

УДК 551.4.03:502.3

DOI: 10.35595/2414-9179-2021-2-27-218-232

А.Г. Нарожняя<sup>1</sup>

## МОРФОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕЛЬЕФА БАСЕЙНОВ РЕК КРЫМА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИС

### АННОТАЦИЯ

Для территории Крыма планируется разработать проекты бассейнового природопользования, важным этапом предпроектного обоснования которых является характеристика рельефа в пределах речных бассейнов. Для исследования использован программный комплекс ArcGIS 10.5. Инструменты поднабора «Гидрология», «Поверхность», «Зональные», «Алгебра карт» в автоматизированном режиме создают морфометрические характеристики рельефа, а их визуальное представление в среде ГИС позволяет устанавливать пространственные закономерности и обосновывать почвоводоохранные мероприятия. В качестве исходных данных выбраны данные *Shuttle radar topographic mission* разрешением 3 угловые секунды, которые соответствует масштабу исследования. Морфометрический анализ рельефа 1534 разнопорядковых бассейновых структур показал, что высота 64 % бассейнов 3–6 порядков не превышает 300 м, для них выделены пять ступеней вертикального расчленения равнинных территорий. 37 % бассейнов по вертикальному расчленению относятся к высокогорным территориям. В равнинной части Крыма, где развиты дефляционные процессы, средняя крутизна склона 1°, преобладают бассейны с поперечно-прямым продольно-прямыми склонами, линейные рубежи на которых могут быть прямолинейными. На предгорных территориях в условиях сельскохозяйственного использования, к дефляции почв добавляются процессы водной эрозии, вызванные наличием длинных склонов с крутизной свыше 3° со значениями рельефного фактора (LS) превышающими 2, а в отдельных сельскохозяйственных бассейнах средние значения рельефного фактора близки к критическому значению – 4,3. На этих территориях преобладают поперечно-выпуклые склоны, для которых необходимо проектирование контурных линейных рубежей. В горной части Крыма густота речной сети в среднем составляет – 0,11 км/км<sup>2</sup>, но вследствие климатических, геоморфологических и почвенных условий перераспределение наносов идет в верхнем звене эрозионной сети (более развитой на территории полуострова). В равнинной части Крыма значения густоты речной сети не превышает 0,2 км/км<sup>2</sup>.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** морфометрический анализ рельефа, ЦМР, бассейн реки, бассейновое природопользование, ГИС.

Anastasiya G. Narozhnyaya<sup>2</sup>

## MORPHOMETRIC ANALYSIS OF THE CRIMEAN RIVER BASINS RELIEF BY USING GIS

### ABSTRACT

It is planned to develop projects of basin nature management for the Crimean peninsula. The characteristics of the relief within the river basins is an important stage in the pre-project

<sup>1</sup> Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Институт наук о Земле, ул. Победы, д. 85, 308015, Белгород, Россия, e-mail: [narozhnyaya\\_a@bsu.edu.ru](mailto:narozhnyaya_a@bsu.edu.ru)

<sup>2</sup> Belgorod National Research University, Institute of Earth Sciences, Pobedy, 85, 308015, Belgorod, Russia, e-mail: [narozhnyaya\\_a@bsu.edu.ru](mailto:narozhnyaya_a@bsu.edu.ru)

justification. ArcGIS 10.5 is used for research. The tools of the subset "Hydrology", "Surface", "Zonal", "Algebra of maps" made it possible to create morphometric characteristics of the relief, and their visual representation in the GIS environment made it possible to establish spatial patterns and substantiate soil-water conservation measures. Shuttle radar topographic mission with a resolution of 3 arc seconds is selected as input data. Its resolution is consistent with the scale of the study. The morphometric analysis of the relief of 1534 different-order basin structures showed that the height of 64% of the 3–6-order basins does not exceed 300 m; for them, five steps of vertical dissection of plain territories have been identified. 37% of the basins are vertically divided into high-mountainous areas. In the plain part of Crimea, where deflationary processes are developed, the average slope steepness is  $1^\circ$ , basins with transversely straight longitudinal-straight slopes prevail, the linear boundaries on which can be rectilinear. In the foothill areas under conditions of agricultural use, soil deflation is added to the processes of water erosion caused by the presence of long slopes with a steepness of more than  $3^\circ$  with the values of the relief factor (LS) exceeding 2, and in some agricultural basins the average value of the relief factor is close to the critical value – 4.3. Transversely convex slopes prevail in these territories, here it is necessary to design contour linear boundaries. The density of the river network is on average –  $0.11 \text{ km/km}^2$  in the mountainous part of Crimea, but due to climatic, geomorphological and soil conditions, the redistribution of sediments occurs in the upper link of the erosion network (more developed on the territory of the peninsula). the density of the river network does not exceed  $0.2 \text{ km/km}^2$  in the flat part of the Crimea. Morphometric analysis of the relief allows describing the hydrogeomorphology of the river basin, identifying the causes of erosion, and substantiating the functioning of ecosystems.

**KEYWORDS:** morphometric analysis of relief, DEM, river basin, basin nature management, GIS.

## ВВЕДЕНИЕ

Вследствие несоблюдения обоснованной системы севооборотов и технологий возделывания сельскохозяйственных культур, сокращения доли лесозащитных насаждений, низких объемов внесения удобрений почвы Крыма подвержены различным видам деградационных процессов<sup>1</sup>, среди которых не только снижение в почвах органических и минеральных веществ, но и развитие эрозии. Дефляционно опасными являются 73 % земель, подвержены водной эрозии – 14 %, совместное воздействие ветровой и водной выявляется на 6 % земель<sup>2</sup>.

Изменить ситуацию может внедрение комплексных проектов почвоводоохранного обустройства, выполненных на бассейновых принципах [Кузьменко, 2012]. Внедренные на территории Белгородской области проекты бассейнового природопользования показывают свою эффективность [Лушецкий, Буряк, 2020]. Первым этапом таких работ является предпроектное обоснование, важное место в котором отведено анализу рельефа.

Характеристики рельефа позволяют оценивать гидрогеологические процессы и структуру водосбора [Gizachew, Berhan, 2018], предоставляют информацию о характере эрозии, переносе наносов и др. [Khare et al., 2014]. Широко представлены работы [Farhan, et al., 2017; Prasad et al., 2008; Yunus et al., 2014; Khare et al. 2014 и др.], в которых изучается от 14 до 28 морфометрических параметров речных бассейнов. Большинство

<sup>1</sup> Доклад о состоянии и охране окружающей среды на территории республики Крым в 2019 году. Симферополь, 2020. 360 с. Режим доступа: [https://meco.rk.gov.ru/uploads/txteditor/meco/attachments//d4/1d/8c/d98f00b204e9800998ecf8427e/phpCCpsTg\\_1.pdf](https://meco.rk.gov.ru/uploads/txteditor/meco/attachments//d4/1d/8c/d98f00b204e9800998ecf8427e/phpCCpsTg_1.pdf).

<sup>2</sup> Ергина Е.И. Состояние и перспективы мониторинговых наблюдений почв и земель Крыма // Круглый стол «Охрана и использование почв и земель Крыма в условиях интенсификации земледелия и обеспечения продовольственной безопасности Крыма. Симферополь, 2016. Режим доступа: [https://meco.rk.gov.ru/file/6sostoyanie\\_i\\_perspektivi\\_monitoringovih\\_nablyudeniuy\\_pochv\\_i\\_zemelj\\_krima.pdf](https://meco.rk.gov.ru/file/6sostoyanie_i_perspektivi_monitoringovih_nablyudeniuy_pochv_i_zemelj_krima.pdf).

этих параметров предложены Стралером и Хортоном в 30–60 гг. XX в. и рассчитываются как средние значения. ГИС-технологии позволяют получить морфометрические характеристики в каждой единице (пикселе) пространства, рассчитывать средневзвешенные значения, оценивать отдельные элементы бассейнов, что особенно важно при проектировании почвоводоохранных систем.

Развитие геоинформационных систем позволяет сократить время и повысить качество морфометрического анализа рельефа [Das, S., 2016; Мамедов, 2017; Харченко, 2020]. При этом многие процессы становятся автоматизированными, но требуют индивидуальной настройки специалиста в зависимости от масштаба и целей исследования, а также обоснованной интерпретации [Sukristiyant, 2018]. Так для региональных исследований исходными картографическими материалами должны стать карты М 1:200000 и крупнее, а для территорий сельскохозяйственных предприятий – М 1:50000 и крупнее. Также данные о рельефе возможно получить из глобальных моделей, имеющих открытый доступ (например, <https://lta.cr.usgs.gov/>). Их подробный анализ приведен в [Ermolaev, 2017].

В работах [Das, 2016; Ahmed et al., 2010] обосновано, что данные Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 4-й версии, разрешением 3 угловые секунды соответствуют топографическим картам М 1:50000 и даже превосходят их при отображении перегибов рельефа. Это открывает перспективы использования таких данных для морфометрического анализа рельефа больших по площади территорий с высокой точностью.

Следует отметить, что для Крыма проведен анализ рельефа отдельных территорий [Позаченюк, 2016; Табуницик, 2018] или его отдельных характеристик [Токарев, 2015; Табуницик, 2019]. Но данные исследования выполнены в разных масштабах и для разных целей, что не способствует их применению в комплексных исследованиях.

Целью работы стало проведение морфометрического анализа рельефа территории бассейнов Крыма с использованием автоматизированного геоинформационного анализа для предпроектного обоснования бассейнового природопользования.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Крымский полуостров расположен на юге Восточной Европы в центре Причерноморья. На севере полуострова расположена Северо-Крымская плоская, местами слабоволнистая низменная равнина или Присивашская низменность. Центральная часть Равнинного Крыма представлена возвышенной аккумулятивной равниной. Приподнятая в середине, к западу и востоку она переходит в Альминскую и Индольскую низменности. К югу Центрально-Крымская равнина плавно повышается и переходит в северный структурный склон Внешней гряды Крымских гор. На западе Равнинного Крыма находится Тарханкутский полуостров, большую часть которого занимает возвышенная равнина из миоцен-плиоценовых известняков. Восток Крыма относится к Керченскому полуострову, юго-западную часть которого занимает полого-волнистая, аккумулятивно-денудационная равнина, а северо-восточную – Индоло-Кубанский предгорный прогиб Скифской платформы с пластовыми и пластово-аккумулятивными синклинальными равнинами, разделенными антиклинальными складками диапирового генезиса [Современные ландшафты..., 2009].

Крымские горы являются западной частью Крымско-Кавказского горно-складчатого региона. Располагаясь на юге полуострова, они состоят из трех параллельных друг другу гряд: Главной гряды и двух Предгорных (Внутренней и Внешней), слагающих северный макросклон всего горного массива. Их общая площадь около 6000 км<sup>2</sup>, длина с юго-запада на северо-восток – 180 км, максимальная ширина в центральной части 45–50 км.

При проектировании региональных систем бассейнового природопользования логично использовать картографический материал М 1:100000 и крупнее для территорий, подверженных водной эрозии. Таким данным соответствуют данные SRTM [Das, 2016; Ahmed, 2010]. Наиболее объективной и естественной единицей для почвоводоохранного проектирования может выступить бассейн реки 4-го порядка [Смольянинов, 2007; Кузьменко, 2012], для которого и следует проводить морфометрический анализ рельефа.

Для проведения исследования на территории Крыма выделено 1534 бассейновые структуры и эрозионная сеть [Лисецкий, Буряк, 2020]. Для этого авторы, используя инструменты поднабора «Гидрология» набора *Spatial Analyst* программы *ArcGIS*, произвели обработку SRTM, которая позволила заполнить локальные понижения, определить места внутреннего дренажа, построить растры направлений поверхностного стока воды и суммарной аккумуляции стока. Для построения эрозионной сети применили модель аккумуляции стока: ячейки с высоким суммарным стоком (свыше 200) использованы для определения овражно-балочных форм и русел водотоков. Сеть водотоков уточнена по топографической карте М 1:100000, так как по данным SRTM их определить невозможно. Классификацию эрозионной сети и установление порядков бассейнов проводили по системе Стралера-Философова, начиная с форм овражно-балочной сети, как это принято у геоморфологов [Корытный, 2001]. Нами данные [Лисецкий, Буряк, 2020] взяты за основу исследования.

Дополнительно нами были определены территории, склоны которых обращены в сторону моря, но не имеющие в заданном масштабе эрозионной сети. Нами они идентифицированы как «морские» (рис. 1).

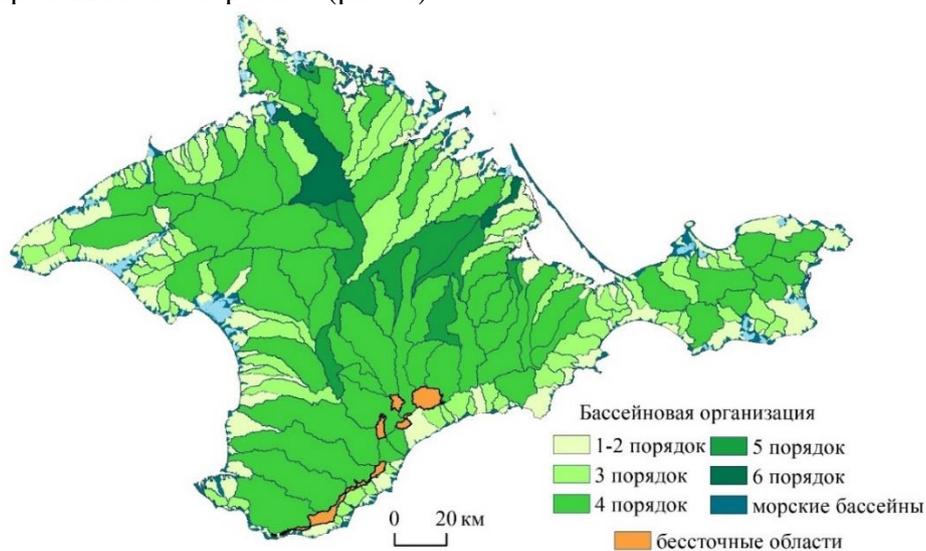


Рис. 1. Структура речных бассейнов Крымского полуострова  
Fig. 1. The structure of the river basins of the Crimean peninsula

В горной части Крыма на вершинной поверхности (яйлах) развиты карстовые процессы, чему способствуют трещины и растворимость известняков и гипсов, затрудненные условия стока. Здесь нами выделены бессточные области без определения порядка, так как классификация имеющейся эрозионной сети затруднена и не имеет поверхностной связи с нижележащими бассейнами.

Из-за масштаба карты (см. рис. 1) бассейны первого и второго порядка объединены, но их количество и площадь считались отдельно (табл. 1). Следует также понимать, что при создании бассейновых структур, в выделенных бассейнах 4-го порядка находятся бассейны 1–3 порядков, 3-го порядка – 1–2-го, а их выделение привело к тому, что суммарная площадь 5-го и 6-го порядка занижена. Выделенные бассейны 3-го и 1-2-го порядков не являются составной частью бассейнов более высокого порядка.

Для решения почвоводоохраных задач региона для анализа были отобраны такие характеристики рельефа как крутизна склона, вертикальное расчленение, горизонтальное расчленение, экспозиция, рельефный фактор, типы склонов. Эти параметры предопределяют возможные землеустроительные мероприятия [Lisetskii et al., 2014].

В качестве программного комплекса использован ArcGIS 10.5, имеющий богатый функционал для решения поставленных задач. Карты крутизны, экспозиции, кривизны, длины склонов построены с использованием поднабора инструментов «Поверхность» набора *Spatial Analyst*. Карты густоты горизонтального и вертикального расчленения построены путем вычислений в границах выделенных бассейнов с использованием инструментов «Зональная статистика».

Изучение типов склонов выполняли по методике, предложенной в работе [Смирнова, 2017]. Но, так как исходная цифровая модель использовалась отличная от указанной в работе [Смирнова, 2017], был проведен дополнительный экспертный анализ по установлению значений перехода от прямому к вогнутому и выпуклому типу склонов. Было установлено, что поперечно прямым склонам соответствуют значения плановой кривизны от -0,002 до 0,002 м<sup>-1</sup>, продольно прямым – профильной кривизны от -0,02 до 0,02 м<sup>-1</sup>. Кривизна выпуклых склонов больше верхних пределов этих градаций, а вогнутых – меньше нижних. С использованием инструмента «Переклассификация» полученные непрерывные grids плановой и профильной кривизны были трансформированы в дискретные по указанным значениям. Такие grids конвертируются в векторный формат, что позволяет объединять данные, в т.ч. атрибутивные (инструмент «Пересечение»). В объединенном шейп-файле данные о типах кривизны классифицировали на типы склонов согласно методике, предложенной М.И. Лопыревым [Проектирование..., 1999].

Инструмент «Алгебра карт» позволил рассчитать значение рельефной функции (LS). Среди большого разнообразия формул фактора LS в эрозионной модели нами проанализированы четыре [Швебс, 1974; Wischmeier, 1978; Morgan, 1979, ГОСТ<sup>1</sup>]. Анализ полученных данных показал, что по модели [Wischmeier, 1978] получаются заниженные результаты в горной территории, уравнение [Швебс, 1974] дало в целом завышенные результаты. Средние значения LS, полученные по ГОСТ<sup>5</sup> и [Morgan, 1979] показывают сравнимые результаты. Как указано в [Буряк, 2016] наиболее подходящей для черноземных условий является [Morgan, 1979], поэтому на основании нашего анализа и предложенных формул была выбрана эта формула.

Средние значения морфометрических характеристик рельефа занесены в атрибутивную таблицу речных бассейнов полуострова Крым. Это позволяет работать с данными как в геоинформационной среде, так и экспортировать данные в таблицы для их анализа.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для проведения исследования на территории Крыма выделено 1534 бассейновые структуры, среди которых в большом количестве представлены бассейны без эрозионной сети со склоном в сторону моря (далее морские бассейны), бассейны 1-го и 2-го порядков, сток которых в большинстве случаев также обращен в море (табл. 1, рис. 1).

Табл. 1. Основные бассейны полуострова Крым  
Table 1. Main basins of the Crimea Peninsula

Порядок	Количество, шт	Площадь, км <sup>2</sup>	Порядок	Количество, шт	Площадь, км <sup>2</sup>
морские	783	1200,5	4	57	13233,7
1	444	1260,9	5	7	1603,1
2	164	2171,6	6	2	565,3
3	77	4969,4	Бессточные области		240,2

<sup>1</sup> ГОСТ 19179-73. Гидрология суши. Термины и определения. Введ. 1975-01-01. М.: Госкомиздат, 1973. 34 с.

Около 55 % территории занимают бассейны 4-го порядка, 20 % приходится на 3-ий порядок. Более полное понимание о структуре эрозионной сети дает табл. 2.

Табл. 2. Порядковый состав долинной и овражно-балочной сети Крыма  
 Table 2. The ordinal composition of the valley and ravine-girder network of Crimea

Порядок \ Показатель	1	2	3	4	5	6	Всего
Количество, шт.	5059	986	232	57	7	2	6340
Длина, км	8824,7	4018,4	2020,7	783,3	247,8	86,0	15978,8

Из таблицы 2 видно, что на территории Крыма хорошо развито верхнее звено эрозионной сети, но вследствие засушливости климата низкие звенья не получили своего развития, и, хотя соотношение количества эрозионных форм близко к модальному бассейну, незначительные значения длин низких порядков позволяют говорить о перераспределении наносов в верхнем звене.

Геоинформационные системы позволяют автоматизировать процесс расчета густоты эрозионной сети, которая отражает инфильтрационную способность грунта, потенциал эрозионного стока, растительность и пр. Северная часть полуострова имеет меньшую густоту эрозионной сети (рис. 1 с), а, следовательно, выше вероятность подпитки или потенциальной зоны подземных вод. Кроме того, это приводит к грубой текстуре бассейна с высокопроницаемым грунтом и относительно лучшим растительным покровом и низким рельефом [Prasad et al., 2008; Prasad et al., 2008].

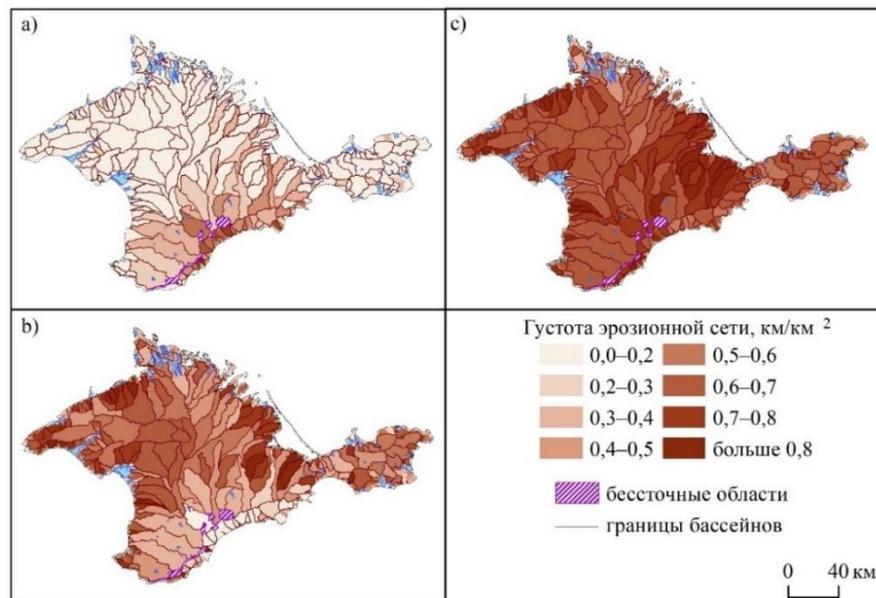


Рис. 1. Густота долинной и овражно-балочной сети бассейнов Крымского полуострова:  
 а) речной сети; б) овражно-балочной сети; в) эрозионной сети

Fig. 1. Density of the valley and gully-ravine network of the Crimean Peninsula basins:  
 a) river network; b) gully-girder network; c) erosion network

В центральной и западной части равнинного Крыма развита овражно-балочная сеть при низких значениях густоты речной сети, т.е. большое количество осадков не задерживаются на данной территории. Важно при проектировании бассейнового природопользования не допустить развитие овражно-балочной сети и сохранить как можно больше почвенной влаги для сельскохозяйственного производства.

В среднем густота эрозионной сети исследовательской территории составляет  $0,61 \pm 0,19$  км/км<sup>2</sup> (см. рис. 1 в). В равнинной части Крыма эрозионная сеть представлена

ложбинами, неглубокими оврагами и балками, реками. В прибрежных бассейнах овражно-балочная сеть проявляется сильнее (см. рис. 1 б). Кроме того, в районе Индольской впадины также отмечаются значения густоты-овражно-балочной сети выше средних – 0,71 км/км<sup>2</sup>.

Южная часть Крымских гор чрезвычайно расчленена, но при бассейновой организации этих территории этот фактор не является лимитирующим и заданный порог «суммарного стока» при автоматизированном выделении эрозионной сети был занижен для верного отражения в равнинной зоне. В среднем горизонтальное расчленение бассейнов горной части составляет 0,32 км/км<sup>2</sup>. При этом здесь значительно развита речная сеть, густота которой выше равнинной и составляет 0,11 км/км<sup>2</sup>. Высокими значениями горизонтального расчленения характеризуются бассейны рек Бирюк-Курасу, Булганак, Субаш, Чурук-Су.

Средняя высота полуострова Крым 135 м (рис. 2).

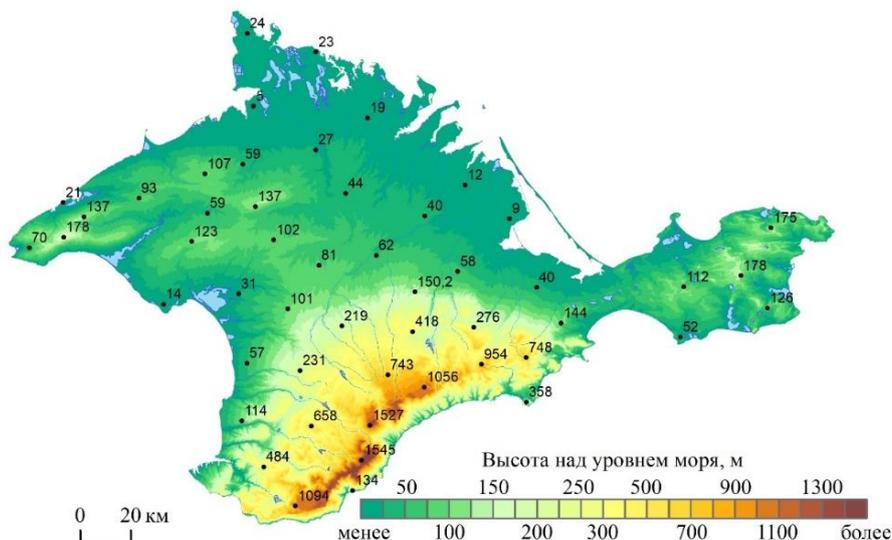


Рис. 2. Физическая карта Крымского полуострова  
Fig. 2. Physical map of the Crimean peninsula

Равнинный Крым по абсолютным высотам относится к низким равнинам с понижением высот к северу, средняя абсолютная высота здесь составляет 55 м. На Тарханкутском полуострове абсолютная высота достигает 178 м. Керченский полуостров имеет неоднородный рельеф, средняя абсолютная высота – 53 м. Горная часть Крыма имеет среднюю высоту 412 м. 82 % бассейнов расположены на территориях с абсолютной высотой, не превышающей 300 м, из которых 45 % относятся к бассейнам 4-го порядка (табл. 3).

Табл. 3. Распределение бассейнов Крыма по абсолютным высотам, км<sup>2</sup>  
Table 3. Distribution of Crimean basins by absolute heights, km<sup>2</sup>

Средняя высота над уровнем моря, м	Порядок речного бассейна					Бессточные области	Морские водосборы	Вся территория без деления на бассейны
	1–2	3	4	5	6			
0–300	3189,4	4656,7	9458,8	1603,0	565,3	0,9	1193,7	21807,8
300–500	175,3	220,4	3485,3	0	0	1,3	6,8	1773,6
500–1000	67,9	92,3	289,6	0	0	101,7	0	1364,0
выше 1000	0	0	0	0	0	136,3	0	299,3

В предгорных областях по высотной зональности расположено 15 % бассейнов, в горных – 2,3 %.

Значительную площадь (30 %) занимают бассейны с вертикальным расчленением 100–200 м. (рис. 3).

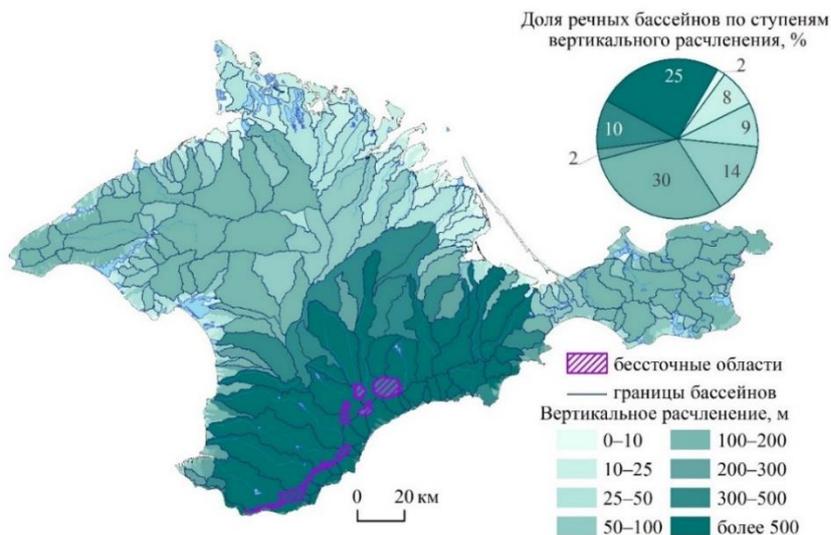


Рис. 3. Вертикальное расчленение бассейнов Крымского полуострова  
Fig. 3. Vertical subdivision of the Crimean Peninsula basins

Бассейны горного Крыма и предгорий занимают ступень со средним превышением более 500 м площадью 25 % территории. Горный Крым характеризуется вертикальным расчленением, характерным для среднегорного (превышение 25–200 м) и высокогорного (превышение 100 и более метров) рельефа. Для территории равнинного Крыма выделены пять ступеней вертикального расчленения. Максимальные значения на Тарханкутском и Керченском полуострове, минимальные – в восточной и северной частях Северо-Крымской низменности.

Между значениями вертикального расчленения в бассейне и средними значениями крутизны склонов установлена значительная линейная связь ( $r = 0,71$ ), что можно видеть и при сравнении рис. 3 и 4.

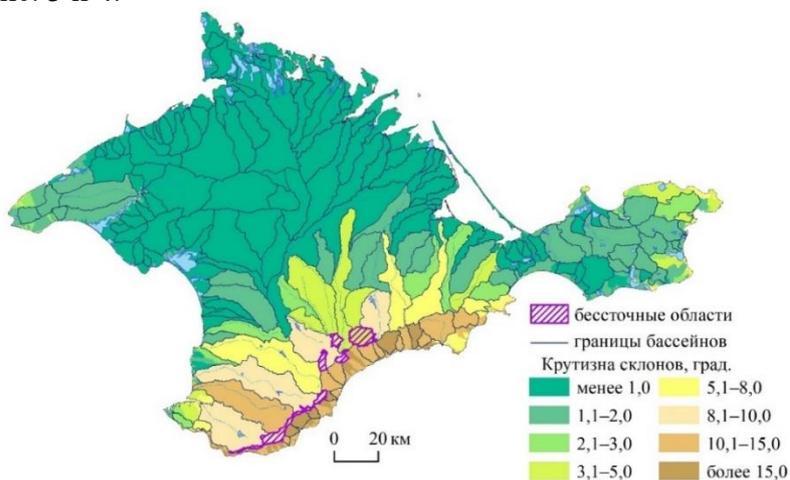


Рис. 4. Средняя крутизна склонов в бассейнах рек Крымского полуострова  
Fig. 4. Average steepness of slopes in the river basins of the Crimean Peninsula

Крутизна склона – один из факторов, контролирующих проникновение подземных вод в недра; следовательно, показатель пригодности для разведки подземных вод, в т.ч. для сельскохозяйственного использования. На пологих склонах поверхностный сток является медленным, что дает больше времени для просачивания дождевой воды, в то время как на крутых склонах обеспечивается значительный сток, сокращающий время пребывания дождевой воды, следовательно, сравнительно меньше инфильтрация [Prasad et al., 2008], что отражается на растительности [Ukrainskiy, et al., 2020].

Крутизна склонов на территории Крыма варьирует в широких диапазонах (см. рис. 4), что связано с различными ландшафтными условиями. В горах она достигает  $78^\circ$  (при средней крутизне  $9^\circ$ ), на равнинных участках крутизна склонов в среднем составляет  $1^\circ$  и занимает более половины всей территории (табл. 4). Эти территории активно используются в сельскохозяйственном производстве. Здесь преобладают процессы ветровой эрозии.

Табл. 4. Распределение склонов бассейнов Крыма по крутизне, км<sup>2</sup>  
Table 4. Distribution of slopes of Crimean basins by steepness, km<sup>2</sup>

Крутизна склонов, град	Порядок речного бассейна					Бессточные области	Морские водосборы	Вся территория
	1–2	3	4	5	6			
0,0–1,0	1723,9	3342,3	5439,1	1229,9	565,3	0	651,8	13510,1
1,1–2,0	725,6	745,8	2465,0	373,1	0	0	245,1	4928,6
2,1–3,0	192,8	325,7	668,1	0	0	0	47,4	1469,1
3,1–5,0	272,9	23,7	1165,7	0	0	79,6	74,7	1363,7
5,1–8,0	162,3	96,8	1211,2	0	0	22,1	47,7	1192,8
8,1–10,0	9,4	0	1516,2	0	0	136,3	14,5	588,3
10,1–15,0	228,3	205,9	768,5	0	0	0	66,8	1115,7
>15,0	117,3	229,2	0	0	0	2,2	52,5	1076,4

Около 20 % бассейнов имеют среднюю крутизну склонов  $3–10^\circ$  (см. табл. 4). Это территории предгорий, которые также используются для возделывания сельскохозяйственных культур и здесь совместно с дефляцией почв проявляются процессы водной эрозии. В данных бассейнах необходимо проектирование противоэрозионных рубежей, почвозащитных севооборотов, гидротехнических сооружений и т.п.

Преобладающим направлением склонов на полуострове является северное (20,0 % территории), южных склонов на 4,4 % меньше (табл. 5).

Табл. 5. Распределение территории Крыма по экспозиции  
Table 5. Distribution of the territory of Crimea by exposure

Экспозиция склона	Площадь, км <sup>2</sup>	Экспозиция склона	Площадь, км <sup>2</sup>
Плоские поверхности	13510,1	Южная	1475,3
Северная	1833,2	Юго-западная	1211,9
Северо-восточная	1482,6	Западная	1461,8
Восточная	1275,7	Северо-западная	1747,1
Юго-восточная	1247		

Площадь западных склонов незначительно больше восточных (на 0,8 %) и составляет 5,8 % территории. Они более теплые, и лучше подходят для возделывания позднеспелых культур.

Сочетание в равнинной части незначительных превышений и плоских поверхностей формирует низкие значения рельефной функции, составляющие в среднем 0,61 (рис. 5).

В равнинном Крыму рельефная функция не достигает критических значений (4,3–5,2), установленных в работе [Мальшев, Голусов, 2019]. В предгорных территориях и южной части черноморского побережья, где также развито сельскохозяйственное производство, значения рельефной функции достигают 10 и более, что является критическим для ведения сельскохозяйственной деятельности.

Типы склонов, влияющие на скорость эрозионные процессы, являются важным аспектом при определении перспективных землеустроительных мероприятий, но ввиду трудоемкости их выделения в ручном режиме зачастую игнорируются.

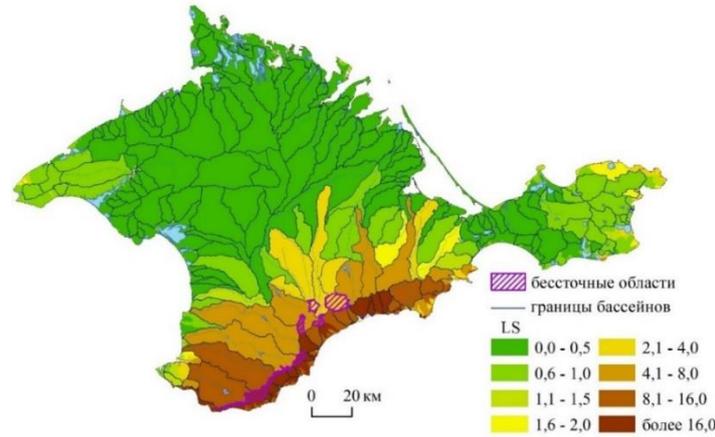


Рис. 5. Средние значения рельефного фактора (LS) в пределах бассейнов Крыма  
 Fig. 5. Average values of the relief factor (LS) within the Crimean basins

Геоинформационные системы позволяют определить типы склонов и их площади, но на предварительном этапе нужна экспертная оценка для установления граничных значений кривизны, которые могут меняться в зависимости от масштаба используемых данных. Для территории Крыма впервые определены типы склонов, среди которых наиболее распространены поперечно вогнутые продольно-выпуклые, поперечно-выпуклые продольно-вогнутые склоны (19,4 и 19,0 % соответственно) (табл. 6).

Табл. 6. Типы склонов полуострова Крым  
 Table 6. Types of slopes of the Crimean Peninsula

Индекс склона	Тип склона	Суммарная площадь, тыс. га	Доля от площади полуострова, %
IA	поперечно-прямые, продольно-прямые	4038,6	16,0
IB	поперечно-прямые, продольно-вогнутые	496,2	2,0
IC	поперечно-прямые, продольно-выпуклые	1096,5	4,3
IIA	поперечно-выпуклые, продольно-прямые	3798,3	15,0
IIB	поперечно-выпуклые, продольно-вогнутые	4807,5	19,0
IIC	поперечно-выпуклые, продольно-выпуклые	1562,2	6,2
IIIA	поперечно-вогнутые, продольно-прямые	3358,5	13,3
IIIB	поперечно-вогнутые, продольно-вогнутые	1179,6	4,7
IIIC	поперечно-вогнутые, продольно-выпуклые	4907,3	19,4

Поперечно прямых склонов на исследовательской территории выделено 22,3 %. Эти склоны преимущественно размещены в равнинной части Крыма (рис. 6). Площадь территорий с собирающим стоком (тип III) на 2,9 % меньше, чем с рассеивающим (тип II) и составляет 37,4 % (см. табл. 6). Эти территории наиболее подвержены смыву почв, но большая их часть размещена в горной части Крыма (см. рис. 6).

Анализ рис. 6 и табл. 6 показывает, что преобладают бассейны с поперечно-выпуклыми продольно-выпуклыми склонами (38,8 % бассейнов) и поперечно-прямые продольно-прямые (33,6 %). В последних процессы водной эрозии развиты меньше, а при планировании мероприятий против дефляции возможно применение линейных рубежей без учета контурности рельефа. 12,8 % бассейнов равнинного Крыма имеют поперечно-прямые продольно-выпуклые склоны, на которых также рекомендуется прямолинейная организация линейных рубежей. В пределах всех бассейнов в большинстве случаев встречаются все девять типов бассейнов. В мелких морских бассейнах выделяются 3–4 типа склонов, тогда доля отдельного типа может достигать 65 %. В среднем коэффициент вариации доли типов IB, IB, IIB и IIIB, в бассейнах равен 40,3 %.

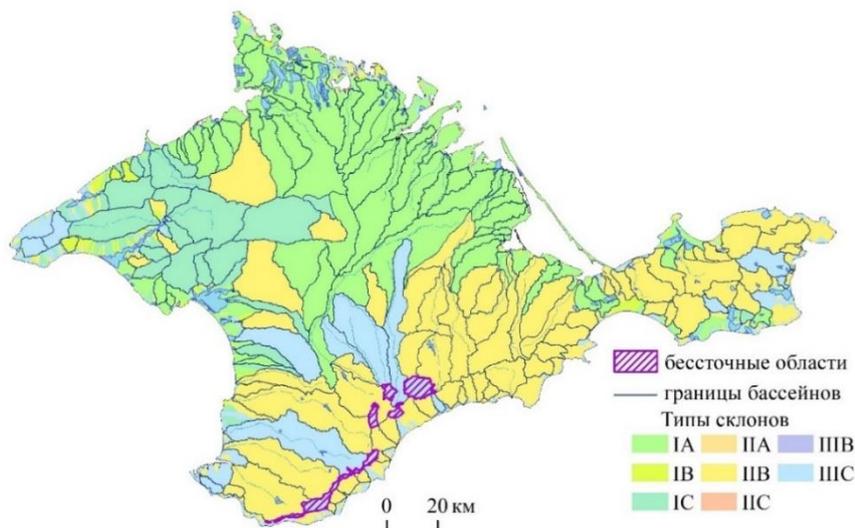


Рис. 6. Преобладающие типы склонов бассейнов Крыма (обозначения в табл. 6)  
 Fig. 6. Prevailing types of slopes of the Crimean basins (designations correspond to Table 6)

## ВЫВОДЫ

В данном исследовании геоинформационные системы рассмотрены как инструмент для проведения морфометрического анализа рельефа, являющегося предпроектным обоснованием почвоводоохранного обустройства территории бассейнов Крыма. В изученных отечественных и зарубежных источниках не находят отражение (или частично оговариваются) применяемые инструменты используемых программ, методы интерполяции, разрешение гридов, используемые классификации, значение суммарного стока и пр. Тогда как представленная статья имеет эти данные, что позволяет использовать описанные инструменты и методы их применения для других территорий, сопоставлять полученные данные с имеющимися для Крыма. Проведенный морфометрический анализ рельефа позволил выделить основные особенности рельефа бассейнов Крымского полуострова. Эти параметры будут использованы при проектировании бассейнового природопользования Крыма. ГИС-методы и цифровые данные о местности являются ценным ресурсом для изучения эрозионной сети и территории водосбора, а также для количественного анализа гидроморфометрических параметров из-за их гибкости, рентабельности, эффективности времени и возможностей манипулирования и анализа пространственной информации.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке РФФ, грант 20-67-46017.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by the Russian Science Foundation, grant No 20-67-46017.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буряк Ж.А., Нарожняя А.Г. Выбор модели оценки эрозионного потенциала рельефа для условий Белгородской области. Эрозионные, русловые и устьевые процессы (исследования молодых ученых университетов): сборник статей по материалам XI семинара молодых ученых вузов, объединяемых советом по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов, 2016. С. 59–64.
2. Ергина Е.И., Тронза Г.Е. Современное почвенно-экологическое состояние Крымского полуострова. Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология, 2016. Т. 2. № 3. С. 196.

3. *Ергина Е.И., Кошлатый С.Д.* Методико-технологические аспекты моделирования допустимых норм эрозии как основного критерия почвозащитных систем земледелия в Крыму. *Культура народов Причерноморья*, 2005. № 73. С. 148–151.
4. *Корытный Л.М.* Бассейновая концепция в природопользовании. Иркутск: Изд-во Института географии СО РАН, 2001. 163 с.
5. *Кузьменко Я.В., Лисецкий Ф.Н., Нарожняя А.Г.* Применение бассейновой концепции природопользования для почвоводоохранного обустройства агроландшафтов. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, 2012. Т. 14. № 1–9. С. 2432–2435.
6. *Лисецкий Ф.Н., Буряк Ж.А., Маринина О.А., Полетаев А.О.* Бассейновая дифференциация ландшафтов равнинного Крыма как основа проектов почвоводоохранных систем земледелия. *Ландшафтоведение и ландшафтная экология: коадаптация ландшафта и хозяйственной деятельности: материалы Междунар. науч.-практ. конф. «Четвертые ландшафтно-экологические чтения, посвященные Г. Е. Гришанкову»*, Симферополь, 22–25 сентября 2020 г. Симферополь, 2020. С. 42–47.
7. *Мальшев А.В., Голесов П.В.* Критическое значение фактора рельефа и эрозионная опасность агроландшафтов Белгородской области. *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки*, 2019. Т. 43. № 1. С. 63–75. DOI: 10.18413/2075-4671-2019-43-1-63-75.
8. *Мамедов С.Г., Алекберова С.О., Гамидова З.А., Исмаилова Л.А.* Изучение морфометрических показателей рельефа селеопасных бассейнов по данным радарных спутниковых снимков (на примере междуречья Шанчай-Дамирапаранчай). *Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Естественные науки*, 2017. № 2. С. 59–70. DOI: 10.18384/2310-7189-2017-2-59-70.
9. *Позаченюк Е.А., Петлюкова Е.А.* ГИС-анализ морфометрических показателей рельефа центрального предгорья главной гряды Крымских гор для целей ландшафтного планирования. *Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология*, 2016. Т. 2 (68). №2. С. 95–111.
10. Проектирование и внедрение эколого-ландшафтных систем земледелия в сельскохозяйственных предприятиях Воронежской области. Под ред. М.И. Лопырева. Воронеж, 1999. 186 с.
11. *Смирнова Л.Г., Украинский П.А., Нарожняя А.Г., Кожушков А.А.* Анализ распределения типов склонов на региональном уровне с использованием методов топографического моделирования. *Достижение науки и техники АПК*, 2017. Т. 31. № 11. С. 17–21.
12. *Смолянинов В.М., Дегтярев С.Д., Щербинина С.В.* Эколого-гидрологическая оценка состояния речных водосборов Воронежской области. Воронеж: ИСТОКИ, 2007. 133 с.
13. *Современные ландшафты Крыма и сопредельных акваторий.* Под ред. Е.А. Позаченюк. Симферополь: Бизнес-Информ, 2009. 668 с.
14. *Табуницкий В.А., Петлюкова Е.А.* Густота расчленения рельефа на территории Крымского полуострова. *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки*, 2019. № 1 (201). С. 95–100.
15. *Табуницкий В.А.* Рельеф бассейнов рек северо-западного склона крымских гор (на примере бассейнов рек Западный Ббулганак, Альма, Кача, Бельбек, Черная). *Геополитика и экогеодинамика регионов*, 2018. Т. 4 (14). № 3. С. 78–87.
16. *Токарев С.В., Рощина К.Н.* Картирование элементов рельефа земной поверхности с использованием индекса топографической позиции (на примере Крымского полуострова). *Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология*, 2015. Т. 1(67). № 4. С. 64–85.

17. Харченко С.В. Новые задачи морфометрии рельефа и автоматизированные морфологические классификации в геоморфологии. Геоморфология, 2020. № 1. С. 3–21. DOI: 10.31857/S043542812001006X.
18. Швец Г.И. Формирование водной эрозии стока наносов и их оценка. Л.: Гидрометеоздат, 1974. 184 с.
19. Ahmed S.A., Chandrashekarappa, K.N., Raj, S.K., Nischitha V., Kavitha G. Evaluation of morphometric parameters derived from ASTER and SRTM DEM – A study on Bandihole sub-watershed basin in Karnataka. J Indian Soc Remote Sens, 2010. No 38. P. 227–238. DOI: 10.1007/s12524-010-0029-3.
20. Das S., Patel P.P., Sengupta S. Evaluation of different digital elevation models for analyzing drainage morphometric parameters in a mountainous terrain: a case study of the Supin–Upper Tons Basin, Indian Himalayas. SpringerPlus, 2016. No 5. P. 1544. DOI: 10.1186/s40064-016-3207-0.
21. Ermolaev O.P., Mal'tsev K.A., Mukharamova S.S., Kharchenko S.V., Vedeneeva E.A. Cartographic model of river basins of european Russia. Geography and Natural Resources, 2017. V. 38. No 2. P. 131–138. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2017-2(27-36).
22. Farhan Y., Anbar A., Al-Shaikh N., Mousa R. Prioritization of Semi-Arid Agricultural Watershed Using Morphometric and Principal Component Analysis, Remote Sensing, and GIS Techniques, the Zerqa River Watershed, Northern Jordan. Agricultural Sciences, 2017. V. 8. No 1. DOI: 10.4236/as.2017.81009.
23. Gizachew, K., Berhan, G. Hydro-geomorphological characterization of Dhidhessa River Basin, Ethiopia. International soil and water conservation research, 2018. V. 6. P. 175–183. DOI: 10.1016/j.iswcr.2018.02.003.
24. Khare D., Mondal, A., Mishra, P. K., Kundu, S., Meena, P. K. Morphometric analysis for prioritization using remote sensing and GIS techniques in a Hilly catchment in the state of Uttarakhand, India. Indian Journal of Science and Technology, 2014. V. 7(10). P. 1650–1662.
25. Lisetskii F.N., Zemlyakova A.V., Terekhin E.A., Naroznyaya A.G., Pavlyuk Y.V., Ukrainskii P.A., Kirilenko Z.A., Marinina O.A., Samofalova O.M. New opportunities of geoplanning in the rural area with the implementing of geoinformational technologies and remote sensing. Advances in Environmental Biology, 2014. V. 8. No 10. P. 536–539.
26. Morgan R.P.C. Soil Erosion. London, New York: Longman, 1979. 113 p.
27. Prasad R.K., Mondal, N.C., Banerjee, P. Nandakumar M.V., Singh V.S. Deciphering potential groundwater zone in hard rock through the application of GIS. Environ Geol, 2008. No 55. P. 467–475. DOI: 10.1007/s00254-007-0992-3.
28. Sukristiyant S., Maria R., Lestiana H. Watershed-based morphometric analysis: A review. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2018. DOI: 10.1088/1755-1315/118/1/012028.
29. Wischmeier W.H., Smith D.D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. Agriculture Handbook U.S. Department of Agriculture. Washington, DC, 1978. No 537. 543 p.
30. Yunus A., Oguchi T., Hayakawa Y. Morphometric analysis of drainage basins in the western arabian peninsula using multivariate statistics international. Journal of Geosciences, 2014. V. 5 No 5. DOI: 10.4236/ijg.2014.55049.

#### REFERENCES

1. Ahmed S.A., Chandrashekarappa, K.N., Raj, S.K., Nischitha V., Kavitha G. Evaluation of morphometric parameters derived from ASTER and SRTM DEM – A study on Bandihole

- sub-watershed basin in Karnataka. *J Indian Soc Remote Sens*, 2010. No 38. P. 227–238. DOI: 10.1007/s12524-010-0029-3.
2. *Buriak Zh.A., Narozhnyaya A.G.* The choice of a model for assessing the erosion potential of the relief for the conditions of the Belgorod region. Erosion, channel and estuarine processes (research of young scientists of universities): a collection of articles based on the materials of the XI seminar of young scientists of universities, united by the council on the problem of erosion, channel and estuarine processes, 2016. P. 59–64 (in Russian).
  3. *Das S., Patel P.P., Sengupta S.* Evaluation of different digital elevation models for analyzing drainage morphometric parameters in a mountainous terrain: a case study of the Supin-Upper Tons Basin, Indian Himalayas. *SpringerPlus*, 2016. No 5. P. 1544. DOI: 10.1186/s40064-016-3207-0.
  4. Design and implementation of ecological and landscape farming systems in agricultural enterprises of the Voronezh region. Ed. M.I. Lopyreva. Voronezh, 1999. 168 p. (in Russian).
  5. *Ergina E.I., Koshlatiy S.D.* Methodological and technological aspects of modeling permissible erosion rates as the main criterion for soil-protective farming systems in Crimea. *Culture of the peoples of the Black Sea region*, 2005. No 73. P. 148–151 (in Russian).
  6. *Ergina E.I., Tronza G.E.* The current soil and ecological state of the Crimean Peninsula. *scientific Notes of the Crimean Federal V.I. Vernadsky University. Geography. Geology*, 2016. V. 2. No 3. P. 196 (in Russian).
  7. *Ermolaev O.P., Mal'tsev K.A., Mukharamova S.S., Kharchenko S.V., Vedeneeva E.A.* Cartographic model of river basins of European Russia. *Geography and Natural Resources*, 2017. V. 38. No 2. P. 131–138. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2017-2(27-36).
  8. *Farhan Y., Anbar A., Al-Shaikh N., Mousa R.* Prioritization of Semi-Arid Agricultural Watershed Using Morphometric and Principal Component Analysis, Remote Sensing, and GIS Techniques, the Zerqa River Watershed, Northern Jordan. *Agricultural Sciences*, 2017. V. 8. No 1. DOI: 10.4236/as.2017.81009.
  9. *Gizachew K., Berhan G.* Hydro-geomorphological characterization of Dhidhessa River Basin, Ethiopia. *International soil and water conservation research*, 2018. V. 6. P. 175–183. DOI: 10.1016/j.iswcr.2018.02.003.
  10. *Kharchenko S.V.* New tasks of relief morphometry and automated morphological classifications in geomorphology. *Geomorphology*, 2020. No 1. P. 3–21 (in Russian). DOI: 10.31857/S043542812001006X.
  11. *Khare D., Mondal, A., Mishra, P.K., Kundu, S., Meena, P. K.* Morphometric analysis for prioritization using remote sensing and GIS techniques in a Hilly catchment in the state of Uttarakhand, India. *Indian Journal of Science and Technology*, 2014. V. 7(10). P. 1650–1662.
  12. *Korytnyi L.M.* Basin concept in nature management. Irkutsk: Izd-vo Instituta geografii SO Ran, 2001. 163 p. (in Russia).
  13. *Kuzmenko Ya.V., Lisetskii F.N., Narozhnyaya A.G.* Application of the basin concept of nature management for soil and water protection arrangement of agricultural landscapes. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2012. V. 14. No 1–9. P. 2432–2435 (in Russian).
  14. *Lisetskii F.N., Buriak Zh.A., Marinina O.A., Poletaev A.O.* Basin differentiation of landscapes of the lowland Crimea as the basis for projects of soil protection systems of agriculture. *Landscape science and landscape ecology: coadaptation of landscape and economic activity: materials of the international. scientific-practical conf. "The fourth landscape-ecological readings dedicated to G.E. Grishankov"*, Simferopol, September 22–25, 2020 Simferopol, 2020. P. 42–47 (in Russian).

15. *Lisetskii F.N., Zemlyakova A.V., Terekhin E.A., Naroznyaya A.G., Pavlyuk Y.V., Ukrainskii P.A., Kirilenko Z.A., Marinina O.A., Samofalova O.M.* New opportunities of geoplanning in the rural area with the implementing of geoinformational technologies and remote sensing. *Advances in Environmental Biology*, 2014. V. 8. No 10. P. 536–539.
16. *Malyshev A.V., Goleusov P.V.* The critical value of the relief factor and the erosion hazard of the agricultural landscapes of the Belgorod region. *Belgorod state university scientific bulletin natural sciences*, 2019. V. 43. No 1. P. 63–75 (in Russian). DOI: 10.18413/2075-4671-2019-43-1-63–75.
17. *Mamedov S.G., Alekberova S.O., Gamidova Z.A., Ismaylova L.A.* Study of morphometric indicators of the relief of mudflow-prone basins according to radar satellite images (on the example of the Shanchai-Damiraparanchay interfluve). *Bulletin of the Moscow Region state University. Series: Natural Sciences*, 2017. No 2. P. 59–70 (in Russian). DOI: 10.18384/2310-7189-2017-2-59-70.
18. Modern landscapes of the Crimea and adjacent water areas. Editor Y.A. Pozachenok.; Simferopol': *Biznes-Inform*, 2009. 668 p. (in Russia).
19. *Morgan R.P.C.* Soil Erosion. London, New York: Longman, 1979. 113 p.
20. *Pozachenyuk 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 V.I. Vernadsky University. Geography. Geology*, 2016. V. 2 (68). No 2. P. 95–111 (in Russian).
21. *Prasad R.K., Mondal, N.C., Banerjee, P. Nandakumar M.V., Singh V.S.* Deciphering potential groundwater zone in hard rock through the application of GIS. *Environ Geol*, 2008. No 55. P. 467–475. DOI: 10.1007/s00254-007-0992-3.
22. *Shwebs G.I.* Formation of water erosion of sediment runoff and their assessment. Leningrad: *Gidrometeoizdat*, 1974. 184 p. (in Russian).
23. *Smirnova L.G., Ukrainskii P.A., Narozhnyaya A.G., Kozhushkov A.A.* Analysis of distribution of slope types at the regional level using methods of topographical modeling. *Achievements of Science and Technology of ArcGIS*, 2017. V. 31. No 11. P. 17–21. (in Russian).
24. *Smolyaninov V.M., Degtyarev S.D., Shcherbinina S.V.* Ecological and hydrological assessment of the state of the river catchments of the Voronezh region. Voronezh: *Istoki*, 2007. 133 p. (in Russian)
25. *Sukristiyant S., Maria R., Lestiana H.* Watershed-based morphometric analysis: A review. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2018. DOI: 10.1088/1755-1315/118/1/012028.
26. *Tabunshchik V.A.* Relief of river basins on the northwestern slope of the Crimean mountains (for example, the basins of the Western Bbulganak, Alma, Kacha, Belbek, Chernaya rivers). *Geopolitics and ecogeodynamics of regions*, 2018. V. 4 (14). No 3. P. 78–87 (in Russian).
27. *Tabunshchik V.A., Petlyukova E.A.* Density of the relief dissection on the territory of the Crimean Peninsula. *Bulletin of higher education institutes north Caucasus region natural sciences*, 2019. No 1 (201). P. 95–100 (in Russian).
28. *Tokarev S.V., Roshchina K.N.* Mapping relief elements of the earth's surface using the index of the topographic position (on the example of the Crimean peninsula). *Scientific Notes of the Crimean Federal V.I. Vernadsky University. Geography. Geology*, 2015. V. 1 (67). No 4. P. 64–85 (in Russian).
29. *Wischmeier W.H., Smith D.D.* Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. *Agriculture Handbook U.S. Department of Agriculture*. Washington, DC, 1978. No 537. 543 p.
30. *Yunus A., Oguchi T., Hayakawa Y.* Morphometric analysis of drainage basins in the western arabian peninsula using multivariate statistics international. *Journal of Geosciences*, 2014. V. 5. No 5. DOI: 10.4236/ijg.2014.55049.