

**АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ГЛОБАЛЬНОЙ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА
GMTED2010 ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭРОЗИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА
(НА ПРИМЕРЕ ЮГА ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ)**

© 2022 г. К. А. Мальцев*

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

**E-mail: mlevkirill@mail.ru*

Поступила в редакцию 27.06.2022 г.

После доработки 06.12.2022 г.

Принята к публикации 08.12.2022 г.

В статье представлен количественный анализ отличий расчета эрозионного потенциала рельефа возникающих при использовании различных вариантов глобальной цифровой модели рельефа GMTED2010: “Mean”; “Breakline emphasis”; “Median”. Для сравнительного анализа в качестве эталона использовалась глобальная цифровая модель рельефа SRTM (радар C-SIR). Кроме этого, выполнен анализ отличий величины эрозионного потенциала рельефа, возникающих при использовании различных методик. При этом были использованы 4 методики расчета эрозионного потенциала рельефа: USLE; RUSLE; методика научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов (НИЛЭП и РП) МГУ, методика Мура И.Д. и Найбера Дж.Л. Анализ был выполнен в пределах 4 тестовых участков отражающих основные типы рельефа юга Европейской территории России. Установлено, что наиболее близкие к модели SRTM C-SIR результаты при расчете эрозионного потенциала рельефа дает вариант модели GMTED2010 “MEAN”. Ошибки, возникающие при сравнении моделей SRTM C-SIR и GMTED2010 “MEAN” в пределах умеренно расчлененных равнин, где расположена большая часть пахотных угодий, составляют 7–54%. В то же время ошибки в пределах горных территорий или пластово-аккумулятивных равнин и низменностей составляют 68–322%. Анализ использования различных формул расчета эрозионного потенциала рельефа показывает, что в пределах всех тестовых участков наименьшие значения получаются при использовании методики, предложенной НИЛЭП и РП, а наибольшие значения с использованием USLE, либо с использованием методики предложенной Муром И.Д. и Найбером Дж.Л.

Ключевые слова: эрозионный потенциал рельеф, ГИС, ЦМР, GMTED2010, SRTM

DOI: 10.31857/S0869607122050068

ВВЕДЕНИЕ

Среднемноголетняя количественная оценка интенсивности эрозионных и аккумулятивных процессов на водосборе, а также оценка величины стока наносов с водосбора в реку являются одними из ключевых показателей для определения темпов деградации почвы на водосборе и степени загрязнения водотоков наносами, поступающими с площади их водосборов.

Проблема количественной оценки и картографирования эрозионно-аккумулятивных процессов актуальна для Европейской территории России (ЕТР) и особенно для ее южной части (южнее 55–60° с.ш.) в силу того, что именно здесь на плодородных

почвах уже несколько столетий находится земледельческий пояс России. В этой связи количественная оценка эрозионно-аккумулятивных процессов является актуальной задачей. Задача оценки потерь почвы может быть решена с использованием самых разнообразных полевых методов и методов моделирования. В качестве одного из подходов к такой оценке можно использовать эрозионные модели. В настоящее время существует множество таких моделей: НИЛЭП и РП МГУ [4], USLE [29], RUSLE [23], WATEM/SEDEM [28], RUSLE2 [14] и другие. С использованием этих моделей и не только, к настоящему времени разработано несколько разновременных карт, отражающих либо степень деградации почвенного покрова от эрозионных процессов, либо интенсивность протекания эрозионных процессов на пашне в пределах ЕТР, как составной части более крупных территорий:

- Почвенно-эрозионная карта СССР [8];
- Национальный атлас почв Российской Федерации [5];
- The map of spatial variation of soil erosion by water [27];
- Global Land Degradation Information System (GLADIS) [21].

Обзор данных картографических моделей представлен в статьях [17, 19]. В то же время, на наш взгляд, остается довольно много вопросов методического характера о том, как рассчитывать потенциальные потери почвы при рассмотрении таких крупных территорий как ЕТР. Согласно многим исследованиям, потери почвы обусловлены несколькими факторами: эрозионным потенциалом дождевых осадков; смываемостью почв; эрозионным потенциалом рельефа (ЭПР), почвозащитным коэффициентом агрокультурной растительности. В данном исследовании мы бы хотели остановиться на вопросах методического обеспечения расчета ЭПР. Здесь, на наш взгляд, существует два важных методических аспекта: во—первых, то какую цифровую модель рельефа использовать для расчета эрозионного потенциала рельефа и то, какую методику использовать для расчета эрозионного потенциала рельефа. Вопрос использования ЦМР во многом зависит от масштаба исследования, при работе с такими большими территориями как ЕТР невозможно обойтись без свободно распространяемых глобальных цифровых моделей рельефа (ГЦМР). В настоящее время существует несколько разномасштабных ГЦМР.

Хороший обзор и оценку точности таких наиболее детальных ГЦМР существующих в свободном доступе, как SRTM C-SIR, SRTM X-SAR; AW3D30, ASTER GDEM и других дан во многих статьях [1, 7, 10, 11, 24]. Однако выше перечисленные ГЦМР, имеющие шаг сетки 1” (около 30 м.), сложно использовать при исследованиях таких крупных территорий как вся ЕТР (около 3.5 млн км²), в силу большого объема обрабатываемых данных. Количество узлов регулярной сетки при шаге 30 м будет составлять около 4×10^9 , а размер файла при представлении рельефа ЕТР составлял бы 12–13 Гигабайт. Просто для отображения карт такой размер файла не является очень большой проблемой, хотя и здесь требуются вычислительные мощности рабочей станции. Однако для вычисления ЭПР над ЦМР необходимо проведение некоторых подготовительных процедур. Например, требуется гидрологическая подготовка рельефа, заключающаяся в удалении всех локальных западин, существующих в модели рельефа [18].

Наиболее подходящей альтернативной ГЦМР для оценки фактора рельефа всей Европейской территории России является, на наш взгляд, модель “Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010” (GMTED2010) [15]. Данная ГЦМР была создана в 2010 году и представляет собой компиляцию нескольких глобальных наборов данных. Оценка точности высот и морфометрических показателей полученных на основе GMTED2010 в настоящий момент не так много. Можно упомянуть исследования проведенные в различных частях мира [13, 25, 26]. Количественный анализ точности модели GMTED2010 проведенный на ЕТР в основном были направлены на оценку точности положения границ водосборов [2], а не на оценку погрешности ЭПР.

Кроме этого в настоящее время существует несколько методик расчета ЭПР, анализ влияния которых на потенциальные потери почвы в пределах различных типов рельефа ЕТР также не проводился.

Соответственно, задачами исследования являются:

- 1) Количественная оценка различий эрозионного потенциала рельефа возникающих при его расчете на основе существующих вариантов ГЦМР GMTED2010;
- 2) Количественная оценка различий возникающих при расчете эрозионного потенциала рельефа разными методиками в пределах основных типов рельефа юга ЕТР.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Модель "GMTED2010" имеет несколько версий отличающихся как пространственным разрешением (7.5", 15", 30"), так и алгоритмами предобработки использующихся для ее создания данных ("Min"; "Max"; "Mean"; "Median"; "Standart Deviation"; "Systematic Subsample"; "Breakline Emphasys"). Эта модель была создана с использованием 11-ти различных источников данных о рельефе Земли, в том числе SRTM (данные радара C-SIR) для территорий южнее 60° с.ш. и цифровых данных о высотах, полученных с использованием фотограмметрии при разрешении 100 м для территорий севернее 60° с.ш. Для дальнейшего анализа были использованы версии модели, имеющие пространственное разрешение 7.5" и имеющие алгоритмы предобработки: "Mean"; "Median"; "Breakline Emphasys". В качестве проверочной модели была использована версия модели SRTM полученная радаром C-SIR и имеющая шаг сетки 1".

Влияние различных версий модели GMTED2010 на величину ЭПР было оценено на 4 тестовых участках каждый площадью около 40 тыс. км² и расположенных в пределах различных геоморфологических районов южной части ЕТР (рис. 1):

"test1" – северная оконечность Приволжско-Ставропольской провинции молодых поднятий, Волго-Камская провинция низменных и возвышенных равнин, а также ярусных возвышенностей, Заволжская низменная аккумулятивная равнина сложного плиоценового прогиба;

"test2" – провинция высокогорных, среднегорных и низкогорных линейных хребтов Большого Кавказа с тектоническим блоком и эрозионно-денудационным рельефом;

"test3" – Понто-Каспийской провинции пластово-аккумулятивных равнин и низменностей;

"test4" – Окско-Донская аккумулятивная равнина [6].

В пределах тестовых участков 1–4 (рис. 1) были рассчитаны значения эрозионного потенциала рельефа с использованием различных методик. В настоящее время существует несколько методик оценки ЭПР, довольно хороший обзор этих методик дан в статье [22]. Однако среди всех этих методов существует 4 методики, которые, наиболее часто [12] используются как в отечественных исследованиях, так и за рубежом: методика RUSLE [23]; [15]; USLE [29]; методика НИЛЭП и РП МГУ [4]; методика И.Д. Мура и Дж.Л. Нибера [20].

Необходимо отметить, что оценка эрозионного потенциала рельефа в пределах различных частей ЕТР проводилась как авторами данного исследования, так и другими авторами [3]. Кроме этого необходимо отметить, что различными исследователями в пределах, в том числе Европейской территории России, ранее проводился анализ эффективности использования различных методик в пределах отдельных регионов. Однако таких исследований немного, так, например, необходимо отметить исследования сотрудников Белгородского университета [9], которые носят региональный характер.

Для расчетов ЭПР с использованием трех методик было использовано программное обеспечение SAGA. Программная реализация методики расчета ЭПР, предложенной

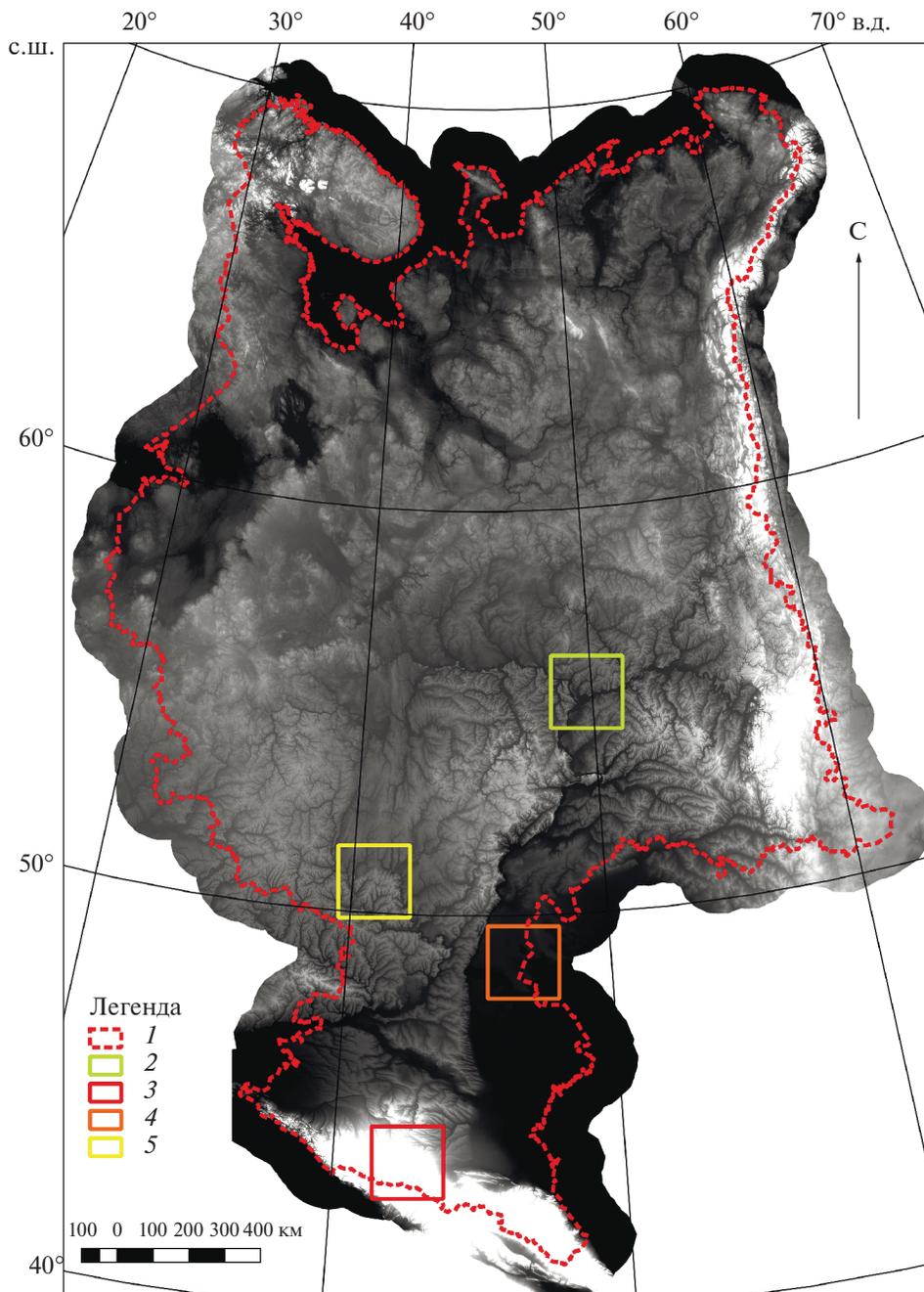


Рис. 1. Обзорная карта расположения тестовых участков (1 – граница Европейской территории России; 2 – тестовый участок “test1”; 3 – тестовый участок “test2”; 4 – тестовый участок “test3”; 5 – тестовый участок “test4”).

Fig. 1. Overview map of the location of test areas (1—border of the European territory of Russia; 2—test area “test1”; 3—test area “test2”; 4—test area “test3”; 5—test area “test4”).

Таблица 1. Статистические показатели ЭПР рассчитанные различными методиками
Table 1. Statistical indicators of LS-factor calculated by various methods

Методика	Среднее	Стандартное отклонение	Максимум	Медиана	99% – квантиль
Участок “test1”					
RUSLE	0.6001	0.8576	23.1891	0.3583	4.1214
И.Д. Мур и Дж.Л. Найбер, 1989	1.1375	1.6101	40.3791	0.6240	7.698
USLE	0.9776	1.8025	71.0737	0.3931	8.4269
Ларионов, 1993	0.4431	0.7936	20.1792	0.1390	3.8318
Участок “test2”					
RUSLE	11.1734	13.5347	122.409	3.9414	49.39
И.Д. Мур и Дж.Л. Найбер, 1989	18.1684	23.3684	361.25	6.9563	95.84
USLE	33.2346	53.1262	1313.24	7.3064	229.749
Ларионов, 1993	10.1859	16.4261	98.5768	0.7004	62.9624
Участок “test3”					
RUSLE	0.0802	0.0802	11.1997	0.0631	0.3595
И.Д. Мур и Дж.Л. Найбер, 1989	0.0726	0.1560	11.9156	0.0413	0.6279
USLE	0.1116	0.1164	14.3713	0.0969	0.3906
Ларионов, 1993	0.1023	0.1284	10.68	0.0345	0.4803
Участок “test4”					
RUSLE	0.6152	0.8018	15.1918	0.3218	3.9315
И.Д. Мур и Дж.Л. Найбер, 1989	1.16	1.5763	36.3964	0.5597	7.3859
USLE	1.0089	1.6778	59.0437	0.3564	8.0167
Ларионов, 1993	0.3213	0.3358	5.6431	0.2058	1.7020

в НИЛЭП и РП Г.А. Ларионовым, была выполнена нами самостоятельно. Полученные растровые фрагменты были проанализированы с использованием методов описательной статистики. Были рассчитаны такие статистические показатели как: среднее; стандартное отклонение, максимум, медиана, 99% – квантиль. Объем выборки для всех тестовых участков был равен 1000000.

Кроме этого, был выполнен сравнительный анализ пар медиан. Были проанализированы пары медиан различных вариантов модели GMTED2010 между собой и вариантов модели GMTED2010 с моделью SRTM C-SIR по формуле 1.

$$ERR = (|M1 - M2| / M1) \times 100 \quad (1)$$

где, ERR – разница в процентах; M1 – медианное значение в модели GMTED; M2 – медианное значение в модели SRTM(C-SIR).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты сравнительного анализа использования различных методик ЭПР в пределах различных тестовых участков представлены в табл. 1.

Анализ этой таблицы показывает, что наименьшие различия величины ЭПР в пределах ЕТР между методиками расчета наблюдаются на тестовом участке “test3”, который расположен в пределах Понто-Каспийской провинции пластово-аккумулятивных равнин и низменностей. Наибольшие различия величины ЭПР наблюдаются при использовании выбранных методик в пределах тестового участка представляющего возвышенные горные территории (“test2”).

При этом наименьшие значения ЭПР в пределах всех тестовых участков получают при использовании методики предложенной Г.А. Ларионовым. Максимальные значения ЭПР в пределах горных территорий северного Кавказа (“test2”) свойственны методике USLE [29], а в пределах умеренной равнины центра ЕТР (“test1”, “test4”) методике предложенной И.Д. Муром и Дж.Л. Найбером [20]. Кроме этого необходимо отметить, что наиболее близкие средние значения ЭПР наблюдаются между методикой Г.А. Ларионова (1993), а также методикой RUSLE [23, 16]. В то же время структура распределения ЭПР несколько отличается при использовании этих двух методик, о чем говорят медиана и 99% квантиль, а также стандартное отклонение. Так медианы значений ЭПР полученные этими двумя методиками различаются сильнее, чем средние значения, а 99% квантили различаются меньше, чем средние значения.

Здесь также хотелось бы отметить, что наибольшие значения стандартного отклонения, максимума и 99% квантили характерны для расчета ЭПР предложенного с использованием методики USLE на возвышенном участке “test2” и на равнинных участках “test1” и “test4”, что говорит о большей изменчивости значений ЭПР, получаемых этой методикой. На участке “test3”, который характеризуется низменным рельефом, наибольшие значения стандартного отклонения и 99% квантили, представлены в методике, описанной И.Д. Муром и Дж.Л. Найбером [20].

Для сравнительного анализа вариантов модели GMTED2010 была использована методика RUSLE. Использование различных вариантов модели GMTED2010 (“Mean”, “Median”, “Breakline emphasys”), может давать существенно различающиеся значения ЭПР. Так, например, различия в величине ЭПР между моделями “Breakline emphasys” и “Mean” могут достигать 18% (test1) – 60% (test3), в зависимости от тестового участка. Различия величины ЭПР между моделями “Mean” и “Median” намного меньше и не превышают 2% на участке “test2” (табл. 2). Анализ медиан показывает, что варианты модели “Mean” и “Median”, дают меньшие значения ЭПР, а вариант модели “Breakline emphasys” дает повышенную оценку. Схожие результаты дает анализ средних значений. Наибольшие значения на всех тестовых участках таких статистических показателей как стандартное отклонение, 99% квантиль, максимум, при использовании варианта модели “Breakline_emphasys” говорит о большем разбросе значений ЭПР. Все статистические показатели ЭПР на всех тестовых участках моделей “Mean” и “Median” очень схожи.

Анализ средних и медианных значений различных вариантов ГЦМР GMTED2010 и более точной ГЦМР SRTM (C-SIR) показывает, что в пределах участков “test1”, “test2”, “test4” наиболее близкие результаты к ГЦМР SRTM (C-SIR) дает вариант модели “MEAN” (табл. 2). В тоже время, на участке “test3” в условиях низменного рельефа наиболее близкий к модели SRTM (C-SIR) результат дает модель GMTED2010-“Breakline emphasys”. Также необходимо отметить, что все варианты модели “GMTED2010” далеко не на всех тестовых участках хорошо согласуются с моделью ГЦМР SRTM (C-SIR). Так, например, относительно небольшие различия (7–54%) характерны для тестовых участков, расположенных в пределах умеренно расчлененных равнин (“test1”, “test4”), где сосредоточены основные пахотные земли ЕТР. В тоже время, эти различия между величинами ЭПР рассчитанного в пределах горных территорий (“test2”) и пластово-аккумулятивных равнин и низменностей (“test3”) достигают 68–322%. Также необходимо отметить, что все варианты модели “GMTED2010”, на горных (“test2”) и равнинных (“test1”, “test4”) участках завышают значения ЭПР по сравнению с моделью SRTM (C-SIR). Все варианты модели “GMTED2010”, на низменных участках дают заниженные значения ЭПР по сравнению с моделью SRTM (C-SIR).

Анализ табл. 2 также показывает, что отличия ЭПР обусловленные использованием существующих вариантов модели GMTED2010 сопоставимы с отличиями, обусловленными разным шагом сетки в SRTM(C-SIR) и GMTED2010 в пределах умеренно расчлененных равнин (“test1”, “test4”). Отличия ЭПР обусловленные шагом сетки

Таблица 2. Статистические показатели ЭПР рассчитанные с использованием различных вариантов ГЦМР GMTED2010 и SRTM (C-SIR)**Table 2.** Statistical indicators of the LS-factor calculated using different variants of the GMTED2010

ГЦМР	Среднее	Стандартное отклонение	Максимум	Медиана	99% – квантиль
Участок “test1”					
GMTED_be	0.7374	1.0789	26.22	0.4241	5.32
GMTED_mn	0.6001	0.8576	23.1800	0.3585	4.12
GMTED_md	0.6121	0.9010	24.505	0.3592	4.3538
SRTM(C-SIR)	0.5385	0.6488	38.82	0.3356	3.36
Участок “test2”					
GMTED_be	12.7038	14.8869	172.78	4.9783	53.0600
GMTED_mn	11.1734	13.5347	122.409	3.9414	49.3900
GMTED_md	11.2832	13.6356	125.391	4.0230	49.6954
SRTM (C-SIR)	5.4018	7.1400	68.6760	2.3939	29.2800
Участок “test3”					
GMTED_be	0.1064	0.1031	13.9966	0.1014	0.4246
GMTED_mn	0.0802	0.0836	11.1997	0.06315	0.3595
GMTED_md	0.0815	0.0891	11.7263	0.06316	0.3676
SRTM (C-SIR)	0.2936	0.2189	22.96	0.2670	0.8972
Участок “test4”					
GMTED_be	0.7882	1.0527	18.0309	0.4189	5.3112
GMTED_mn	0.6152	0.8018	15.1918	0.3218	3.9300
GMTED_md	0.6285	0.8421	15.5465	0.3219	4.1709
SRTM (C-SIR)	0.5936	0.6312	25.6433	0.4961	3.3564

Примечание. GMTED_be – вариант “Breakline emphasis” ГЦМР GMTED2010 GMTED_mn – вариант “MEAN” ГЦМР GMTED2010 GMTED_md – вариант “MEDIAN” ГЦМР GMTED2010 SRTM (C-SIR) – ГЦМР шагом 1 угловая секунда полученная на основе данных “SRTM” радара C-SIR.

моделей SRTM(C-SIR) и GMTED2010 в пределах горных территорий (“test2”) и пластово-аккумулятивных равнин и низменностей (“test3”) много больше, чем отличия обусловленные использованием различных вариантов модели GMTED2010.

Поэтому мы считаем не целесообразным использование “GMTED2010” в пределах горных территорий, пластово-аккумулятивных равнин и низменностей юга ЕТР.

ВЫВОДЫ

В ходе проведенного исследования было установлено, что наиболее схожие значения ЭПР, получаются при использовании варианта модели “GMTED2010” – MEAN и модели SRTM C-SIR. При этом необходимо отметить, что все варианты модели GMTED2010 в пределах умеренно расчлененных равнин имеют относительно небольшие ошибки (7–54%), сопоставимые с ошибками полевых исследований эрозионных потерь почвы. Полученные ошибки ГЦМР GMTED2010 в пределах горных территорий или пластово-аккумулятивных равнин и низменностей имеют значительно большие ошибки ЭПР (68–322%), что, на наш взгляд, не позволяет ее использовать для модельной оценки почвенной эрозии в пределах данных типов рельефа.

В пределах умеренно расчлененных равнин различия ЭПР полученных с использованием вариантов модели GMTED2010 сопоставимы с различиями, обусловленными

влиянием шага сетки. В пределах горных территорий и пластово-аккумулятивных равнин и низменностей отличия ЭПР намного сильнее при использовании моделей разного разрешения, чем при использовании различных вариантов модели GMT-ED2010.

Среди всех рассмотренных методик для всех тестовых участков наименьшие значения ЭПР свойственны методике предложенной Г.А. Ларионовым. Наибольшие значения ЭПР получаются либо с использованием методики USLE либо с использованием методики предложенной И.Д. Муром и Дж.Л. Найбером.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-17-00025, <https://rscf.ru/project/22-17-00025/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ашаткин И.А., Мальцев К.А., Гайнутдинова Г.Ф., Усманов Б.М., Гафуров А.М., Ганиева А.Ф., Мальцева Т.С., Гиззатуллина Э.Р. Анализ морфометрии рельефа по глобальным ЦМР в пределах южной части Европейской территории России. // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. Науки, 2020. Т. 162. вып. 4. С. 612–628. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2020.4.612-628>
2. Ермолаев О.П., Мальцев К.А., Мухарамова С.С., Харченко С.В., Веденеева Е.А. Картографическая модель речных бассейнов европейской России // География и природные ресурсы. 2017. Вып. 2. С. 27–36.
3. Кондратьева М.А., Чащин А.Н. Оценка эрозийной опасности рельефа на основе цифрового моделирования // ИнтерКарто, ИнтерГИС. 2021. Т. 27, вып. 2. С. 241–252. <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2021-2-27-241-252>
4. Ларионов Г.А. Эрозия и дефляция почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1993. 200 с.
5. Национальный атлас почв Российской Федерации. Под ред. С.А. Шобы. М. Астрель, 2011. 632 с.
6. Национальный атлас России. Том 2 (Природа.Экология). Под ред. Левитина И.Е. М.: Роскартография, 2007. 495 с.
7. Оньков И.В. Оценка точности высот SRTM для целей ортотрансформирования космических снимков высокого разрешения // Геоматика. 2011. Вып. 3. С. 40–46.
8. Почвенно-эрозийная карта СССР. Масштаб 1 : 5000000. Под ред. С.С. Соболева. М.: ГУГК, 1968.
9. Украинский П.А., Буряк Ж.А. К постановке опыта по поиску оптимальной формулы расчета эрозийного потенциала рельефа // Фундаментальные основы создания систем земледелия с целью сохранения и воспроизводства окружающей среды: Материалы Всероссийской школы молодых ученых. Белгород, 2018. С. 214–218.
10. Флоринский И.В. Геоморфометрия сегодня. ИнтерКарто, ИнтерГИС. 2021. Т. 27. вып. 2. С. 394–447. <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2021-2-27-394-448>
11. Bayik Ç., Becek K., Mekik Ç., Özendi M. On the vertical accuracy of the ALOS world 3D-30m digital elevation model // Remote Sens. Lett. 2018. V. 9. № 6. P. 607–615. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2018.1453174>
12. Borrelli P., Alewell C., Alvarez P. Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis // Science of The Total Environment. 2021. № 780.146494. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146494>
13. Carabajal C.C., Harding D.J., Boy Jean-Paul, Danielson J.J., Gesch D.B., Suchdeo V.P. Evaluation of the Global Multi-Resolution Terrain Elevation Data 2010 (GMTED2010) using ICESat geodetic control", Proc. SPIE 8286, International Symposium on Lidar and Radar Mapping 2011: Technologies and Applications, 82861Y (24 October 2011); <https://doi.org/10.1117/12.912776>
14. Dabney S.M., Yoder D.C., Vieira D.A.N. The application of the Revised Universal Soil Loss Equation, Version 2, to evaluate the impacts of alternative climate change scenarios on runoff and sediment yield // Journal of Soil and Water Conservation. 2012. № 67. P. 343–353. <https://doi.org/10.2489/jswc.67.5.343>
15. Danielson J.J., Gesch D.B. Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010(GMTED2010) (No. Open-File Report 2011–1073). Reston: U.S. Geological Survey 2011. <https://doi.org/10.3133/ofr20111073>

16. *Desmet P.J.J., Govers G.A* GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units // *Journal of Soil and Water Conservation*. 1996. № 51. P. 427–433.
17. *Krasilnikov P., Makarov O., Alyabina I., Nachtergaele F.* Assessing soil degradation in northern Eurasia // *Geoderma Regional*. 2006. № 7. P. 1–10.
<https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2015.11.002>
18. *Lindsay J.B., Creed I.F.* Distinguishing actual and artefact depressions in digital elevation data // *Computers & Geosciences*. 2006. № 32. P. 1192–1204.
<https://doi.org/10.1016/j.cageo.2005.11.002>
19. *Maltsev K., Yermolaev O.* Assessment of soil loss by water erosion in small river basins in Russia // *CATENA*. 2020. № 195. 104726.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104726>
20. *Moore I.D., Nieber J.L.* Landscape assessment of soil erosion and nonpoint source pollution // *J. Minn. Acad. Sci.* 1989. N 55. P. 18–25.
21. *Nachtergaele F.O., Petri M., Biancalani R., van Lynden G., van Velthuisen H., Bloise M.* Global Land Degradation Information System (GLADIS), an information database for land degradation assessment at global level. Version 1.0. Rome, 2011.
22. *Phinzi K., Ngetar N.S.* The assessment of water-borne erosion at catchment level using GIS-based RUSLE and remote sensing: A review // *International Soil and Water Conservation Research*. 2019. № 7. P. 27–46.
23. *Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., McCool D.K., Yoder D.C.* Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Washington: U.S. Government Printing Office, 1997. 384 p.
24. *Reuter H.I., Nelson A., Strobl P., Mehl W., Jarvis A.* A first assessment of Aster GDEM tiles for absolute accuracy, relative accuracy and terrain parameters // *IEEE Int. Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 2009. № 5. P. 240–243.
<https://doi.org/10.1109/IgARSS.2009.5417688>
25. *Tan M.L., Ficklin D.L., Dixon B., Ibrahim A.L., Yusop Z., Chaplot V.* Impacts of DEM resolution, source, and resampling technique on SWAT-simulated streamflow // *Applied Geography*. 2015. № 63. P. 357–368.
<https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.07.014>
26. *Thomas J., Prasannakumar V., Vineetha P.* Suitability of spaceborne digital elevation models of different scales in topographic analysis: an example from Kerala, India. // *Environmental Earth Sciences*. 2015. № 73. P. 1245–1263.
<https://doi.org/10.1007/s12665-014-3478-0>
27. *Van Oost K., Quine T.A., Govers G., De Gryze S., Six J., Harden J.W., Ritchie J.C., McCarty G.W., Heckrath G., Kosmas C., Giraldez J.V., Marques Da Silva J.R., Merckx, R.* The impact of agricultural soil erosion on the global carbon cycle // *Science*. 2007. № 80. P. 626–629.
<https://doi.org/10.1126/science.1145724>
28. *Verstraeten G., Oost K., Rompaey A.* Evaluating an integrated approach to catchment management to reduce soil loss and sediment pollution through modelling // *Soil Use and Management*. 2006. № 18. P. 386–394.
<https://doi.org/10.1079/SUM2002150>
29. *Wischmeier W.H., Smith D.D.* Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. Washington: U.S. Government Printing Office, 1978. 67 p.

Quality Analysis of the Global Digital Relief Model GMTED2010 for Evaluation of the Erosion Potential (on the Example of the South of the European Territory of Russia)

K. Maltsev*

Kazan Federal University, Kazan, Russia

*E-mail: mlcvkirill@mail.ru

Abstract—The article presents a quantitative analysis of differences in the calculation of the LS-factor arising from the use of various options for the global digital elevation model GMTED2010: “Mean”; “Breakline emphasis”; “Median”. The global digital elevation model SRTM (C-SIR radar) was used as a reference for comparative analysis. In addition, an assessment of differences between values of LS-factor obtained by various methods was made. In this case, 4 methods for calculating the LS-factor were used, proposed in the: USLE method; RUSLE method; methodology proposed by the Research Laboratory of Soil Erosion and Channel Processes of Moscow State University, methodology published by Moore I.D. and Nieber J.L. in 1989. The analysis was carried out within 4 test areas reflecting the

main types of relief in the south of the European territory of Russia. It has been established that the closest results in the calculation of the LS-factor to the SRTM C-SIR model are given by the variant of the model GMTED2010 "MEAN". The errors arising between the SRTM C-SIR and GMTED2010 "MEAN" models within moderately dissected plains are 7–54%, where most of the arable land is located. At the same time, errors within mountainous areas or stratal-accumulative plains and lowlands are 68–322%. An analysis of the use of various formulas for calculating the LS-factor shows that within all test areas the lowest values are obtained using the methodology proposed by the Research Laboratory of Soil Erosion and Channel Processes of Moscow State University. and the highest values using USLE, or using the methodology proposed by Moore I.D. and Nieber J.L.

Keywords: LS-factor, GIS, DEM, GMTED2010, SRTM

REFERENCES

1. Ashatkin I.A., Maltsev K.A., Gainutdinova G.F., Usmanov B.M., Gafurov A.M., Ganieva A.F., Maltseva T.S., Gizzatullina E.R. Analysis of relief morphometry by global DEM in the southern part of the European territory of Russia // *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estvennyye Nauki*. 2020. T. 162. Vyp. 4. S. 612–628.
<https://doi.org/10.26907/2542-064X.2020.4.612-628>
2. Ermolaev O.P., Mal'tsev K.A., Mukharamova S.S., Kharchenko S.V., Vedeneeva E.A. Cartographic model of river basins of European Russia // *Geography and Natural Resources* April 2017. T. 38. Vyp. 2. P. 131–138.
[https://doi.org/10.21782/GiPR0206-1619-2017-2\(27-36\)](https://doi.org/10.21782/GiPR0206-1619-2017-2(27-36))
3. Kondrateva M.A., Chashchin A.N. Assessment of erosion risk of relief based on the digital modeling InterCarto. InterGIS // *GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference*. Moscow: MSU, Faculty of Geography. 2021. T. 27. Vyp. 2. S. 241–252.
<https://doi.org/10.35595/2414-9179-2021-2-27-241-252>
4. Larionov G.A. Eroziya i deflyatsiya pochv: osnovnyye zakonomernosti i kolichestvennyye otsenki. Moscow: MGU Publ., 1993. 200 s.
5. *Natsional'nyy atlas pochv Rossiyskoy Federatsii*. Pod red. S.A. Shoby. M. Astrel', 2011. 632 s.
6. *Natsional'nyy atlas Rossii. Tom 2 (Priroda. Ekologiya)*. Pod red. Levitina I.Ye. M.: Roskartografiya, 2007. 495 s.
7. On'kov I.V. Otsenka tochnosti vysot SRTM dlya tseley ortotransformirovaniya kosmicheskikh snimkov vysokogo razresheniya // *Geomatika*. 2011. Vyp. 3. S. 40–46.
8. *Pochvenno-erozionnaya karta SSSR. Masshtab 1 : 5000000*. Pod red. S.S. Soboleva. M.: GUGK, 1968.
9. Ukrainskiy P.A., Buryak ZH.A. K postanovke opyta po poisku optimal'noy formuly rascheta erozionnogo potentsiala rel'yefa // *Fundamental'nyye osnovy sozdaniya sistem zemledeliya s tsel'yu sokhraneniya i vosproizvodstva okruzhayushchey sredy: Materialy Vserossiyskoy shkoly molodykh uchenykh*. Belgorod, 2018. S. 214–218.
10. Florinskiy I.V. Geomorfometriya segodnya. InterKarto, InterGIS. 2021. T. 27. Vyp. 2. S. 394–447.
<https://doi.org/10.35595/2414-9179-2021-2-27-394-448>
11. Bayik Ç., Becek K., Mekik Ç., Özendi M. On the vertical accuracy of the ALOS world 3D-30m digital elevation model // *Remote Sens. Lett.* 2018. V. 9. № 6. P. 607–615.
<https://doi.org/10.1080/2150704X.2018.1453174>
12. Borrelli P., Alewell C., Alvarez P. Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis // *Science of The Total Environment*. 2021. № 780.146494.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146494>
13. Carabajal C.C., Harding D.J., Boy Jean-Paul, Danielson J.J., Gesch D.B., Suchdeo V.P. Evaluation of the Global Multi-Resolution Terrain Elevation Data 2010 (GMTED2010) using ICESat geodetic control", *Proc. SPIE 8286, International Symposium on Lidar and Radar Mapping 2011: Technologies and Applications, 82861Y (24 October 2011)*.
<https://doi.org/10.1117/12.912776>
14. Dabney S.M., Yoder D.C., Vieira D.A.N. The application of the Revised Universal Soil Loss Equation, Version 2, to evaluate the impacts of alternative climate change scenarios on runoff and sediment yield // *Journal of Soil and Water Conservation*. 2012. № 67. P. 343–353.
<https://doi.org/10.2489/jswc.67.5.343>
15. Danielson J.J., Gesch D.B. *Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010 (GMTED2010)* (No. Open-File Report 2011–1073). Reston: U.S. Geological Survey 2011.
<https://doi.org/10.3133/ofr20111073>

16. Desmet P.J.J., Govers G.A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units // *Journal of Soil and Water Conservation*. 1996. № 51. P. 427–433.
17. Krasilnikov P., Makarov O., Alyabina I., Nachtergaele F. Assessing soil degradation in northern Eurasia // *Geoderma Regional*. 2006. № 7. P. 1–10.
<https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2015.11.002>
18. Lindsay J.B., Creed I.F. Distinguishing actual and artefact depressions in digital elevation data // *Computers & Geosciences*. 2006. № 32. P. 1192–1204.
<https://doi.org/10.1016/j.cageo.2005.11.002>
19. Maltsev K., Yermolaev O. Assessment of soil loss by water erosion in small river basins in Russia // *CATENA*. 2020. № 195. 104726.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104726>
20. Moore I.D., Nieber J.L. Landscape assessment of soil erosion and nonpoint source pollution // *J. Minn. Acad. Sci.* 1989. № 55. P. 18–25.
21. Nachtergaele F.O., Petri M., Biancalani R., van Lynden G., van Velthuisen H., Bloise M. Global Land Degradation Information System (GLADIS), an information database for land degradation assessment at global level. Version 1.0. Rome, 2011.
22. Phinzi K. Ngetar N.S. The assessment of water-borne erosion at catchment level using GIS-based RUSLE and remote sensing: A review // *International Soil and Water Conservation Research*. 2019. № 7. P. 27–46.
23. Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., McCool D.K., Yoder D.C. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Washington: U.S. Government Printing Office, 1997. 384 p.
24. Reuter H.I., Nelson A., Strobl P., Mehl W., Jarvis A. A first assessment of Aster GDEM tiles for absolute accuracy, relative accuracy and terrain parameters // *IEEE Int. Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 2009. № 5. P. 240–243.
<https://doi.org/10.1109/IgARSS.2009.5417688>
25. Tan M.L., Ficklin D.L., Dixon B., Ibrahim A.L., Yusop Z., Chaplot V. Impacts of DEM resolution, source, and resampling technique on SWAT-simulated streamflow // *Applied Geography*. 2015. № 63. P. 357–368.
<https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.07.014>
26. Thomas J., Prasannakumar V., Vineetha P. Suitability of spaceborne digital elevation models of different scales in topographic analysis: an example from Kerala, India. // *Environmental Earth Sciences*. 2015. № 73. P. 1245–1263.
<https://doi.org/10.1007/s12665-014-3478-0>
27. Van Oost K., Quine T.A., Govers G., De Gryze S., Six J., Harden J.W., Ritchie J.C., McCarty G.W., Heckrath G., Kosmas C., Giraldez J.V., Marques Da Silva J.R., Merckx, R.. The impact of agricultural soil erosion on the global carbon cycle // *Science*. 2007. № 80. P. 626–629.
<https://doi.org/10.1126/science.1145724>
28. Verstraeten G., Oost K., Rompaey A. Evaluating an integrated approach to catchment management to reduce soil loss and sediment pollution through modelling // *Soil Use and Management*. 2006. № 18. P. 386–394.
<https://doi.org/10.1079/SUM2002150>
29. Wischmeier W.H., Smith D.D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. Washington: U.S. Government Printing Office, 1978. 67 p.