в изготовлении графического материала, сформулировала выводы исследования. Эдуард Е. Тихонов структурировал текст статьи в логике исследования, участвовал в изготовлении графического материала. Елена Н. Павленко выстроила логику исследования, структурировала текст статьи в логике исследования, подобрала библиографические источники. Все авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Evgeny G. Mishvelov defined the idea of the study, built the logic of the study, participated in field research, structured the text of the article in the logic of the study, selected bibliographic sources. Artem I. Kornienko participated in field research, compiled cartographic material, participated in the production of graphic material, and formulated the conclusions of the study. Nadira O. Guseynova structured the results of the study, participated in the production of graphic material, and formulated the conclusions of the study. Edward E. Tikhonov structured the text of the article in the logic of the research, participated in the production of graphic material. Elena N. Pavlenko built the logic of the research, structured the text of the article in the logic of the research, selected bibliographic sources. All authors are equally participated in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Евгений Г. Мишвелов / Evgeny G. Mishvelov <https://orcid.org/0000-0003-2004-9429>

Артем И. Корниенко / Artem I. Kornienko <https://orcid.org/0000-0001-9670-7219>

Надира О. Гусейнова / Nadira O. Guseynova <https://orcid.org/0000-0003-3979-4293>

Эдуард Е. Тихонов / Edward E. Tikhonov <https://orcid.org/0000-0003-0028-582X>

Елена Н. Павленко / Elena N. Pavlenko <https://orcid.org/0000-0003-4049-7341>