

ГЕОМОРФОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕЛЬЕФА ТЕРРИТОРИИ ГОРЕЦКОГО РАЙОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**Ю. Н. ДУБРОВА, Т. Н. МЫСЛЫВА, Т. Н. ТКАЧЕВА***УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия»,
г. Горки, Республика Беларусь, 213407, e-mail: byrty41@yahoo.com, tamaratkacheva60771@gmail.com**(Поступила в редакцию 20.01.2021)*

Рельеф территории является одним из важнейших факторов, определяющих локальные особенности распределения вещества и энергии в агроландшафтах, а также главной составляющей почвообразовательного процесса. Информация о количественных характеристиках рельефа, выраженных через его морфометрию, является необходимым условием для решения широкого круга научных и прикладных задач. Впервые для территории Горецкого района Могилевской области по данным гидрологически корректной цифровой модели рельефа был выполнен комплекс картометрических и морфометрических расчетов, а также построены актуальные карты количественных показателей эрозионного потенциала и гидроморфности почвенного покрова – морфометрических индексов LSF, SPI, TWI и TRI. В качестве исходных использовались данные радарной топографической съемки с пространственным разрешением 30 м. Комплексный геоморфометрический анализ цифровой модели рельефа выполнялся с использованием функциональных возможностей набора инструментов «Пространственный анализ» и «Гидрология» ArcGIS версии 10.5. Установлено, что 25 % территории Горецкого района имеет высокий риск развития линейной эрозии, а основной причиной проявления и интенсификации данного процесса является почвенно-антропогенный фактор. Преобладание среди идентифицированных водотоков тальвегов 1–2 порядков (75,3 % общей длины) также свидетельствует о развитии водноэрозионных процессов в пределах исследуемой территории.

Ключевые слова: геоморфометрический анализ, SRTM, рельеф, эрозия, морфометрические индексы.

The relief of the territory is one of the most important factors that determine the local features of distribution of matter and energy in agricultural landscapes, as well as the main component of soil-forming process. Information about the quantitative characteristics of the relief, expressed through its morphometry, is a necessary condition for solving a wide range of scientific and applied problems. For the first time for the territory of Gorki district of Mogilev region, a complex of cartometric and morphometric calculations was performed based on the data of a hydrologically correct digital relief model, as well as up-to-date maps were drawn of quantitative indicators of erosion potential and hydromorphism of the soil cover – morphometric indices LSF, SPI, TWI and TRI. As the initial data, we used radar topographic survey data with a spatial resolution of 30 m. Complex geomorphometric analysis of digital relief model was performed using the functionality of Spatial Analysis and Hydrology toolkit of ArcGIS version 10.5. It has been established that 25 % of the territory of Gorki district has a high risk of linear erosion, and the main reason for the manifestation and intensification of this process is the soil-anthropogenic factor. The prevalence of thalwegs of 1–2 orders among the identified streams (75.3 % of the total length) also indicates the development of water erosion processes within the examined area.

Key words: geomorphometric analysis, SRTM, relief, erosion, morphometric indices.

Введение

Рельеф – один из ведущих факторов формирования природных и агроландшафтов, а его характеристики во многом определяют локальные особенности распределения влаги, вещества и энергии в экосистемах. Он является важнейшей составляющей процесса почвообразования, оказывая максимальное воздействие на локальное разнообразие почвенного покрова посредством определения условий увлажнения почв и энергии склоновых процессов, приводящих к деградации земель и выводу их из сельскохозяйственного использования. Информация о количественных характеристиках рельефа, выраженных через его морфометрию, является необходимым условием для решения широкого круга научных и прикладных задач. В этой связи изучение структурно-геоморфологических особенностей рельефа выступает неотъемлемой частью комплексных исследований при агроэкологической оценке земель и их мониторинге [1, 2]. Одной из базовых основ изучения рельефа любой территории считается геоморфометрический анализ, обеспечивающий более объективную и всестороннюю его оценку, и являющийся исключительно важным при комплексном исследовании экзогенных природных процессов (абразионно-оползневые явления, склоновая и русловая эрозия, селевая опасность), состояния почвенного и растительного покрова, прогнозировании и ландшафтном планировании, а также при разработке почвоохранных мероприятий [3, 4]. Наиболее прогрессивным и информативным методом изучения особенностей рельефа является совместное использование функциональных возможностей ГИС по гидрологическому моделированию и построению корректных топографических поверхностей, учитывающих морфометрические особенности изучаемой территории, и данных дистанционного зондирования Земли. Однако, поскольку такие функции ГИС работают с растровым типом данных, методика построения и интерпретация полученных морфометрических показателей, а также их визуализация принципиально отличаются от традиционной [1, 5], а следовательно, требуют более детального изучения.

Цель исследований: 1) определение основных геоморфометрических характеристик рельефа и выполнение комплексного геоморфометрического анализа территории Горецкого района Могилевской области Республики Беларусь; 2) оценка количественных показателей плоскостной и линейной эро-

зии и показателя гидроморфности почвенного покрова с использованием данных дистанционного зондирования.

Основная часть

Исследования выполнялись в 2020 г. в пределах Горецкого района Могилевской области. Для построения производных цифровой модели рельефа (ЦМР) использовалась 4 версия (2018 г.) данных Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) – радарной топографической съемки поверхности земного шара, произведенной в феврале 2000 г. с помощью специальной радарной системы методом радарной интерферометрии с борта американского челнока Shuttle [5]. Математической основой данных является референц-эллипсоид WGS84 и проекция GCS_WGS_1984, а их пространственное разрешение составляет 1 угловую секунду (30 м). Данные SRTM имеют вид квадрата 1 x 1 градус, что при максимальном доступном разрешении и обрезке по векторной маске Горецкого района представляет собой матрицу 2201 x 1599 элементов. Один дополнительный нижний ряд и одна правая колонка растра являются дублирующими и повторяются на соседней матрице. Снимок представлен простым 16-битным растром, где атрибут пиксела соответствует высоте над уровнем моря в данной точке. Абсолютная ошибка геолокации 90%-ной обеспеченности составляет 8,8 м, абсолютная погрешность определения высоты – 6,2 м, относительная ошибка высоты – 2,6 м [1].

Геоморфометрический анализ ЦМР выполнялся с использованием функциональных возможностей набора инструментов «Пространственный анализ» и «Гидрология» ArcGIS версии 10.5. Поскольку на используемой цифровой модели рельефа территории имеются водотоки и понижения, выполнялось заполнение локальных понижений в растре поверхности и удаление всех небольших ошибок и неточностей, присущих исходным данным. Моделирование эрозионной сети и определение порядка тальвегов выполнялись по методике Стралера-Философова [5]. Морфометрические характеристики территории рассчитывались с учетом трех аспектов: линейного, площадного и рельефного (табл. 1). Характеристики, относящиеся к линейному аспекту, определялись согласно методикам, описанным в работах [6, 7], к площадному и рельефному – в соответствии с методиками, приведенными в работах [6, 8].

Таблица 1. Геоморфометрические параметры рельефа территории Горецкого района, рассчитанные по данным дистанционного зондирования

Название параметра	Символ	Формула расчета параметра	Рассчитанное значение параметра
<i>Линейные аспекты</i>			
Площадь территории, км ²	A	Общая площадь территории	1289,69
Длина бассейна, км	L _b	$L_b = 1,312 \cdot A^{0,568}$, где A – площадь территории, км ²	76,68
Периметр бассейна, км	P	Внешняя граница территории	219,29
Порядок тальвегов	U	Иерархический ранг	4
Длина тальвегов, км	L _u	Длина тальвегов каждого порядка	1 – 406,67; 2 – 190,22; 3 – 150,78; 4 – 44,59
Количество тальвегов, шт	N _u	Количество тальвегов каждого порядка	1 – 296; 2 – 125; 3 – 97; 4 – 37
Средняя длина тальвегов каждого порядка, км	L _{sm}	$L_{sm} = L_u / N_u$	1 – 1,37; 2 – 1,52; 3 – 1,55; 4 – 1,21
Соотношение длин тальвегов	R _l	$R_l = L_u / L_{u-1}$, где L _{u-1} – общая длина тальвегов следующего низшего порядка	1 – 0,46; 2 – 0,79; 3 – 0,30
Коэффициент бифуркации	R _b	$R_b = N_u / N_{u-1}$, где N _{u-1} – общее количество тальвегов следующего высшего порядка	1/2 – 2,37; 2/3 – 1,29; 3/4 – 2,62
Средний коэффициент бифуркации	R _{bm}	Средний уровень бифуркации тальвегов всех порядков	2,09
<i>Площадные аспекты</i>			
Плотность водосборной сети, км/км ²	D _d	$D_d = L_u / A$, где L _u – общая длина тальвегов	0,61
Текстура водосборной сети, шт/км	R _t	$R_t = N_u / P$, где N _u – общее количество тальвегов	2,53
Частота водосборной сети, шт/км ²	F _s	$F_s = N_u / A$	0,43
Коэффициент удлинения	R _e	$R_e = 2 \cdot \sqrt{(A/\pi)} / L_b$	0,53
Коэффициент округлости	R _c	$R_c = (4 \cdot \pi \cdot A) / P^2$	0,34
Коэффициент формы водосбора	R _f	$R_f = A / L_b^2$	0,22
Коэффициент вытянутости водосбора	B _s	$B_s = L_b^2 / A$	4,56
Коэффициент компактности	C _c	$C_c = 0,2821 \cdot P / A^{0,5}$	1,72
Длина водотоков на поверхности	L _g	$L_g = 1/2 \cdot D_d$	0,20
Коэффициент инфильтрации	I _f	$I_f = D_d \cdot F_s$	0,19
<i>Аспекты рельефа</i>			
Амплитуда колебаний высот, м	V _h	Вертикальное расстояние между самой высокой и самой низкой точкой	79
Коэффициент рельефа	R _h	$R_h = V_h / L_b$	0,0103
Коэффициент устойчивости рельефа	R _n	$R_n = V_h / D_d$	0,20

В качестве параметров линейного аспекта были определены порядок тальвегов (U), количество тальвегов (N_u), длина тальвегов каждого порядка (L_u), средняя длина тальвегов каждого порядка (L_{sm}), соотношение длин тальвегов (R_l) и коэффициент бифуркации (R_b). В пределах исследуемой территории были идентифицированы тальвеги четырех порядков с общей длиной 792,26 км; при этом на тальвеги 1-го порядка приходится 51,3 % общей длины, а на суммарную длину тальвегов 1–2 порядков – 75,3 % общей длины (рис. 1).

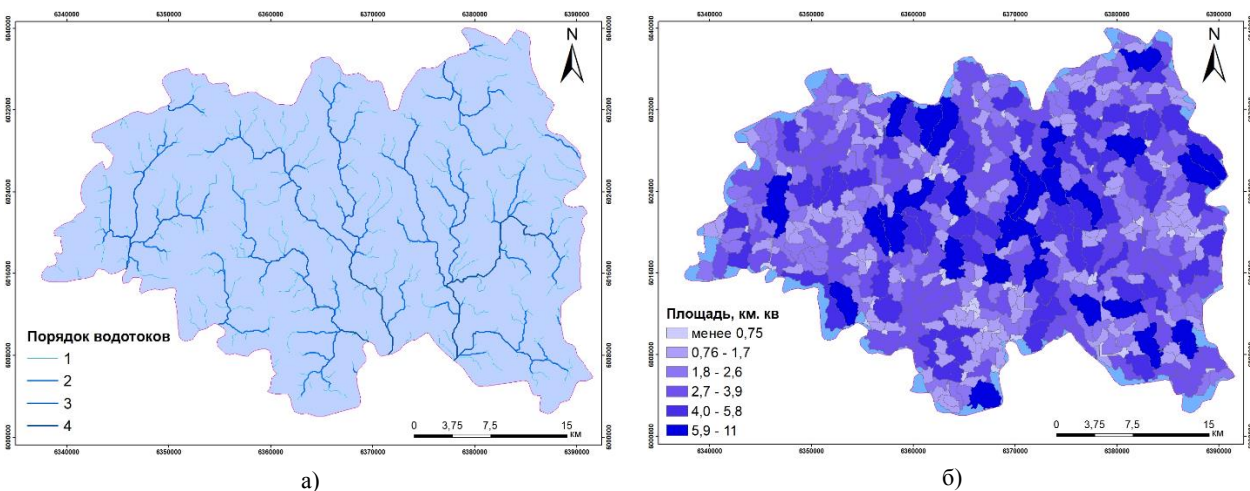


Рис. 1. Постоянные водотоки, идентифицированные по методике Стралера-Философова, и их водосборные бассейны, полученные по данным SRTM Горещкого района

Средняя длина тальвегов колеблется в пределах от 1,21 км до 1,55 км, а распределение длин разнорядковых тальвегов подчиняется обратному экспоненциальному закону. Соотношение длин тальвегов колеблется от 0,30 до 0,79, достигая максимального значения для водотоков 2-го порядка. Преобладание среди идентифицированных водотоков тальвегов 1–2 порядков свидетельствует о развитии водноэрозионных процессов в пределах исследуемой территории.

Параметры максимального стока (расходы воды, объемы стока), определяющие генеральные размеры водопропускных сооружений, зависят прежде всего от площадей водосборных бассейнов, поэтому определение границ водосборов и их площадей является важной задачей, решение которой требуется при проектировании гидросооружений. Идентификация водосборных бассейнов предусматривает выполнение трех последовательных операций: привязку точек устья водотоков к растру аккумуляции стока; построение границ водосборов в растровом режиме; векторизацию водосборных бассейнов. Посредством применения функциональных возможностей гидрологического модуля ArcGIS в пределах исследуемой территории были идентифицированы 576 водосборных бассейнов, площадь которых колеблется от 0,0004 км² до 10,96 км² при среднем значении 2,11 км². Низкие значения величины коэффициента бифуркации (R_b), определяемого как отношение количества сегментов водотока заданного порядка к числу сегментов водотока следующего, более высокого порядка и характеризующего степень близости структуры водотоков к древовидной [9, 10], характерны для структурно менее нарушенных водосборных бассейнов без каких-либо искажений в системе водотоков и для территории Горещкого района приурочены к водотокам 2 порядка.

В качестве параметров ареального аспекта использовались такие показатели, как плотность и текстура водосборной сети, частота потока, коэффициент инфильтрации, коэффициенты формы, удлинения, округлости и компактности водосбора, длина потоков на поверхности. Плотность водосборной сети (D_d) является одной из доминирующих характеристик, описывающих степень расчленения рельефа и потенциал стока. Низкое значение данного показателя для Горещкого района свидетельствует о том, что поверхность исследуемой территории представлена водопроницаемыми породами и покрыта густым растительным покровом, а рельеф имеет преимущественно равнинный характер. О достаточной водопроницаемости подстилающих пород свидетельствует и величина коэффициента инфильтрации (I_r), равная 1,19 и характеризующая умеренный сток с поверхности. Текстура водосборной сети (R_t) обратно пропорционально зависит от ее плотности и подразделяется на пять классов [6]: <2 – очень грубая; 2–4 – грубая; 4–6 – умеренная; 6–8 – нормальная; >8 – тонкая текстура. Данный показатель в пределах исследуемой территории достигает величины 2,84 и, согласно приведенной классификации, относится к классу «грубая». Частота водосборной сети (F_s) имеет положи-

тельную корреляцию с ее плотностью, а ее высокие значения связаны с наличием слабопроницаемой подстилающей поверхности, редкой растительности, высотного рельефа и низкой инфильтрационной способности [11]. Для территории Горецкого района значение данного показателя составляет 0,48. Коэффициент удлинения (R_e) связан с наличием высоких форм рельефа и крутых наземных склонов, а его величина подразделяется на три класса [12]: $>0,9$ – круглые; $0,8-0,9$ – овальные; $<0,7$ – удлиненные формы рельефа. Значение R_e для исследуемой территории составляет 0,54, что соответствует наличию в ее пределах преимущественно вытянутых форм рельефа. Коэффициент округлости рельефа (R_c) связан с длиной и частотой водотоков, геологическими структурами, характером землепользования, климатом, рельефом и уклоном поверхности [13]. Величина данного показателя для Горецкого района составляет 0,34, что соответствует вытянутой форме территории. На удлиненную форму исследуемой территории указывают также величина коэффициента формы водосбора (R_f), равная 0,22, и величина коэффициента вытянутости водосбора (B_s), значительно превышающая единицу и равная 4,56.

Данные дистанционного зондирования, полученные по результатам выполнения радарной топографической съемки, позволяют определить направление поверхностного стока в каждой ячейке растра, что в свою очередь делает возможным прогнозирование превалирующих направлений развития водноэрозионных процессов на региональном уровне (рис. 2).

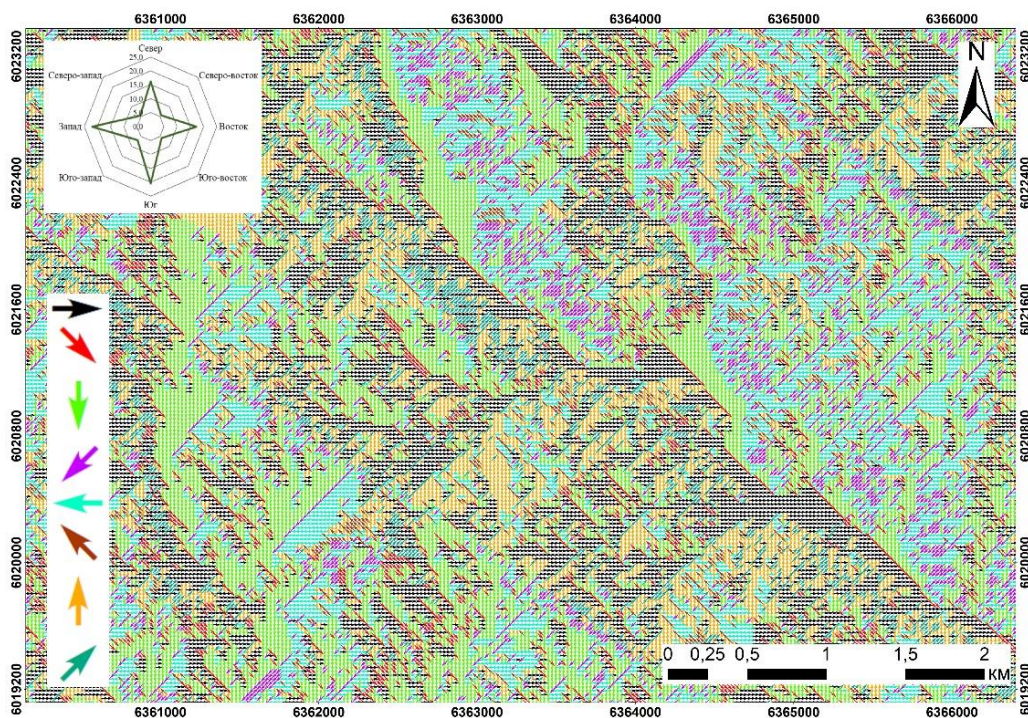


Рис. 2. Фрагмент растрового изображения территории Горецкого района с отображением направления поверхностного стока (на диаграмме-вкладке указан % стока в направлении каждого румба от общей территории; расчет выполнен для ячеек растра с пространственным разрешением 30 м)

Установлено, что в пределах Горецкого района преобладающими направлениями стока являются восточное и южное – 22 % и 20,4 % соответственно. Указанные направления совпадают с направлением тока основных рек, составляющих гидрологический каркас территории (реки Проня, Бася, Гольша, Быстрая, Реместлянка). Минимальные объемы стока аккумулируются в северо-западном и северо-восточном направлениях.

Коэффициент компактности (C_c) территории прямо пропорционален величине риска проявления эрозии: более низкие его значения свидетельствуют о меньшей эрозионной уязвимости, в то время как более высокие значения свидетельствуют о высокой эрозионной опасности и необходимости осуществления неотложных противоэрозионных мероприятий [12]. Для исследуемой территории данный показатель составляет 1,72. Длина водотоков на поверхности (L_g) характеризует степень уязвимости поверхности в случае возникновения неблагоприятных метеорологических явлений. Величина данного показателя 0,20 свидетельствует о том, что территория Горецкого района может быть уязвима к внезапным наводнениям во время экстремальных метеорологических явлений.

Рельефные аспекты анализа территории имеют непосредственную связь с изучением ее площади, объема и высоты, используемых для анализа различных гидрогеологических характеристик. Среди параметров, относящихся к аспектам рельефа, определялись амплитуда колебаний высот, коэффициент рельефа и коэффициент устойчивости территории. Рельеф бассейна (R_h) и коэффициент его устойчивости (R_n) являются важными параметрами, необходимыми для понимания геоморфологических процессов и общей характеристики рельефа. Высокие значения данных коэффициентов указывают на наличие крутых склонов и повышенных элементов рельефа. Для Горецкого района значения R_h и R_n являются низкими и составляют 0,0103 и 0,20 соответственно, свидетельствуя об относительно низких объемах поверхностного стока с территории и отсутствии очень крутых склонов в ее пределах.

Следует отметить, что результаты расчета морфометрических параметров полностью соотносятся с результатами, полученными при определении количественных показателей плоскостной и линейной эрозии – индекса мощности линейной эрозии (SPI) и фактора эрозионного потенциала рельефа (LSF), показателя гидроморфности почвенного покрова – топографического индекса влажности (TWI), а также индекса устойчивости местности (TRI) (рис. 3, табл. 2).

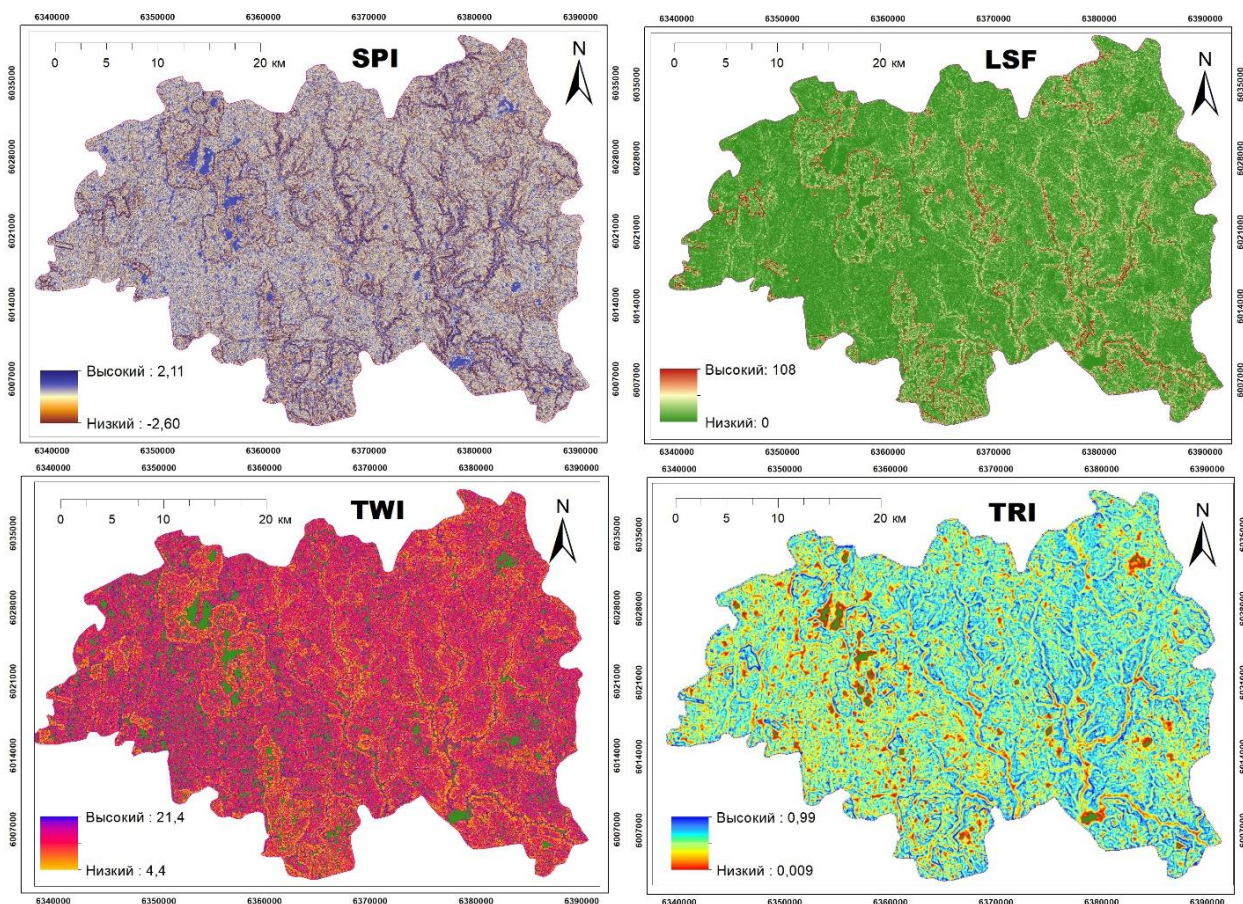


Рис. 3. Количественные показатели эрозионного потенциала рельефа и гидроморфности почвенного покрова Горецкого района, рассчитанные по данным SRTM

Плоскостной смыв представляет собой смыв верхних горизонтов почвы при стекании дождевых и талых вод, образующих при движении сеть мелких струйчатых промоин и рытвин. Плоскостная эрозия малозаметна визуально, однако приводит к катастрофическим последствиям вследствие масштабы проявления, вызывая потерю гумусового горизонта и приводя к значительному снижению плодородия почв. Для оценки наличия топографических предпосылок к развитию плоскостного смыва используется индекс LSF (Length Steepness Factor), характеризующий влияние рельефа на процессы плоскостной эрозии, величина которого рассчитывается по формуле (1) [14]:

$$LSF = (m + 1) * (A/22,13)^m * (\sin\beta/0,0896)^n, \quad (1)$$

где A – удельная водосборная площадь; β – угол наклона земной поверхности; m и n – эмпирические коэффициенты.

Определение данного показателя важно также и вследствие того, что он является одним из шести составляющих универсального уравнения потерь почвы (USLE) и его модернизированной версии (RUSLE) – наиболее часто используемой модели оценки риска эрозии почвы [15]. В табл. 2 представлен результат расчета потенциала плоскостного смыва для территории Горецкого района, позволяющий получить наглядное представление о характере развития данного процесса и разработать мероприятия по предотвращению деградации земельных ресурсов на перспективу. Коэффициент вариации величины индекса LSF колеблется от 0,1 до 4,4 и свидетельствует о его неоднородности в пределах исследуемой территории. Установлено, что около 88 % территории района по величине потенциала плоскостного смыва характеризуется отсутствием проявления данного фактора, 11 % имеет незначительные проявления, а для 1 % территории отмечено наличие высокого потенциала развития и значимых проявлений плоскостной эрозии.

Таблица 2. Распределение значений морфометрических индексов на территории Горецкого района

Морфометрический индекс	Площадь с соответствующим значением индекса (в % от общей площади)			Статистические характеристики значения индекса			
	низкое	среднее	высокое	min	max	mean	Sd
LSF	87,8	11,1	1,1	0,08	24,93	1,63	1,69
SPI	15,11	59,5	25,4	-1,02	0,57	-0,05	0,16
TWI	29,9	45,1	25,0	4,49	21,38	8,41	0,61
TRI	8,7	39,5	51,8	0,25	0,73	0,49	0,09

Оценка степени проявления линейной эрозии с использованием данных дистанционного зондирования основана на расчете индекса мощности потока SPI (Stream Power Index), определяемого по формуле (2) [16]:

$$SPI = A * \tan(\beta), \quad (2)$$

где A – удельная водосборная площадь, β – угол наклона земной поверхности.

Необходимо отметить, что наличие подобной информации позволяет оценить вероятность и направление развития негативных ландшафтных процессов, связанных с интенсификацией водноэрозионных процессов, и осуществить противоэрозионные мероприятия. Индекс мощности потока описывает потенциальную эрозию водного потока в данной точке топографической поверхности. По мере увеличения площади водосбора и уклона территории количество воды, вносимой участками подъема, и скорость водного потока увеличиваются, следовательно, увеличиваются индекс мощности потока и риск проявления линейной эрозии. На рис. 3 развитие линейной эрозии отображается по следующим грациям: низкий потенциал развития, средний потенциал развития, высокий потенциал развития. Установлено, что 25% территории Горецкого района имеет высокий риск развития линейной эрозии, следовательно, его территорию можно отнести к сильно эродированной. Основной причиной проявления и интенсификации линейной эрозии является почвенно-антропогенный фактор. Почвы, сформированные на лессовых и лессовидных породах, занимают более 50 % от общей площади пахотных земель района, а высокое потенциальное плодородие этих почв обусловило их интенсивное сельскохозяйственное использование, играющее ведущую роль при формировании водноэрозионных процессов. Кроме того, лессовидные почвообразующие породы имеют низкую противоэрозионную устойчивость (в 1,4–1,7 раза меньше, чем у моренных суглинков) [1].

Эффективное управление водными и земельными ресурсами требует осуществления точного прогнозирования и понимания пространственного распределения влажности в пределах землепользования. Топографический индекс влажности (TWI) позволяет оценить геоморфологические предпосылки для развития процесса переувлажнения земель и учесть данный фактор при планировании агромероприятий и размещении сельскохозяйственных культур на полугидроморфных и гидроморфных почвах. TWI (Topographic Wetness Index) отображает потенциальную влажность водосбора и представляет собой натуральный логарифм отношения дренажной площади к тангенсу крутизны склона (3) [17]:

$$TWI = \ln[A/\tan(\beta)], \quad (3)$$

где A – удельная водосборная площадь, β – топографический градиент.

На полученном растровом изображении (рис. 3) ячейки с более низким значением индекса TWI представляют области с самым крутым уклоном, а более высокие значения ячеек представляют области с повышенным накоплением влаги в почве. Однако следует отметить, что отсутствует унифицированная шкала градации значений TWI, а конкретные величины данного индекса, указывающие на влажные почвы, довольно существенно различаются в зависимости от типа ландшафта и климата

территории, на что указывается и в исследованиях [18]. Топографический индекс влажности тесно коррелирует с реальным распределением влажности почвы в пределах водосборов с пересеченным рельефом, однако мало информативен на плоском ландшафте из-за зависимости от сезонных колебаний влажности и таких не топографических переменных, как свойства почвы, тип землепользования, характер растительности, степень насыщения влагой и эвапотранспирация. Установлено, что более 70% территории Горецкого района имеет как возвышенные, так и пониженные участки потенциального переувлажнения (табл. 2). Информация о влиянии рельефа на особенности распределения влаги представляет существенный интерес, поскольку позволяет выделить участки потенциального переувлажнения почв и вымокания посевов сельскохозяйственных культур.

Индекс устойчивости местности TRI (Terrain Ruggedness Index) является одним из основных факторов, влияющих на энергию потока, емкость поверхностного накопления влаги, скорость стока и маршрутизацию в масштабе водосбора, и выражает величину перепада высот между соседними ячейками в растре (4) [19]:

$$TRI = Y [\sum(x_{ij} - x_{00})^2]^{1/2}, \quad 4)$$

x_{ij} – перепад высот между каждой из соседних ячеек раstra.

Согласно классификации, разработанной авторами данного индекса для сети с разрешением в 1 км, и приведенной в работе [20], величина TRI (м) от 0 до 80 соответствует ровной поверхности местности; 81–116 – почти ровной поверхности; 117–161 – слегка устойчивой поверхности; 162–239 – поверхности средней степени устойчивости; 240–497 – умеренно устойчивой поверхности; 498–958 – высокоустойчивой и 959–4367 – чрезвычайно устойчивой поверхности. Для территории Беларуси средняя величина данного показателя, определенная по состоянию на 1996 г. и приведенная в работе [21], составляет 16,4 м, тогда как для территории Горецкого района в разрезе идентифицированных водосборных бассейнов она колеблется в пределах от 0,25 до 0,73 м.

Заключение

Результаты выполненных исследований дают основания для следующих выводов: 1) комплексный геоморфометрический анализ с использованием функциональных возможностей геоинформационных систем целесообразно использовать при проведении оперативной и эффективной оценки критических свойств рельефа для целей прогнозирования использования земель и функционального зонирования территории на региональном уровне, а также для выполнения мероприятий в рамках межхозяйственного землеустройства; 2) цифровая модель рельефа, полученная по данным радарной топографической съемки методом радарной интерферометрии с пространственным разрешением 30 м, пригодна для получения информации об общих топографических особенностях территории и выявления потенциальной деградации земельных ресурсов на региональном уровне и позволяет рассчитать количественные показатели эрозионного потенциала рельефа и гидроморфности почвенного покрова; 3) информация, получаемая в результате анализа цифровой модели рельефа методами дифференциальной геометрии, позволяет оптимизировать структуру сельскохозяйственного землепользования, установить наличие, оценить масштаб проявления и разработать прогноз развития деградации сельскохозяйственных земель, а также может использоваться при проектировании новых и реконструкции существующих осушительно-увлажнительных мелиоративных систем.

Дальнейшие исследования следует сосредоточить в направлении возможности использования данных радарной топографической съемки для идентификации и комплексного геоморфометрического анализа отдельных осушительно-увлажнительных мелиоративных систем с целью оценки эффективности их функционирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дуброва, Ю. Н. Комплексный морфометрический анализ территории Горецкого района с использованием данных дистанционного зондирования Земли / Ю. Н. Дуброва, Т. Н. Мыслыва, Т. Н. Ткачева // Мелиорация. – 2020. – №3(93). – С. 43–54.
2. Дамшевич, А. Возможности использования цифровой модели рельефа для изучения влияния морфометрических показателей на влажность почв / А. Дамшевич // Земля Беларуси. – 2017. – №1. – С. 42–45.
3. Михайлов, В. А. Комплексный морфометрический анализ Тарханкутского полуострова с помощью ГИС / В. А. Михайлов // Современные научные исследования и инновации. – 2015. – № 2. – Ч. 4 [Электронный ресурс]. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2015/02/46640>.
4. Kumar, A. Morphometric analysis of six sub-watersheds in the central zone of Narmada River / A. Kumar, S. K. Samuel, V. Vyas // Arabian Journal of Geosciences. – 2015. – Vol. 8. P. 5685–5712.
5. Погорелов, А. В. Морфометрия рельефа бассейна реки Кубани: некоторые результаты цифрового моделирования / А. В. Погорелов, Ж. А. Думит // Географические исследования Краснодарского края. – Вып. 2. – 2007. – С. 7–23.
6. Arulbalaji, P. Geospatial tool-based morphometric analysis using SRTM data in Sarabanga Watershed, Cauvery River, Salem district, Tamil Nadu, India / P. Arulbalaji, B. Gurugnanam // Applied Water Science. – 2017. – Vol. 7. – P. 3875–3883.

7. Sreedevi, P. D. The significance of morphometric analysis for obtaining groundwater potential zones in a structurally controlled terrain / P. D. Sreedevi, K. Subrahmanyam, A. Shakeel // *Environmental Geology*. – 2005. – Vol. 47(3). – P. 412–420.
8. Manjare, B. Prioritization of sub-watersheds of Chandrabhaga river from Purna river basin, Maharashtra using geospatial techniques / B. Manjare, S. Paunikar, J. Shrivatra // *Journal of Geosciences Research*. – 2019. – №2. – P. 111–120.
9. Полякова, Е. В. Морфометрический анализ рельефа острова Вайгач по данным дистанционного зондирования Земли / Е. В. Полякова, М. Ю. Гофаров // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2014. – Т. 11. – № 1. – С. 226–234.
10. Шарапов, С. В. Морфологический анализ рельефа при экологических изысканиях на объектах подземного хранения газа / С. В. Шарапов // *Вестник Московского университета*. – 2010. – №1. – Серия 5. География. – С. 28–34.
11. Waikar, M. L. Morphometric analysis of a drainage basin using geographical information system: a case study / M. L. Waikar, A. P. Nilawar // *International Journal of Multidisciplinary and Current Research*. – 2014. – Vol. 2. – P. 179–184.
12. Strahler, A. N. Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks / A. N. Strahler / In: V.T. Chow (Ed.), *Handbook of Applied Hydrology*. McGraw Hill Book Company, New York, 1964. – Section 4-11. – P. 439.
13. Analysis of drainage morphometry and watershed prioritization in Bandu Watershed, Purulia, West Bengal through remote sensing and GIS technology: a case study / Das A., Mondal M., Das B., Ghosh A. R. // *International Journal of Geomatics and Geosciences*. – 2012. – Vol. 2(4). – P. 995–1013.
14. Desmet, P. J. J. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units / P. J. J. Desmet, G. Govers // *Journal of Soil and Water Conservation*. – 1996. – Vol. 51 (5). – P. 427–433.
15. Panagos, P. A new european slope length and steepness factor (LS-Factor) for modeling soil erosion by water / P. Panagos, P. Borrelli, K. Meusburger // *Geosciences*. – 2015. – Vol. 5. – P. 117–126.
16. Moore, I. D. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications / I. D. Moore, R. B. Grayson, A. R. Ladson // *Hydrological Processes*. – 1991. – Vol. 5. – P. 3–30.
17. Глотов, А. А. Применение данных о рельефе для эффективного использования сельскохозяйственных земель / А. А. Глотов // *Совзонд*. – 2013. – № 4. – С. 20–22.
18. TWI computation: a comparison of different open source GISs / P. Mattivi, F. Franci, A. Lambertini, B. Gabriele // *Open Geospatial Data, Software and Standards*. – 2019. – Vol. 4:6. P. 2–12.
19. Riley, S. J., S. A terrain ruggedness index that quantifies topographic heterogeneity, / S. J., S. Riley, D. DeGloria, R. Elliot // *Intermountain Journal of Sciences*. – 1999. – Vol. 5. – P. 1–4.
20. Geomorphometric analysis of raster image data to detect terrain ruggedness and drainage density / M. Moreno, S. Levachkine, M. Torres, R. Quintero // *Lecture Notes in Computer Science*. – 2003. – Vol. 2905. – P. 643–650.
21. Nunn, N. Ruggedness: The blessing of bad geography in Africa / N. Nunn, D. Puga // *Review of Economics and Statistics*. – 2012. – Vol. 94, № 1. – P. 20–36.