Геоморфометрический анализ бассейновых геосистем Приволжского федерального округа по данным SRTM и Aster GDEM

М.А. Иванов, О.П. Ермолаев

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 420008, Россия E-mails: maximko-87@mail.ru, oyermol@gmail.com

Для территории Приволжского федерального округа на основе бассейнового подхода впервые создана пространственная база данных геоморфометрических показателей, соответствующая масштабу 1:200 000. В качестве операционно-территориальных единиц (ОТЕ) в работе использованы речные бассейны и межбассейновые пространства, построенные в полуавтоматизированном режиме на основе ЦМР SRTM и Aster GDEM и гидрографической сети, векторизованной с топографических карт с применением методов пространственного анализа рельефа и гидрологического моделирования, реализованных в TAS и Whitebox. С использованием вышеуказанной модели рельефа рассчитаны основные морфометрические характеристики рельефа: уклон, длина склонов, вертикальное расчленение, густота речной сети, фактор LS. С помощью зональной статистики для бассейнов вычислены средние значения этих характеристик. На основе полученной геоинформационной базы данных рассчитаны основные статистики морфометрических характеристик рельефа, а результаты интерпретированы с применением существующих шкал и классификаций. Оценка точности полученных результатов проводилась путем их сравнения с характеристиками, рассчитанными по ЦМР 100 м разрешения, построенной на основе топографической карты масштаба 1:50000. Полученные небольшие средние значения ошибок позволяют сделать вывод о достоверности полученных результатов.

Ключевые слова: морфометрия рельефа, Приволжский федеральный округ, SRTM, ASTER GDEM

Одобрена к печати: 14.02.2017 DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-98-109

Введение

Информация о количественных характеристиках рельефа, выраженных через его морфометрию, является необходимым условием для решения широкого круга научных и прикладных задач. Чаще характеристики рельефа привлекают при мониторинге экзогенных природных опасностей (абразионно-оползневые явления, склоновая и русловая эрозия, селевая опасность и др.), ландшафтного анализа территории и ее районирования. Широко используют при поисках месторождений полезных ископаемых, в оценке геоэкологического состояния территорий. С появлением глобальных цифровых моделей рельефа, созданных по данным дистанционного зондирования Земли из космоса, в основе которых лежат регулярные координатные сетки, принципиально изменился вектор географических исследований, давший новый качественный толчок количественного анализа различных территорий Земли (Ермолаев и др., 2012; Ермолаев, Мальцев, 2014; Maltsev, Yermolaev, Mozzherin, 2015).

В настоящее время авторами зарегистрирован ряд пространственных баз данных, включающих морфометрические характеристики рельефа бассейнов малых рек исследуемой территории, полученных по результатам обработки цифровых моделей рельефа.

Основной целью исследования, результаты которого обсуждаются в предлагаемой статье, является анализ рельефа крупного региона России – территории Приволжского федерального округа (ПФО) по его морфометрическим показателям с использованием бас-

сейнового подхода. Бассейновый подход при геоморфометрическом анализе территории позволяет охарактеризовать не только рельеф отдельно взятого бассейна, но и, выступая в качестве ОТЕ, всю исследуемую территорию (Maltsev, Yermolaev, Mozzherin, 2012; Yermolaev, Usmanov, Muharamova, 2015).

Необходимость количественного анализа рельефа обуславливается его высокой информативностью при проведении различного рода частного и комплексного географического районирования. Рельеф является базовой характеристикой при создании серий ландшафтных карт.

Задачи исследования: 1) расчет морфометрических показателей рельефа в бассейновых геосистемах ПФО по ЦМР 100 м разрешения, созданной на основе SRTM (http://srtm. csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp) и ASTER GDEM (http://gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp/search.jsp), и формирование соответствующей пространственной базы данных; 2) статистическое описание полученных результатов и их интерпретация в соответствии с существующими шкалами и градациями; 3) оценка точности полученных результатов.

Выбор в качестве региона исследования Приволжского федерального округа (ПФО) обусловлен несколькими причинами. Во-первых, размерами: исследуемая территория должна иметь большую площадь, а масштаб – соответствовать трансрегиональному и глобальному уровню генерализации. Это необходимо для сравнения полученных результатов геоморфометрического анализа с имеющимися мелкомасштабными схемами геоморфологического районирования. Во-вторых, территория должна находиться в разных ландшафтных зонах и с разнообразными морфогенетическими типами рельефа. Это позволит обеспечить пространственную экстраполяцию результатов исследования на неизученные территории со сходными признаками. В-третьих, географическое положение региона должно быть таким, чтобы он находился в широтах, обеспеченных разными по детальности цифровыми моделями рельефа (т.е. севернее 60⁰ с.ш.). Подобное требование обусловлено расположением большого количества территорий России в полярных широтах, где заканчивают свое течение все великие сибирские реки.

Территория исследования занимает большую площадь (более 1 млн. км²) востока Русской равнины и, частично, Урала. Здесь повсеместно развиты возвышенные и низменные ландшафты равнин умеренного пояса от подзоны северной тайги на севере до типичных степей на юге. Она покрывается более чем 340 листами топографических карт масштаба 1: 200 000, в связи с чем выделение границ речных бассейнов вручную является трудновыполнимой задачей. Поэтому для создания геопространственной базы данных, операционно-территориальной единицей которой являлись бы бассейновые геосистемы, целесообразно использовать алгоритмы автоматизированного выделения их границ на основе цифровых моделей рельефа.

Материалы и методы

В качестве исходных материалов использовались:

1. Цифровая модель рельефа с пространственным разрешением 100 м на территорию ПФО, подготовленная на основе данных SRTM и ASTER GDEM (Ermolaev, Mal'tsev, Ivanov, 2014).

2. Векторный слой бассейновых геосистем второго порядка, построенный в автоматизированном режиме по вышеуказанной ЦМР.

3. Гидрологически скорректированная ЦМР.

4. Гидрографическая сеть с топографических карт масштаба 1:100 000 в векторном и растровом форматах.

Крупной, самостоятельной задачей, безусловно, являлось построение границ бассейнов по заданной ЦМР. Эта задача нами была решена ранее (Ermolaev, Mal'tsev, Ivanov, 2014), и поэтому мы опускаем методику ее создания. Расчет показателей и наполнение атрибутивной базы данных производились в программах MapInfo 10.5, ArcGIS 10, SAGA GIS, WhiteBox GAT GIS 3.2. (Lindsay, 2014), Quantum GIS 6.4.

Первоначально в MapInfo были рассчитаны площади бассейнов (в км²). Следует отметить, что для минимизации влияния проекции на результаты, а также для их сопоставимости с полевыми данными здесь и далее использовалось вычисление площадей и длин «на сфере».

Далее, были рассчитаны ведущие морфометрические параметры рельефа для каждого бассейна. Средняя высота рассчитана по подготовленной ЦМР в QGIS с помощью инструмента «Зональная статистика». В ArcGIS был построен растр крутизны склонов (в градусах) и также определены средние значения в бассейнах.

Топографический фактор LS еще известен как эрозионный потенциал рельефа. Существуют различные методы расчета этого показателя (Wischmeier, Smith, 1978; Desmet, Govers, 1996; Kinnell, 2005; Moore, Grayson, Ladson, 1991). Рассчитывался фактор в программе WhiteBox GAT с помощью инструмента Sediment Transport Index по следующей формуле:

$$LS = (m+1) \times \left(\frac{A_s}{22,13}\right)^m \times \sin\left(\frac{B}{0,0896}\right)^n,$$

где A_s – удельная площадь водосбора, B – локальное значение уклона в градусах, m – показатель площади, берется обычно равным 0,4, n – показатель уклона, обычно берется равным 1,3 (Moore, Grayson, Ladson, 1991). Для этого предварительно по гидрологически скорректированной ЦМР в пакете Whitebox GAT построены модель локального направления потоков по алгоритму Deterministic 8 (O'Callaghan, Mark, 1984) и частные водосборные площади (Specific catchment area). С использованием зональной статистики получены средние значения фактора LS для бассейнов.

Для расчета длины склонов были использованы гидрологически скорректированная ЦМР и гидросеть в растровом формате. Расчет производился в программе WhiteBox GAT с помощью функции Downslope Distance to Stream, которая рассчитывает расстояние от каждой ячейки до ближайшей ячейки гидросети. Алгоритм также использует растр локального направления потоков. Чтобы получить среднее значение длины склонов внутри каждого бассейна, из полученного растра с длинами склонов были оставлены только пиксели, лежащие на границах водосборов. По ним с помощью инструмента «Зональная статистика» рассчитаны средние значения.

Глубина расчленения вычислялась как разница между максимальной и минимальной высотами в каждом бассейне, полученными путем расчета зональной статистики.

Для определения густоты речной сети первоначально в MapInfo были рассчитаны суммарные длины рек (в км) внутри каждого бассейна (на основании векторного слоя гидросети), а затем определено их отношение к площади бассейнов.

Результаты и обсуждение

На территории ПФО планарно выделено 68787 бассейновых геосистем, включающих как бассейны малых рек, так и их межприточные пространства. Проведен анализ основных морфометрических показателей рельефа бассейнов ПФО. Первоначально были рассчитаны основные статистические показатели (*табл. 1, 3, 5, 7, 9, 11*) (минимум, максимум, среднее, медиана, мода, среднеквадратическое отклонение (СКО)), построены гистограммы частот (*рис. 1–6*). Также проведено ранжирование показателей в соответствии с существующими классификациями или экспертно при отсутствии таковых. В соответствии с классификациями ями построены соответствующие тематические карты по каждому показателю.

Средняя высота. При ранжировании бассейнов по средней высоте (*табл. 2*) использовалась стандартная классификация рельефа по абсолютной высоте. Поскольку все бассейны со средней высотой более 500 м расположены на территории Урала, они были отнесены к категории низкогорий.



Рис. 1. Распределение бассейнов по высоте

Средний уклон. Для ранжирования бассейнов по уклону (*табл. 4*) использовалась шкала, предложенная Заславским М.Н. (Заславский, Каштанов, 1979). Поскольку классификация дается отдельно для равнинных и горных территорий, определена приуроченность бассейнов к платформенным комплексам или к орогенам в соответствии с Геоморфологической картой СССР масштаба 1:2 500 000 (1987 г.).

Средняя высота, м	Форма рельефа	Количество бассейнов, шт.	Доля от общего коли- чества, %	Площадь, км²	Доля от общей площади, %
0–200	Низменности	44108	64,12	670243,3	65,21
200–500	Возвышенности	22051	32,06	322970,41	31,41
500-1000	Низкие горы	2628	3,82	34793,79	3,38

Таблица 2. Классификация бассейнов по высоте



статистики (уклон) Минимум 0.0005

Таблица 3. Основные

минимум	0,0005
Максимум	15,85
Среднее	2,08
Медиана	1,71
Мода	1,44
СКО	1,51

Puc	2	Распределение	бассейнов	no	VEROHV
<i>i u</i> c.	4.	1 испребеление	биссеннов	no	уклопу

Средний уклон, градусы	Форма рельефа	Количество бас- сейнов, шт.	Доля от общего коли- чества, %	Площадь, км ²	Доля от общей пло- щади, %
	Р	авнинные террит	ории		
<1	Плоские (субгоризонтальные) равнины	12275	17,84	278995,11	27,05
1–3	Слабонаклонные равнины (очень пологие склоны)	44486	64,67	625584,4	60,83
3–5	Пологие склоны (наклонные равнины)	5927	8,62	50411,24	4,90
5–7	Слабопокатые склоны	889	1,29	7056,35	0,69
7–10	Покатые склоны	177	0,26	814,01	0,08
10–15	Сильнопокатые склоны	18	0,03	25,84	0,00
Горные территории					
<4	Плоские и почти плоские поверхности	1499	2,18	22441,57	2,18
4–10	Пологие склоны	3338	4,85	42678,98	4,15
10-20	Покатые склоны	178	0,26	1 214,03	0,12

Таблица 4. Классификация бассейнов по уклону

Средняя длина склонов. Ранжирование (*табл. 6*) проводилось в соответствии с классификацией, предложенной М.Н. Заславским (Заславский, 1979).

Глубина расчленения. Существуют разные подходы по ранжированию этого показателя. В частности, для востока Русской равнины В.Н. Ченцовым принята следующая шкала: 0–2, 2–5, 5–10, 10–20, 20–30, 30–50, 50–100, 100–300, 300–500 м (Ченцов, 1948).



Рис. 3. Распределение бассейнов по длине склонов

Средняя протя- женность скло- нов в бассейне, м	Категория склонов	Количество бассейнов, шт.	Доля от общего коли- чества, %	Площадь, км ²	Доля от общей пло- щади, %
50-100	Очень короткие	704	1,02	138,96	0,01
100-200	Короткие	2707	3,94	1460,74	0,14
200–500	Средней длины	15734	22,87	39137,15	3,81
500-1000	Повышенной длины	22388	32,55	159399,86	15,50
1000-2000	Длинные	18913	27,50	349634,31	34,00
2000-4000	Очень длинные	7069	10,28	326944,07	31,79
>4000	Чрезвычайно длинные	1272	1,85	151292,41	14,75

Таблица 6. Классификация бассейнов по средней длине склонов



 (глубина расчленения)

 Минимум
 0,1

 Максимум
 1054,15

 Среднее
 89,25

 Медиана
 71,13

Мода

СКО

40,03

75.12

Таблица 7. Основные статистики

Рис. 4. Распределение бассейнов по глубине расчленения

Для районирования (*табл. 8*) нами выбрана близкая к ней шкала относительных высот, предложенная В.И. Кирюшиным (Кирюшин, 2011) по той причине, что показатель вертикального расчленения рассчитывается им так же, как и в нашем исследовании для бассейнов. В соответствии с этой шкалой для равнинного рельефа наиболее типичны ступени 1–5, для предгорий – 3–6, для среднегорного рельефа – 4–6, для высокогорного – 6–9.

Для районирования бассейнов (*табл. 10*) по густоте речной сети авторами разработана шкала на основе изменчивости этого показателя в зависимости от ландшафтной зоны, установленной по результатам дисперсионного анализа.

Вертикальное расчленение, м	Ступень	Количество бассейнов, шт.	Доля от обще- го количества, %	Площадь, км ²	Доля от общей площади, %
<5	1	1089	1,58	682,14	0,07
5–10	2	1440	2,09	2474,92	0,24
10–25	3	3969	5,77	16239,18	1,58
25-50	4	13029	18,94	100773,43	9,80
50-100	5	29267	42,55	397033,8	38,61
100-200	6	15637	22,73	397733,13	38,71
200–300	7	2726	3,96	76243,06	7,41
300–500	8	1319	1,92	27242,06	2,65
>500	9	311	0,45	9585,78	0,93

Таблица 8. Классификация бассейнов по глубине расчленения

Густота речной сети.



Рис. 5. Распределение бассейнов по густоте речной сети

Густота речной сети, км/км ²	Количество бас- сейнов, шт.	Доля от общего количества, %	Площадь, км²	Доля от общей площади, %
<0,2	4692	6,82	236044,89	22,95
0,2–0,4	9271	13,48	326211,85	31,76
0,4–0,6	12833	18,66	231071,59	22,47
0,6–0,8	11486	16,70	116545,44	11,33
0,8–1	9101	13,23	59370,01	5,77
1–1,2	6827	9,92	29753,84	2,89
1,2–1,4	4749	6,90	14870,9	1,45
1,4–1,6	3024	4,40	7003,67	0,68
>1,6	6804	9,89	7135,31	0,69

Таблица 10. Классификация бассейнов по густоте речной сети

Фактор LS. Для фактора LS (*puc.* 7) выбрана градация (*табл.* 12), использованная Европейской системой ESDAC (European Soil Data Centre) в рамках работы по расчету этого показателя на территорию Европы (Panagos, Borrelli, Meusburger, 2015).

Применимость данной градации обусловлена использованием тех же ЦМР (SRTM и ASTER GDEM) при расчетах и сопоставимостью территориального охвата.



Рис. 6. Распределение бассейнов по фактору LS

Фактор LS	Количество бас- сейнов, шт.	Доля от общего количества, %	Площадь, км ²	Доля от общей площади, %
<0,1	923	1,34	7628,99	0,74
0,1–0,5	8652	12,58	193018,95	18,77
0,5–1	17617	25,61	311217,38	30,26
1–2	25568	37,17	334481,55	32,57
2–3	7872	11,44	93871,04	9,13
3–5	4805	6,99	49346,32	4,80
5-10	2955	4,30	35023,92	3,41
>10	395	0,57	3419,35	0,33

Таблица 12. Классификация бассейнов по фактору LS



Рис. 7. Карта средних значений фактора LS

Точность полученных морфометрических характеристик в первую очередь связана с точностью исходных ЦМР. По литературным данным средняя абсолютная ошибка по высоте SRTM составляет менее 10 м. Согласно сводному отчету валидации данных ASTER GDEM средняя точность по высоте составляет около 20 м (https://lpdaac.usgs.gov/sites/ default/files/public/aster/docs/ASTER_GDEM_Validation_Summary_Report.pdf).

Проведена оценка точности полученных результатов. Для этого были оцифрованы изогипсы, отметки высот и гидрография листа топографической карты масштаба 1:50 000 и на этих данных в программе ArcGIS с помощью инструмента Topo to Raster построена ЦМР. Для того чтобы исключить из оценки ошибки, связанные с генерализацией, пространственное разрешение опорной ЦМР было задано также 100 м. Оценивалась точность двух параметров: абсолютная высота и уклон. Глубина расчленения напрямую зависит от абсолютной высоты. При одинаковом пространственном разрешении уклон является определяющим фактором при расчете LS. Точность результатов по длинам склонов и густоте речной сети в первую очередь определяется границами бассейнов и используемым слоем гидросети и, в меньшей степени, – точностью ЦМР.

По опорной ЦМР построен растр уклонов в градусах. С помощью калькулятора растров рассчитаны разница между опорной и исходной ЦМР для оценки точности высот и разницы уклонов. Таким образом, были получены значения ошибок. Затем проведен стандартный статистический анализ этих ошибок (*puc 8, 9; табл. 13, 14*). Всего получено и проанализировано 32 256 точек.



Рис. 8. Гистограмма частот ошибки по высоте



Рис. 9. Гистограмма частот ошибки по уклону

Таблица 13. Основные
статистики ошибки по высоте

Минимум	-36,76
Максимум	28,74
Среднее	1,97
Медиана	2,89
СКО	4,54

Таблица 14. Основные статистики ошибки по уклону

Минимум	-7,29
Максимум	3,91
Среднее	-0,099
Медиана	-0,07
СКО	0,63

Поскольку максимальные и минимальные ошибки являются значительными, что в первую очередь является результатом краевых эффектов, были рассмотрены 1-я и 99-я перцентили. Так, 98% ошибок по высоте лежат в пределах от -11 до 12 м, а 98% ошибок по уклону – в пределах от -2 до 1,5 градусов. Полученные результаты лежат в пределах заявленной точности исходных ЦМР и позволяют сделать вывод о хорошей достоверности рассчитанных морфометрических показателей на данном уровне генерализации.

Заключение

Глобальные цифровые модели рельефа, созданные по материалам дистанционного зондирования Земли из космоса, обработанные средствами гис-технологий, позволяют получать достаточно надежные сведения о количественных характеристиках рельефа крупных территорий. Дают возможность проводить его пространственный анализ с целью выяснения не только морфологии, но и генезиса, осуществлять тематическое и комплексное районирование. С использованием этих средств впервые на территорию Приволжского федерального округа создана пространственная база данных морфометрических показателей рельефа для 68787 бассейнов малых рек. В ходе исследования рассмотрены распределение и основные статистики 6 ключевых морфометрических параметров рельефа. Проведено ранжирование бассейнов по этим параметрам в соответствии с существующими классификациями или экспертно. Составлена серия соответствующих тематических электронных карт. На ключевом участке проведена оценка точности рассчитанных показателей. Полученные небольшие средние значения ошибок говорят о достоверности полученных результатов.

Таким образом, в ходе исследования получены адекватные данные о морфометрии рельефа в бассейновых геосистемах ПФО. На их основе сформирована геобаза данных, которая может использоваться для гидролого-геоморфологического моделирования, геоэкологической оценки территории, создания ландшафтной карты и ряда других задач.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 15-17-10008).

Литература

^{1.} *Ермолаев О.П., Мальцев К.А.* Использование цифровых моделей рельефа для автоматизированного по-строения границ водосборов // Геоморфология. 2014. № 1. С. 45–52.

Ермолаев О.П., Мальцев К.А., Мозжерин В.В., Мозжерин В.И. Глобальная геоинформационная система «Сток взвешенных наносов в речных бассейнах Земли» // Геоморфология. 2012. № 2. С. 50–58. Заславский М.Н. Эрозия почв. М.: Мысль, 1979. 245 с. 2.

^{3.}

Заславский М.Н., Каштанов А.Н. Почвозащитное земледелие. М.: Россельхозиздат, 1979. 207 с.

^{5.} Кирюшин В.И. Теория адаптивно-ландшафтного земледелия и проектирования агроландшафтов. М.: Колос, 2011. 443 с.

Ченцов В.Н. Морфометрические показатели на геоморфологической карте мелкого масштаба // Труды Ин-та географии АН СССР. 1948. Т. 39. С. 291–306. 6.

Desmet P.J.J., Govers G. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically 7. complex landscape units // Journal of Soil and Water Conservation. 1996. Vol. 51. Issue 5. pp. 427-433.

- Ermolaev O.P., Mal'tsev K.A., Ivanov M.A. Automated Construction of the Boundaries of Basin Geosystems for 8 the Volga Federal District // Geography and Natural Resources. 2014. Vol. 35. No. 3. pp. 222-228.
- Kinnell P.I.A. Alternative approaches for determining the USLE-M slope length factor for grid cells // Soil Sci-9 ence Society America Journal. 2005. Issue 69. pp. 674-680.
- Lindsay J.B. 2014 The Whitebox Geospatial Analysis Tools project and open-access GIS // Proceedings of the GIS Research UK 22nd Annual Conference, The University of Glasgow. 2014. pp. 16–18.
- 11. Maltsev K.A., Yermolaev O.P., Mozzherin V.V. Suspended sediment yield mapping of Northern Eurasia // Proceedings IAHS. 2015. pp. 326-332.
- Maltsev K., Yermolaev O., Mozzherin V. Mapping and spatial analysis of suspended sediment yields from the Russian Plain // Proceedings IAHS-AISH. 2012. pp. 251–258.
- 13. Moore I.D., Grayson R.B., Ladson A.R. Digital terrain modelling: a review of hydrogical, geomorphological, and biological applications // Hydrological Processes. 1991. Vol. 5. Issue 1. pp. 3-30.
- 14. O'Callaghan J.F., Mark D.M. The extraction of drainage networks from digital elevation data // Computer Vision, Graphics and Image Processing. 1984. Issue 28. pp. 323–344.
- 15. Panagos P., Borrelli P., Meusburger K. A new European slope length and steepness factor (LS-Factor) for
- Panagos P., Borrelli P., Meusburger K. A new European slope length and steepness factor (LS-Factor) for modeling soil erosion by water // Geosciences. 2015. Issue 5. pp. 117–126.
 Wischmeier W.H., Smith D.D. Predicting rainfall erosion losses A guide to conservation planning. Agriculture Handbook. 1978. No. 537. US Department of Agriculture, Washington DC.
 Yermolaev O.P, Usmanov B.M, Muharamova S.S. The basin approach and mapping to the anthropogenic impact assessment on the east of the Russian plain // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Vol. 10. Issue 20. pp. 41178-41184.

Geomorphometric analysis of river basins of the Volga Federal **District using SRTM and Aster GDEM data**

M.A. Ivanov, O.P. Yermolaev

Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan 420008, Russia E-mails: maximko-87@mail.ru, overmol@gmail.com

A spatial database of geomorphometric parameters of 1:200 000 scale based on river basin approach has been created for the Volga Federal District for the first time. Watersheds created with semi-automated method of terrain and hydrological modeling in TAS GIS and WhiteBox GIS were used as spatial units. DEMs SRTM and Aster GDEM and hydrographic network vectorized from topographic maps were used as input data. Basic morphometric characteristics of relief such as mean height, slope, slope length, height range, river network density and factor LS were calculated for each watershed using the above-mentioned DEM. From zonal statistics for river basins, the average values of these characteristics were obtained. Spatial analysis and interpretation of morphometric characteristics of relief based on existing scales and classifications was carried out. The accuracy of the results was assessed by comparing with characteristics calculated by 100m-resolution DEM based on topographic map of scale 1:50000. Small average errors obtained prove reliability of the results.

Keywords: relief morphometry, Volga Federal District, SRTM, ASTER GDEM

Accepted: 14.02.2017 DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-98-109

References

- Ermolaev O.P., Mal'tsev K.A., Ispol'zovanie tsifrovykh modelei rel'efa dlya avtomatizirovannogo postroeniya 1.
- granits vodosborov (Using dems for automatic plotting of catchments), *Geomorfologiya*, 2014, No. 1, pp. 45–52. Ermolaev O.P., Mal'tsev K.A., Mozzherin V.V., Mozzherin V.I., Global'naya geoinformatsionnaya sistema "Stok vzveshennykh nanosov v rechnykh basseinakh Zemli" (Global geoinformation system "Suspended Sediment Yield in the River Basins of the Earth"), *Geomorfologiya*, 2012, No. 2, pp. 50–58. Zaslavskii M.N., *Eroziya pochv*. (Soil erosion), Moscow: Mysl', 1979, 245 p. 2.
- 3
- Zaslavskii M.N., Kashtanov A.N. *Pochvozashchitnoe zemledelie* (Conservation agriculture.), Moscow: Rossel'khozizdat, 1979, 207 p.

- Kiryushin V.I., Teoriva adaptivno-landshaftnogo zemledeliva i proektirovaniva agrolandshaftov (The theory of 5. adaptive-landscape agriculture and agricultural landscapes design), Moscow: Kolos, 2011, 443 p.
- Chentsov V.N., Morfometricheskie pokazateli na geomorfologicheskoi karte melkogo masshtaba (The mo-6. rphometric indicators on small scale geomorphological map), Trudy In-ta geografii AN SSSR, 1948, Vol. 39,
- pp. 291–306. Desmet P.J.J., Govers G., A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically 7.
- 8. Ermolaev O.P., Mal'tsev K.A., Ivanov M.A., Automated Construction of the Boundaries of Basin Geosystems for the Volga Federal District, *Geography and Natural Resources*, 2014, Vol. 35, No. 3, pp. 222–228. Kinnell P.I.A., Alternative approaches for determining the USLE-M slope length factor for grid cells, *Soil Science*
- 9 Society America Journal, 2005, No. 69, pp. 674-680.
- 10. Lindsay J.B., 2014 The Whitebox Geospatial Analysis Tools project and open-access GIS, Proceedings of the GIS Research UK 22nd Annual Conference, The University of Glasgow, 2014, pp. 16–18.
- 11. Maltsev K.A., Yermolaev O.P., Mozzherin V.V., Suspended sediment yield mapping of Northern Eurasia, *Proceedings* IAHS, 2015, pp. 326–332
- Maltsev K., Yermolaev O., Mozzherin V., Mapping and spatial analysis of suspended sediment yields from the Russian Plain, *Proceedings IAHS-AISH*, 2012, pp. 251–258.
 Moore I.D., Grayson R.B., Ladson A.R., Digital terrain modelling: a review of hydrogical, geomorphological,

- Moore T.D., Grayson K.B., Eadson A.K., Digital tertain moderning. a review of hydrogical, geomorphological, and biological applications, *Hydrological Processes*, 1991, Vol. 5, No. 1, pp. 3–30.
 O'Callaghan J.F., Mark D.M., The extraction of drainage networks from digital elevation data, *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 1984, No. 28, pp. 323–344.
 Panagos P., Borrelli P., Meusburger K., A new European slope length and steepness factor (LS-Factor) for modeling soil erosion by water, *Geosciences*, 2015, No. 5, pp. 117–126.
- Wischmeier W.H., Smith D.D., Predicting rainfall erosion losses A guide to conservation planning. Agriculture 16. Handbook, US Department of Agriculture, Washington DC, 1978, No. 537.
 17. Yermolaev O.P, Usmanov B.M, Muharamova S.S., The basin approach and mapping to the anthropogenic impact
- assessment on the east of the Russian plain, International Journal of Applied Engineering Research, 2015, Vol. 10, No. 20, pp. 41178-41184.