

КОМПЛЕКСНЫЙ МОРФОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕРРИТОРИИ ГОРЕЦКОГО РАЙОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Ю. Н. Дуброва, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент

Т. Н. Мыслыва, доктор сельскохозяйственных наук, доцент

Т. Н. Ткачева, старший преподаватель

УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия»,
г. Горки, Беларусь

Аннотация

Впервые для территории Горецкого р-на Могилевской обл. по данным гидрологически корректной цифровой модели рельефа выполнен комплекс картометрических и морфометрических расчетов, а также построены карты эрозионной сети из элементов 1-4 порядков и густоты горизонтального расчленения рельефа. В качестве исходных использовались данные радарной топографической съемки SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) с пространственным разрешением 1 угловая секунда (30 м). Комплексный морфометрический анализ цифровой модели рельефа выполнялся с использованием функциональных возможностей набора инструментов «Пространственный анализ» и «Гидрология» ArcGIS версии 10.3. Были идентифицированы тальвеги четырех порядков с общей длиной 508,21 км; при этом на тальвеги 1-го порядка приходится 54,2 % суммарной длины, а на суммарную длину тальвегов 1–2 порядков – 79 % общей длины. Средняя длина тальвегов колеблется в пределах от 0,59 до 1,91 км, а распределение длин разнопорядковых тальвегов подчиняется обратному экспоненциальному закону. Соотношение длин тальвегов колеблется от 0,17 до 0,73, достигая максимального значения для водотоков 2-го порядка, а преобладание среди идентифицированных водотоков тальвегов 1–2 порядков свидетельствует о развитии водноэрозионных процессов в пределах исследуемой территории. По результатам выполнения кросс-валидации наиболее пригодным для целей прогнозирования пространственного распределения степени горизонтального расчленения рельефа оказался метод эмпирического байесовского кригинга, в результате применения которого была получена поверхность, минимальная величина горизонтального расчленения рельефа которой составляет 1,89 км/км², а максимальная – 3,45 км/км². Модель автоматизации процесса выполнения морфометрического анализа рельефа с использованием функциональных возможностей приложения *ModelBuilder ArcGIS* может быть использована для оптимизации процесса межхозяйственного землеустройства территории и планирования мелиоративных мероприятий.

Ключевые слова: SRTM, рельеф, эрозия, анализ, моделирование.

Abstract

Yu. N. Dubrova, T. N. Myslyva, T. N. Tkacheva

INTEGRATED MORPHOMETRIC ANALYSIS OF THE TERRITORY OF GORKY DISTRICT USING REMOTE SENSING DATA

For the first time, for the territory of the Gorky district of the Mogilev region, according to the hydrologically correct digital elevation model, a complex of cartometric and morphometric calculations was performed, as well as maps of the erosion network from elements of 1-4 orders and the density of horizontal dissection of the relief were constructed. Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) data with a spatial resolution of 1 arc second (30 m) were used as the source data. Comprehensive morphometric analysis of the digital elevation model was performed using the functionality of spatial analysis and hydrology toolkit the ArcGIS version 10.3. The streams of four orders with a total length of 508.21 km were identified during the analysis. At the same time, 54.2% of the total length falls on the first order streams, and 79 % – on the total length of the streams of 1-2 orders. The average length of the streams ranges from 0.59 to 1.91 km, and the distribution of the lengths of different-order streams obeys the inverse exponential law. The ratio of the lengths of the streams ranges from 0.17 to 0.73, reaching a maximum value for second order watercourses. The predominance the streams of 1–2 orders of magnitude indicates the development of water erosion processes within the study area. According to the results of cross-validation, the method of empirical Bayesian kriging turned out to be the most suitable for the purposes of predicting the spatial distribution of the degree of horizontal dissection of the relief. As a result of the application of this method, a surface was obtained with a minimum horizontal fragmentation of the relief of 1.89 km/km² and a maximum of 3.45 km/km². The automation model for the process of morphometric analysis of the relief using the functionality of the ModelBuilder ArcGIS application can be used to optimize the process of inter-farm land management and planning of land reclamation measures.

Keywords: SRTM, relief, erosion, analysis, modeling.

Введение

Для повышения эффективности использования земельных ресурсов и выполнения землеустроительных и мелиоративных работ целесообразно применять функциональные возможности современных геоинформационных систем. В частности, используя информацию о результатах дистанционного зондирования Земли, находящуюся в свободном доступе в открытых источниках, и выполнив ее преобразование в ГИС-среде, можно получить объективные и актуальные данные о состоянии той или иной территории, не прибегая к выполнению дорогостоящих наземных изысканий [1, 2]. К такой информации относятся, в частности, цифровые модели рельефа, полученные по данным радарной топографической съемки.

Более того, рельеф является одним из ведущих факторов формирования ландшафтов и важнейшей составляющей почвообразования, оказывая наибольшее влияние на локальное разнообразие почвенного покрова, а изучение его структурно-геоморфологических особенностей – неотъемлемая часть региональных исследований при агроэкологической оценке земель [3]. Одной из основ изучения рельефа любой территории считается морфометрический анализ, обеспечивающий более объективную и комплексную его оценку: он исключительно важен при комплексном изучении и картографировании эрозионных процессов, почвенного покрова, растительно-

сти, прогнозировании и ландшафтном планировании [4, 5].

Количественный анализ поверхности и морфометрических особенностей рельефа территории Беларуси в целом и Горецкого р-на в частности выполнялись преимущественно консервативными методами. Более прогрессивный и информативный метод исследования рельефа – 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, на что, в частности, указывается и в работе [6], а следовательно, требуют более детального изучения.

Цель исследований: 1) определение основных морфометрических характеристик рельефа и выполнение комплексного морфометрического анализа территории Горецкого р-на Могилевской обл.; 2) создание модели для автоматизации процесса определения морфометрического анализа рельефа с использованием функциональных возможностей приложения *Model Builder ArcGIS*.

Основная часть

Для построения производных цифровой модели рельефа (далее – ЦМР) использовалась 4-я 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* [6]. 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 1×1 градус, что при максимальном доступном разрешении и обрезке

по векторной маске представляет собой матрицу 2201×1599 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. Морфометрический анализ ЦМР выполнялся с использованием функциональных возможностей набора инструментов «Пространственный анализ» и «Гидрология»

ArcGIS версии 10.3. Геоинформационная модель для автоматизации морфометрического анализа, извлечения системы водотоков и определения величины горизонтального расчленения рельефа была построена с использованием модуля *Model Builder*. 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. На рис. 1 а представлена цифровая модель рельефа территории Горьковского р-на после выполнения корректирования. Отметим, что на врезке рис. 1 а показан фрагмент с разбивкой на учетные квадраты со стороной 1 км.

Для моделирования эрозионной сети, определения порядка тальвегов по методике Стралера – Философова [6] и построения соответствующего картографического изображения входной грид рельефа обрабатывался с применением функционала набора инструментов «Гидрология» гидрологическими функциями «Заполнение», «Направление стока», «Суммарный сток», «Идентификация водотоков», «Порядок водотоков» (рис. 1 б). По данным SRTM была построена гипсографическая кривая территории Горьковского р-на, согласно данным которой, средняя высота территории равна 196,16 м, а среднее квадратическое отклонение – 12,96 м (рис. 1 в). Морфометрические характеристики территории были рассчитаны с учетом трех аспектов: линейного, площадного и рельефного (табл. 1).

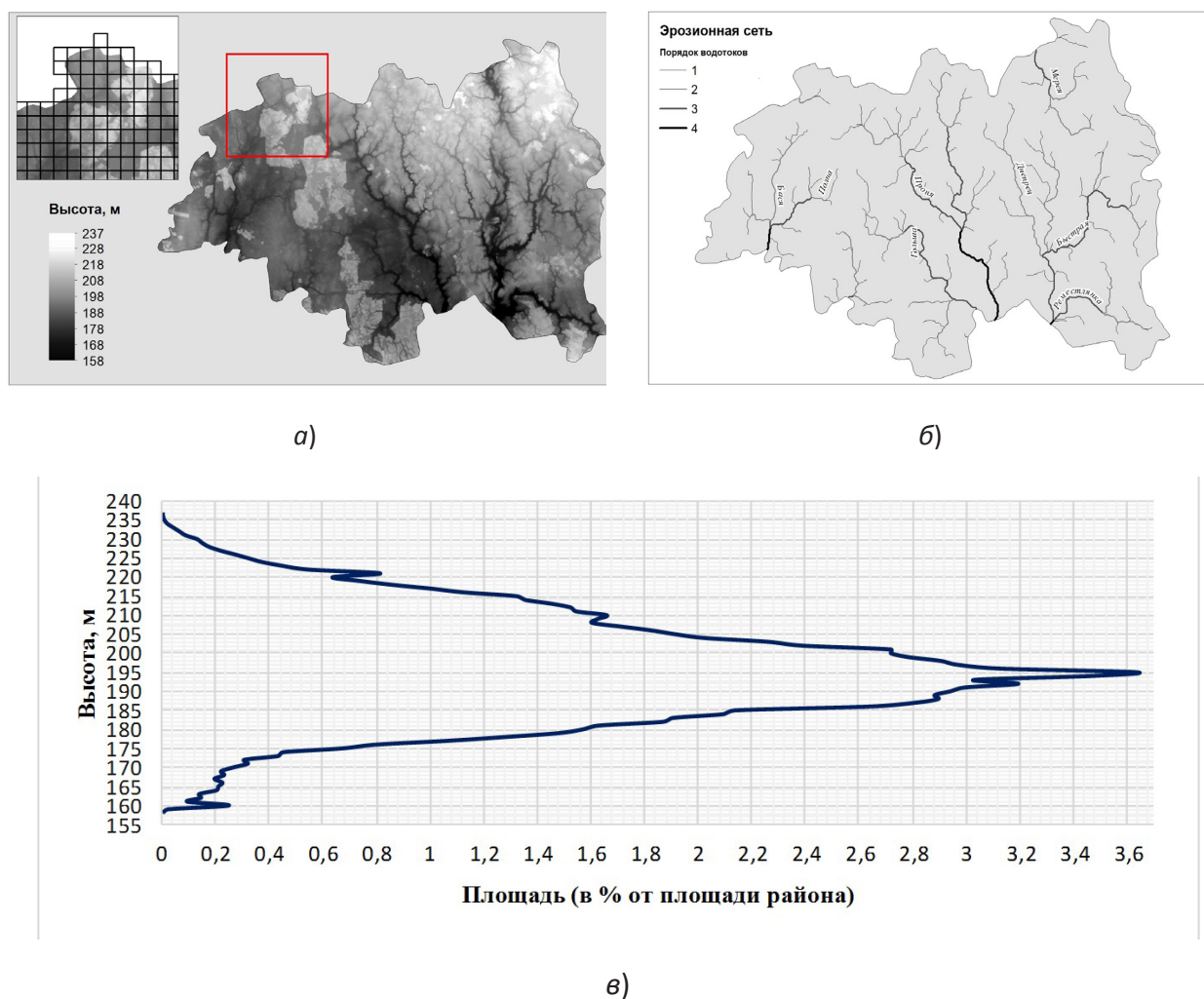


Рис. 1. Цифровая модель рельефа (ЦМР) - а; эрозионная сеть - б; гипсографическая кривая территории Горьковского р-на, полученная по данным ЦМР, - в.

Таблица 1. Результаты расчета морфометрических параметров рельефа территории Горьковского р-на

Название параметра	Символ	Формула расчета параметра	Рассчитанное значение параметра	Источник информации расчетных зависимостей
Линейные аспекты				
Площадь территории, км ²	A	Общая площадь территории	1289,69	[2, 7, 8]
Длина бассейна, км	L_b	$L_b = 1,312 \cdot A^{0,568}$, где A – площадь территории, км ²	76,68	[2, 7, 9]
Периметр бассейна, км	P	Внешняя граница территории	219,29	[2, 7, 9]
Порядок тальвегов	U	Иерархический ранг	4	[7, 8, 10]
Длина тальвегов, км	L_u	Длина тальвегов каждого порядка	1 – 275,54; 2 – 125,87; 3 – 91,49; 4 – 15,31	[2, 7, 11]
Количество тальвегов, шт	N_u	Количество тальвегов каждого порядка	1 – 270; 2 – 188; 3 – 156; 4 – 8	[2, 7, 12]
Средняя длина тальвегов каждого порядка, км	L_{sm}	$L_{sm} = L_u / N_u$	1 – 1,02; 2 – 0,67; 3 – 0,59; 4 – 1,91	[2, 8, 10]
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 – 0,73; 3 – 0,17	[2, 10, 11]
Коэффициент бифуркации	R_b	$R_b = N_u / N_{u-1}$, где N_{u-1} – общее количество тальвегов следующего высшего порядка	1/2 – 1,44; 2/3 – 1,21; 3/4 – 19,5	[2, 8, 10]
Средний коэффициент бифуркации	R_{bm}	Средний уровень бифуркации тальвегов всех порядков	7,383	[2, 8, 10]
Площадные аспекты				
Плотность водосборной сети, км/км ²	D_d	$D_d = L_u / A$, где L_u – общая длина тальвегов	0,39	[8, 10, 13]
Текстура водосборной сети, шт/км	R_t	$R_t = N_u / P$, где N_u – общее количество тальвегов	2,84	[2, 10]
Частота водосборной сети, шт/км ²	F_s	$F_s = N_u / A$	0,48	[2, 10, 11]
Коэффициент удлинения	R_e	$R_e = 2 \cdot \sqrt{(A/\pi)} / L_b$	0,53	[2, 9, 10]

Продолжение Таблицы 1.

Коэффициент округлости	R_c	$R_c = (4 \cdot \pi \cdot A)/P^2$	0,34	[2, 10, 14]
Коэффициент формы водосбора	R_f	$R_f = A/L_b^2$	0,22	[2, 10, 11]
Коэффициент вытянутости водосбора	B_s	$B_s = L_b^2/A$	4,56	[2, 10, 11]
Коэффициент компактности	C_c	$C_c = 0,2821 \cdot P/A^{0,5}$	1,72	[10, 11]
Длина водотоков на поверхности	L_g	$L_g = \frac{1}{2} D_d$	0,20	[10, 11]
Коэффициент инфильтрации	I_f	$I_f = D_d \cdot F_c$	0,19	[2, 10]
Аспекты рельефа				
Амплитуда колебаний высот, м	B_h	Вертикальное расстояние между самой высокой и самой низкой точкой	79	[2, 9, 10]
Коэффициент рельефа	R_h	$R_h = B_h/L_b$	0,0103	[2, 9, 10]
Коэффициент устойчивости рельефа	R_n	$R_n = B_h/D_d$	0,20	[2, 8, 10]

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 508,21 км; при этом на тальвеги 1-го порядка приходится 54,2 % суммарной длины, а на суммарную длину тальвегов 1–2 порядков – 79 % общей длины. Средняя длина тальвегов колеблется в пределах от 0,59 км до 1,91 км, а распределение длин разнопорядковых тальвегов подчиняется обратному экспоненциальному закону. Соотношение длин тальвегов колеблется от 0,17 до 0,73, достигая максимального значения для водотоков 2-го порядка. Преобладание среди идентифицированных водотоков тальвегов 1–2-го порядков свидетельствует о развитии водноэрозионных процессов в пределах исследуемой территории. Коэффициент бифуркации определяется как отношение количества сегментов водотока заданного порядка к

числу сегментов водотока следующего, более высокого порядка [2, 9]. Он характеризует степень близости структуры водотоков к древовидной [15, 16]. Низкие значения величины R_b характерны для структурно менее нарушенных бассейнов без каких-либо искажений в системе водотоков и для территории Горецкого р-на приурочены к водотокам 2-го порядка.

В качестве параметров ареального аспекта были рассмотрены 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 и зависящих от климата, типа горных пород, рельефа, емкости инфильтрации, типа растительного покрова и коэффициента шероховатости подстилающей поверхности. Низкое значение данного показателя свидетельствует о том, что поверхность исследуемой территории представлена водопроницаемыми породами и покрыта густым растительным покровом, а рельеф

имеет равнинный характер. О достаточной водопроницаемости подстилающих пород свидетельствует и величина коэффициента инфильтрации (I_f), 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 [2]: <2 – очень грубая; 2–4 – грубая; 4–6 – умеренная; 6–8 – нормальная; >8 – тонкая текстура. Чем больше значение текстуры водосборной сети, тем больше степень расчленения рельефа. Текстура исследуемой территории составляет 2,84 и, согласно приведенной классификации, относится к грубой. Частота водосборной сети (F_s) имеет положительную корреляцию с ее плотностью, а ее высокие значения связаны с наличием слабопроницаемой подстилающей поверхности, редкой растительности, высотного рельефа и низкой инфильтрационной способности [17].

Для территории Горещкого р-на значение данного показателя составляет 0,48. Коэффициент удлинения (R_e) связан с наличием высоких форм рельефа и крутых наземных склонов: чем ближе значения R_e к 1, тем ниже формы рельефа и крутизна склонов. Величина данного показателя подразделяется на три класса [8]: >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 [18]. Величина данного показателя для Горещкого р-на 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. Коэффициент компактности (C_c) прямо пропорционален величине риска проявления эрозии: более низкие его значения свидетельствуют о меньшей эрозионной уязвимости территории, в то время как более высокие значения свидетельствуют о

высокой эрозионной опасности и необходимости осуществления неотложных противоэрозионных мероприятий [10]. 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 показывает, что территория Горещкого р-на 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) – важные параметры, необходимые для понимания геоморфологических процессов и общей характеристики рельефа. Высокие значения данных коэффициентов указывают на наличие крутых склонов и повышенных элементов рельефа. Для Горещкого р-на 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 крутизна склона – угол между горизонтальной и тангенциальной плоскостями в определяемой точке земной поверхности – одна из важнейших морфометрических характеристик, непосредственно влияющих как на состояние, так и на характер использования территории [3]. Результатом вычислений уклона является грид-модель, определяющая скорость максимального изменения значений высоты для каждой ячейки поверхности растра. Гриды представляют собой поверхность по регулярно распределенным точкам, а их структура полностью соответствует структуре непрерывных растровых данных. Крутизна склона определяет скорость потоков, перемещающихся вдоль земной поверхности под действием гравитации. Согласно классификации Н. И. Николаева, все склоны делят на очень

крутые ($>35^\circ$), крутые ($15-35^\circ$), склоны средней крутизны ($8-15^\circ$), пологие ($4-8^\circ$), очень пологие ($2-4^\circ$). При углах наклона менее 2° поверхности не относятся к склонам [19]. Наименее пересяченной является западная часть территории Горецкого р-на, тогда как остальная территория района характеризуется наличием склонов кру-

тизной от 3–6 до 15 и более градусов. Вычисление площадей склонов различной крутизны позволило определить площадь эрозионно-опасных земель с крутизной склона выше 3° , которая составила $565,57 \text{ км}^2$, или 43,85 % от общей площади территории района (табл. 2).

Таблица 2. Распределение территории Горецкого р-на по показателю крутизны склонов

Крутизна склонов, град	Площадь территории, км ²	% от общей площади района	Характер склонов
0–3	724,12	56,15	очень пологие
3–6	419,60	32,53	пологие
6–9	144,92	11,24	средней крутизны
9–12	0,10	0,008	
12–15	0,80	0,062	
15–18	0,14	0,011	крутые
18–21	0,01	0,001	

Следует отметить, что поскольку общая площадь эродированных земель в пределах Горецкого р-на превышает 20 %, его территорию можно отнести к сильно эродированной. Главной причиной возникновения эрозии является почвенно-антропогенный фактор, чему способствует характер преобладающих почвообразующих пород. В пределах пахотных земель почвы, сформированные на лессовых и лессовидных породах, занимают более 50 %, а высокое потенциальное плодородие этих почв обусловило их интенсивное сельскохозяйственное освоение, что играет ведущую роль при формировании водно-эрозионных процессов. Кроме того, лессовидные почвообразующие породы имеют низкую противоэрозионную устойчивость (в 1,4–1,7 раза меньше, чем у моренных суглинков).

Густота горизонтального расчленения рельефа территории Горецкого р-на оценивалась по показателю длины тальвегов (водотоков) эрозионных форм на единицу площади, км/км² [20]. Для выполнения автоматизированного расчета величины горизонтального расчленения рельефа, а также определения других его морфометрических характеристик была разработана геоинформационная модель, в которой реализован функционал наборов инструментов «Анализ», «Инструменты пространственного анализа» и «Управление данными». Исходны-

ми данными в модели выступали SRTM, шейп-файл с административной границей Горецкого р-на, а также векторный полигональный слой, представляющий собой сеть квадратов размером $1 \times 1 \text{ км}$ и покрывающий всю территорию исследований (всего 1412 квадратов).

Созданная модель структурно состоит из 3 исходных параметров, 21 процесса и 23 результирующих растровых слоев, векторных слоев и таблиц (рис. 2). Использование модели позволяет ускорить процесс анализа более чем в 30 раз по сравнению с процессом анализа, выполняемого посредством последовательного применения отдельных инструментов.

Полученный в результате применения геоинформационной модели точечный слой пространственных объектов преобразовывался в грид-модель посредством интерполяции с применением детерминированных и геостатистических методов. Среди детерминированных методов, использующих для прогноза абсолютные значения данных, применялся метод обратных взвешенных расстояний (IDW) и метод радиальных базисных функций (RBF). Среди геостатистических методов, использующих для прогноза значений статистические характеристики показателей, рассматривались простой кригинг (SK) и эмпирический байесовский кригинг (ЕВК) (рис. 3).

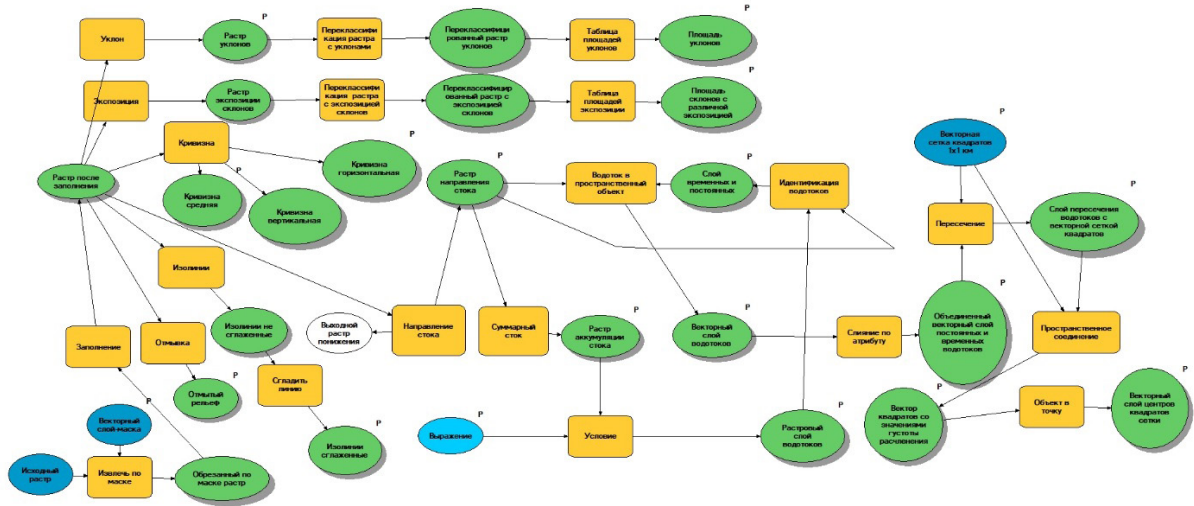


Рис. 2. Геоинформационная модель для автоматизации морфометрического анализа, извлечения системы водотоков и определения величины горизонтального расчленения рельефа

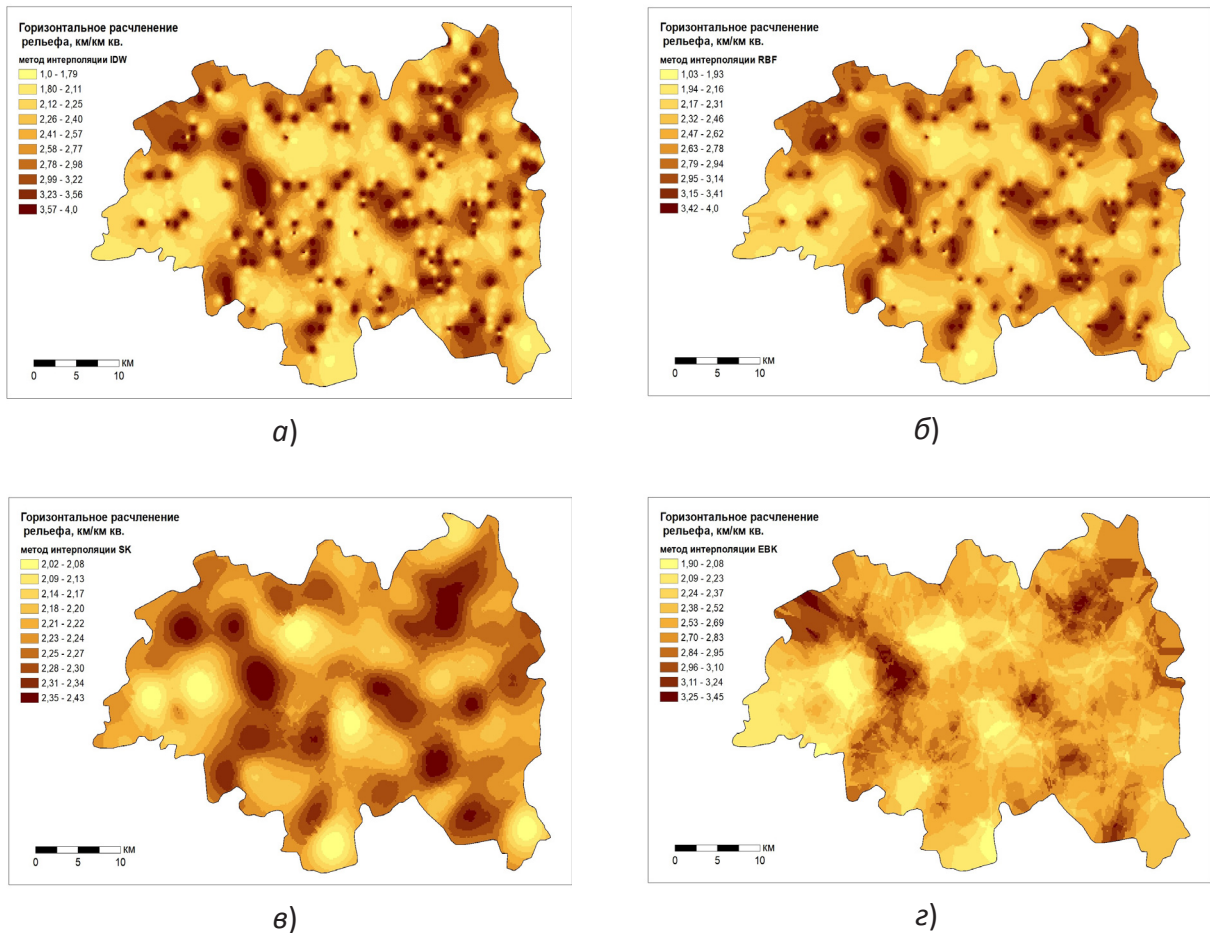


Рис. 3. Грид-модели горизонтального расчленение рельефа территории Горецкого р-на

При применении интерполяции по методу обратных взвешенных расстояний получена поверхность, редуцированная на 10 классов, минимальная величина горизонтального расчленения рельефа которой составляет 1,0 км/км², а максимальная – 3,99 км/км² (табл. 2). Метод интерполяции IDW целесообразнее всего применять при наличии достаточно плотного набора данных, отобранных по регулярной сети, что не выполнено в нашем случае, поскольку точечный слой со значениями густоты расчленения рельефа создавался

по значениям точек пересечения водотоков с векторной сеткой квадратов. Несмотря на то что в отдельных работах интерполяцию по методу обратных взвешенных расстояний предлагается использовать для выполнения пространственного моделирования густоты горизонтального расчленения рельефа [20, 21], мы не рекомендуем применять данный метод для подобной цели, что подтверждают и результаты кросс-валидации грид-моделей (табл. 3).

Таблица 3. Статистические параметры и результаты кросс-валидации грид-моделей интенсивности горизонтального расчленения рельефа на территории Горецкого р-на, км/км²

Статистическая характеристика	Метод интерполяции			
	IDW	RBF	SK	EBK
минимальное значение	1,00	1,03	2,02	1,89
максимальное значение	3,99	4,00	2,43	3,45
среднее значение	2,58	2,58	2,23	2,58
среднеквадратическое отклонение	0,40	0,32	4,93	0,28
средняя ошибка интерполяции, ME	- 0,04108	- 0,00748	- 0,02148	0,00413
среднеквадратическая ошибка интерполяции, RMSE	0,976	0,973	0,925	0,935

Использование интерполяции по методу радиальных базисных функций позволило получить поверхность с колебанием величины горизонтального расчленения от 1,03 до 4,0 км/км². Интерполяция по методу RBF приближается к построению поверхности по измеренным значениям, минимизируя ее общую кривизну; она неэффективна, когда происходит резкое изменение значений на коротких расстояниях [22]. Кроме того, несмотря на то что данный метод, как и IDW, является жестким интерполятором, с его помощью возможно прогнозировать значения выше максимальных и ниже минимальных измеренных значений, на что указывают и сведения, приведенные в табл. 3. В связи с этим, хотя метод RBF и демонстрирует относительно низкую

ошибку интерполяции, его использование для прогнозирования пространственного распределения густоты горизонтального расчленения рельефа территории нецелесообразно, поскольку в этом случае низкие фактические значения будут занижены, а высокие завышены. Простой кригинг оказался абсолютно непригодным для целей прогнозирования, поскольку в результате его применения была смоделирована поверхность с колебанием густоты расчленения рельефа 0,01 км/км², что не соответствует действительности.

По результатам выполнения кросс-валидации наиболее пригодным для целей прогнозирования оказался метод эмпирического байесовского кригинга, в результате применения которого была получена поверхность,

минимальная величина горизонтального расчленения рельефа которой составляет $1,89 \text{ км/км}^2$, а максимальная – $3,45 \text{ км/км}^2$. Особо следует отметить возможность выполнения с помощью ЕВК точной интерполяции умеренно нестационарных данных, что имеет место в нашем случае и чего не позволяют сделать другие виды кригинга.

Установлено, что наибольшую повторяемость в пределах исследуемой территории имеет горизонтальное расчленение рельефа в интервале $2,53\text{--}2,69 \text{ км/км}^2$ (для поверхности, полученной интерполяцией по методу ЕВК), суммарно занимая $25,3 \%$ площади Горецкого р-на. Участки как с высоким горизонтальным расчленением ($3,1\text{--}3,5 \text{ км/км}^2$), так и с низким уровнем указанного показателя (менее $2,0 \text{ км/км}^2$) занимают соответственно $3,51 \%$ и $4,45 \%$ территории.

Следует особо отметить тот факт, что специалистами Государственного предприятия «Белгеодезия» аналитическим способом было проведено сравнение высот облака точек, полученных из матрицы SRTM, с имеющимися в наличии Госкартгеоцентра ЦМР, извлеченными из топографических карт формата

SXF масштабов $1:10\,000$ и $1:50\,000$ и представленными в виде горизонталей.

Сравнение высот двух моделей было осуществлено следующим методами: 1) соотношением конкретной точки матрицы SRTM с двумя горизонталями, между которыми она находится, с определением высоты точки по горизонталям по равномерному закону распределения; 2) соотношением горизонталей топографических карт с горизонталями, полученными на основе SRTM. Установлено, что использование модели SRTM, генерализированной с разрешением 30 угловых секунд без введения поправок, имеющих закономерный характер, для картографирования в масштабах $1:50\,000$ и крупнее не является возможным, однако для отображения рельефа, его основных структурных сегментов (ложбины, хребты, возвышенности, низменности) без вычленения отметок высот данная модель подходит наилучшим образом. Исходя из этого, данные матрицы высот SRTM с пространственным разрешением в 1 угловую секунду пригодны для картографирования в масштабе $1:50\,000$ с точностью 5 м , на что указывается и в работах [2, 10].

Заключение

Результаты выполненных исследований дают основания утверждать, что совместное использование данных дистанционного зондирования и функциональных возможностей ГИС является эффективным инструментом для выполнения комплексного анализа морфометрических параметров рельефа территории Горецкого р-на.

С помощью данного инструмента были рассчитаны 23 морфометрических параметра, относящихся к линейному, площадному и рельефному аспектам и позволяющих оценить такие характеристики, как способность, топография, литология и гидрологические свойства территории без выполнения дорогостоящих наземных исследований.

Методы геоинформационного анализа можно прогнозировать и оценить степень горизонтального расчленения рельефа, являющуюся одной из важнейших характеристик, ограничивающих ведение сельского хозяйства в пределах территории землепользования.

Знание ее особенностей позволяет наиболее правильно подойти к выделению водоохраных и санитарно-защитных зон с учетом конкретных условий территории, а также произвести определение зон с особым режимом природопользования.

Комплексный морфометрический анализ с помощью ГИС, на основе данных радарной интерферометрической топографической съемки SRTM, может быть использован при проведении оперативной и эффективной оценки критических свойств рельефа для целей прогнозирования использования земель и функционального зонирования территории, а также для межхозяйственного землеустройства.

Дальнейшие исследования следует сосредоточить в направлении использования данных дистанционного зондирования для идентификации и комплексного морфометрического анализа отдельных водосборных бассейнов в пределах территории Горецкого р-на.

Библиографический список

1. Кесель, Э. А. Морфометрический анализ цифровой модели рельефа Смолевичского района Минской области для целей землеустройства / Э. А. Кесель, Е. С. Губаревич, А. В. Мороз // Инновационные достижения науки и техники АПК : сб. науч. ст. по материалам Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов, студентов. – Кинель : РИО СГСХА, 2018. – С. 111–114.
2. 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. DOI: 10.1007/s13201-017-0539-z.
3. Дамшевич, А. Возможности использования цифровой модели рельефа для изучения влияния морфометрических показателей на влажность почв / А. Дамшевич // Земля Беларуси. – 2017. – № 1. – С. 42–45.
4. Михайлов, В. А. Комплексный морфометрический анализ Тарханкутского полуострова с помощью ГИС [Электронный ресурс] / В. А. Михайлов // Совр. науч. исслед. и инновации. – 2015. – № 2. – Ч. 4. – Режим доступа: <http://web.snauka.ru/issues/2015/02/46640>. – Дата доступа: 28.06.2020.
5. Kumar, A. Morphometric analysis of six sub-watersheds in the central zone of Narmada River / A. Kumar, S. K. Samuel, V. Vyas // Arabian Journ. of Geosciences. – 2015. – Vol. 8. – P. 5685–5712. DOI:10.1007/s12517-014-1655-9.
6. Погорелов, А. В. Морфометрия рельефа бассейна реки Кубани: некоторые результаты цифрового моделирования / А. В. Погорелов, Ж. А. Думит // Географ. исслед. Краснодар. края. – Вып. 2. – 2007. – С. 7–23.
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. DOI: 10.1007/s00254-004-1166-1.
8. Strahler, A. N. Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks / A. N. Strahler / Handbook of Applied Hydrology. – New York : McGraw Hill Book Company, 1964. – Section 4–11. – P. 439–476.
9. Schumm, S. A. Evolution of drainage systems and slopes in Badlands at Perth Amboy, New Jersey / S. A. Schumm // Bulletin Geological Society of America. – 1956. – Vol. 67 (5). – P. 597–646. DOI:10.1130/0016-7606(1956)67[597:EODSAS]2.0.CO;2.
10. Manjare, B. Prioritization of sub-watersheds of Chandrabhaga river from Purna river basin, Maharashtra using geospatial techniques / B. Manjare, S. Paunikar, J. Shrivatra // Journ. of Geosciences Research. – 2019. – № 2. – P. 111–120.
11. Horton, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrological approach to quantitative morphology / R. E. Horton // Bulletin Geological Society of American. – 1945. – Vol. 56. – P. 275–370. DOI:10.1177/030913339501900406.
12. Drainage morphometry and its influence on hydrology in a semi-arid region: using SRTM data and GIS / Sreedevi P. D [at al.] // Environmental Earth Sciences. – 2013. – Vol. 70 (2). – P. 839–848. – DOI: 10.1007/S12665-012-2172-3
13. Horton, R. E. Drainage basin characteristics / R. E. Horton // Transactions of the American Geophysical Union. – 1932. – Vol. 13. – P. 350–361. DOI: 10.1029/TR013i001p00350.
14. Strahler, A. N. Quantitative slope analysis / A. N. Strahler // Bulletin Geological Society of American. – 1956. – Vol. 67. – P. 571–596. DOI:10.1130/0016-7606(1956)67[571:qsa]2.0.co;2.
15. Симонов, Ю. Г., Симонова Т. Ю. / Речной бассейн и бассейновая организация географической оболочки / Ю. Г. Симонов // Эрозия почв и русловые процессы. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 2003. – Вып. 14. – С. 7–32.

16. Шарапов, С. В. Морфологический анализ рельефа при экологических изысканиях на объектах подземного хранения газа / С. В. Шарапов // Вестн. Моск. ун-та. – 2010. – № 1. – Сер. 5. География. – С. 28–34.
17. Waikar, M. L. Morphometric analysis of a drainage basin using geographical information system: a case study / M. L. Waikar, A. P. Nilawar // International Journ. of Multidisciplinary and Current Research. – 2014. – Vol. 2. – P. 179–184.
18. Analysis of drainage morphometry and watershed prioritization in Bandu Watershed, Purulia, West Bengal through remote sensing and GIS technology: a case study / Das A. [at al.] // International Journ. of Geomatics and Geosciences. – 2012. – Vol. 2 (4). – P. 995–1013.
19. Полякова, Е. В. Морфометрический анализ рельефа острова Вайгач по данным дистанционного зондирования Земли / Е. В. Полякова, М. Ю. Гофаров // Совр. пробл. дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2014. – Т. 11. – № 1. – С. 226–234.
20. Курлович, Д. М. Морфометрический ГИС-анализ рельефа Беларуси / Д. М. Курлович // Земля Беларуси. – 2013. – № 4. – С. 42–48.
21. Позаченюк, Е. А. ГИС-анализ морфометрических показателей рельефа Центрального Предгорья главной гряды Крымских гор для целей ландшафтного планирования / Е. А. Позаченюк, Е. А. Петлюкова // Уч. зап. Крым. федерал. ун-та им. В. И. Вернадского. – География. Геология. – Том 2 (68). – 2016. – С. 96–113.
22. Мыслыва, Т. Н. Сравнение эффективности методов интерполяции на основе ГИС для оценки пространственного распределения гумуса в почве / Т. Н. Мыслыва, О. А. Куцаева, А. А. Подлесный // Вестн. БГСХА. – 2017. – № 4. – С. 146–152.

Поступила 30 июня 2020 г.