

УДК 551.4.013

ЦИФРОВЫЕ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В РАСЧЁТАХ ТЕМПОВ СМЫВА ПОЧВ НА ПАХОТНЫХ ЗЕМЛЯХ

К.А. Мальцев¹, В.Н. Голосов^{2,3}, А.М. Гафуров¹

¹*Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, 420008, Россия*

²*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
г. Москва, 119991, Россия*

³*Институт географии РАН г. Москва, 119017, Россия*

Аннотация

В статье представлены результаты оценки точности глобальных цифровых моделей рельефа (ЦМР) SRTM C-SIR и ASTER GDEM на примере малого водосбора, расположенного на восточном склоне Среднерусской возвышенности в верховьях бассейна р. Ведуги. Анализ ошибок морфометрических показателей был выполнен на основе сравнения части глобальных ЦМР SRTM C-SIR и ASTER GDEM, представляющих рельеф выбранного водосбора, с заведомо более точными данными, в качестве которых выступали оцифрованные карты масштаба 1:10 000 (ТОПО). В качестве морфометрических показателей для оценки точности моделей брались значения уклонов и длин склонов, поскольку они используются в моделях, рассчитывающих потенциальные потери почвы от водной эрозии. Из результатов сопоставления следует, что модель SRTM в большей мере соответствует модели ТОПО, чем модель ASTER GDEM. Поэтому тестируемая версия модели SRTM предпочтительнее при проведении расчётов не только для определения среднегодовых темпов смыва почв для речного бассейна, но и для создания карт интенсивности эрозии почв на склонах.

Ключевые слова: эрозия, цифровая модель рельефа, SRTM, ASTER, ГИС, малая долина

Введение

Водная эрозия является основным процессом денудации в пределах суши и одновременно основным механизмом латеральной миграции загрязняющих веществ, транспортируемых совместно с наносами [1–3]. В этой связи вопросам количественной оценки её интенсивности и пространственного распространения в пределах объектов различного масштаба от малого водосбора до континента, на основе эрозионного моделирования, уделяется большое внимание [4]. Фактор рельефа играет важную роль как при количественных оценках интенсивности эрозионных процессов, так и при построении карт интенсивности смыва, полученных на основе расчётов по эрозионным моделям, интегрированным в геоинформационные системы (ГИС) [5, 6]. В качестве основных параметров рельефа, используемых при расчётах, берутся длина и уклон склона, а также их комбинированные показатели [3, 7, 8]. Вместо длины склонов используют

также площадь области поступления материала (S_{se}) в расчётную точку склона [9], что позволяет учитывать эффект нарастания площади, с которой собирается сток по мере удаления от водораздела линий тока.

В случаях применения ГИС совместно с эрозионными моделями для расчёта морфометрических характеристик в настоящее время используют цифровые модели рельефа (ЦМР), чаще всего построенные на регулярной растровой основе. При этом ЦМР могут быть получены исследователями самостоятельно с помощью самых разнообразных данных и методик [10–12]. Можно также приобрести готовые ЦМР на исследуемую территорию: TanDEM-X WorldDEM [13]; NextMap World 10 и World 30; ALOS AW3D [14] и некоторые другие. Перечисленные подходы требуют материальных и/или дополнительных временных затрат, поэтому часто исследователи используют глобальные ЦМР, которые распространяются свободно. Среди них самыми востребованными среди большинства исследователей на сегодняшний день являются модели рельефа, полученные в ходе выполнения миссий SRTM и ASTER.

Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (далее – ASTER) – усовершенствованный спутниковый радиометр теплового излучения и отражения. На основе сопоставления стереоснимков была создана глобальная цифровая модель рельефа (ASTER GDEM). Охват съёмки миссии ASTER покрывает территорию между 83° северной и южной широт фрагментами с разрешением 1", что примерно равняется 30 м. В настоящее время существует вторая версия модели ASTER GDEM v.2 [15]. Именно вторая версия модели [16] была использована нами для анализа.

Радарная топографическая съёмка Shuttle Radar Topographic Mission (далее – SRTM) – глобальная ЦМР с разрешением 1" и 3". ЦМР SRTM покрывает территорию, расположенную между 60 градусами северной и 56 градусами южной широт. Съёмка проводилась в период с 11 по 22 февраля 2000 г с помощью SIR-C- и X-SAR-сенсоров, работающих по технологии радиолокационного синтезирования апертуры. Эта технология позволяет получить радиолокационное изображение поверхности изучаемого объекта независимо от метеорологических условий и освещённости местности. В отличие от SIR-C, имеющего длину волны 5.6 см и почти не имеющего разрыва в данных, X-SAR-сенсор с длиной волны 3.1 см имеет существенные пробелы в представлении рельефа территорий [17]. Именно по этой причине глобальная ЦМР, созданная на основе сенсора SIR-C, используется исследователями намного чаще. Для последующего сравнительного анализа нами была использована глобальная ЦМР SRTM SIR-C [16].

Все версии моделей SRTM и ASTER GDEM распространяются с использованием географических координат на основе референц-эллипсоида WGS84.

Основной характеристикой ЦМР, которая определяет точность производных морфометрических величин, является ошибка определения абсолютной высоты. Выполнено довольно много сравнительных исследований ошибок определения высот с помощью различных версий моделей SRTM ASTER GDEM на участках, расположенных в разных регионах мира.

Сопоставлять данные различных исследований довольно сложно в силу следующих причин:

- разные версии тестируемых моделей SRTM и ASTER GDEM;

- разные виды проверочных данных;
- разные типы ландшафтов и землепользования тестируемых участков;
- разные методики оценки ошибок высот.

В то же время можно сказать, что вне зависимости от рассматриваемой глобальной ЦМР и проведенных исследований средние ошибки по высоте в большинстве исследований колеблются от долей метра до 10–11 м по модулю [17–26].

Чаще оценивалась точность для 2-й версии модели ASTER GDEM и ряда версий модели SRTM, имеющих шаг сетки 3". Большая часть оценок была выполнена для горной сильно расчлененной местности. Точность модели SRTM, имеющей разрешение 1", анализировалась только в трёх случаях: два из них относились к горной территории [19, 20] и один – к равнине [27].

Средние же ошибки уклонов, вычисляемых для различных регионов мира по ЦМР ASTER GDEM, варьируются от -1.21° до 4.73° , а для SRTM – от -2.54° до 7.37° [20–22, 28–31].

Так же, как и в случае с высотами, чаще всего точность определения уклонов оценивалась для второй версии модели ASTER GDEM и разных вариантов модели SRTM, имеющих разрешение 3". Можно сделать вывод о том, что ошибки уклонов, взятые по модулю в модели ASTER GDEM, ниже, чем в модели SRTM [20–22, 28–31]. Только в ряде исследований проведена оценка точности определения уклонов по модели SRTM, имеющей разрешение 1", где установлено, что ошибка уклонов этой версии модели SRTM намного меньше. Так, результаты оценок, выполненных для территории Македонии, показывают, что при применении версии модели SRTM, имеющей пространственное разрешение 1", ошибка становится намного меньше, чем в модели ASTER GDEM [30]. К аналогичному выводу приходят авторы исследования, выполненного в Тибете [20]. При этом, согласно этим исследованиям, модель SRTM с разрешением 1", имеет тенденцию к занижению уклонов, а модель ASTER GDEM – к завышению уклонов в сравнении с результатами, полученными в [20].

Для равнинных территорий умеренного климатического пояса сопоставление точности ЦМР SRTM, имеющей разрешение 1", и второй версии модели ASTER GDEM (ASTER GDEM v.2) для оценок темпов смыва почвы и его пространственного распространения по площади до настоящего времени не проводилось. В настоящем исследовании анализируются результаты оценок точности данных моделей и возможность их использования для целей крупномасштабного картографирования темпов смыва.

Объект и методы

В качестве тестового участка был выбран водосбор первого порядка, расположенный на восточном склоне Среднерусской возвышенности в верховьях бассейна р. Ведуги, являющейся правобережным притоком р. Дон. Водосбор расположен в 25 км северо-западнее г. Воронеж в Семилукском районе Воронежской области, его площадь составляет 0.89 км^2 с перепадом высот 41 м, при средней высоте 175 м. Почти все склоны водосбора используются в качестве пашни. Координаты центра исследуемого водосбора: 51.762° с.ш. и 38.590° в.д. Для территории в последние десятилетия характерны умеренно холодная зима

и тёплое лето с годовым слоем осадков 550–600 мм при достаточно высокой вариабельности по годам. Почвы междуречных склонов представлены черноземами типичными и выщелоченными разной степени смытости, сформированными на покровных и делювиальных лессовидных суглинках [32]. Эрозия почв наблюдается преимущественно при выпадении сильных ливней и в отдельные годы в период весеннего снеготаяния. Её интенсивность в пределах бассейна р. Ведуги варьирует в зависимости от конфигурации склонов и склоновых водосборов в интервале 1.5–10 т/га в год согласно данным, полученным на основе ряда независимых методов [33, 34].

Анализ ошибок морфометрических показателей был выполнен на основе сравнения части глобальных ЦМР SRTM C-SIR и ASTER GDEM v.2, представляющих рельеф выбранного водосбора с заведомо более точными данными. В качестве таковых были использованы оцифрованные векторные данные с топографической карты масштаба 1:10 000: горизонтали, точки отметок высот, положение водоемов, границы бровок линейных эрозионных форм. Для сопоставления использовалась только склоновая распахиваемая часть водосбора. Высотная погрешность на топографических картах масштаба 1:10 000 составляет 1/3–1/4 высотного сечения горизонталей [35]. Поскольку высота сечения на картах масштаба 1:10 000 составляет 1 м, погрешности составляют от 0.25 до 0.33 м, что заметно ниже погрешностей при определении высот глобальных ЦМР SRTM и ASTER GDEM.

На основе топографической карты была построена ЦМР (далее – ТОПО) с использованием программного продукта ArcGIS, где реализована методика М. Хатчинсона [36]. Этот метод интерполяции в среднем не привносит ошибок в ЦМР больше, чем их было на топографической карте [11]. Шаг регулярной растровой сетки для построения ЦМР был выбран равным 5 м. Данный шаг был выбран исходя из требований [35, п. 1.7-а]: «при создании карт (планов) равнинных, всхолмленных и пустынных районов с преобладающими уклонами местности до 6°», средние погрешности в положении на карте (плане) предметов и контуров местности составляют 0.5 мм. Соответственно, положение предметов и контуров местности, определенных с использованием карты масштаба 1:10 000, имеет плановую погрешность в 5 м. Шаг сетки более 5 м мог привести дополнительные ошибки в ЦМР, а шаг сетки менее 5 м не позволит, на наш взгляд, избавиться от ошибок, которые уже есть в исходных данных при увеличении объема обрабатываемых данных. Поэтому нами был выбран шаг сетки, равный погрешности планового положения на топографической карте. Все три ЦМР были приведены в единую систему координат.

На основе трех ЦМР, представляющих рельеф одной и той же территории, были вычислены три морфометрических показателя, использующихся для вычисления фактора рельефа: это уклон, длина склонов, площадь области поступления материала (S_{se}). Все три показателя были рассчитаны в программном комплексе ArcGIS.

Для расчета уклонов была использована формула [37]:

$$S = \frac{180}{\pi} \arctg \left(\sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2} \right),$$

где $\partial z / \partial x$ и $\partial z / \partial y$ – частные производные вдоль координатных осей, которые рассчитываются по формулам

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{(z_3 + 2z_6 + z_9) - (z_1 + 2z_4 + z_7)}{8\Delta x}$$

и

$$\frac{\partial z}{\partial y} = \frac{(z_7 + 2z_8 + z_9) - (z_1 + 2z_2 + z_3)}{8\Delta y},$$

где Z_1, Z_2, \dots, Z_9 – значения высот в узлах регулярной сетки цифровой модели рельефа, Δx – шаг сетки по X , Δy – шаг сетки по Y .

В результате расчетов были получены три модели уклонов. Для последующего анализа были вычислены разности моделей уклонов с использованием формулы

$$\Delta A = A_{\text{ТОПО}} - A_{\text{GDEM}},$$

где ΔA – разность углов наклона; A_{GDEM} – углы наклона на глобальных моделях SRTM или ASTER GDEM; $A_{\text{ТОПО}}$ – углы наклона на ЦМР, построенной по данным с топографической карты; и проведен статистический анализ результатов.

Все морфометрические показатели, рассчитанные на основе глобальных ЦМР SRTM и ASTER GDEM, также были приведены к пространственному разрешению 5 м для того, чтобы иметь возможность выполнять алгебраические операции, необходимые для сравнения различных ЦМР и выполнения сравнительного статистического анализа. При этом был использован метод пространственной интерполяции «ближайший сосед», который позволяет выполнить пространственную интерполяцию без изменения значений анализируемой функции в исходных моделях [42].

Длина склонов была оценена на основе такого показателя, как длина линий тока. Длина линий тока с использованием ГИС может быть рассчитана по-разному [38]. Нами в настоящей работе использовался показатель, который вычисляет длину вдоль направлений потоков от водораздела до текущего узла сетки. Были получены три модели длин линий тока, на основе которых были вычислены статистические показатели выборок трех цифровых моделей длин линий тока, а также были построены гистограммы частот. Для этого анализа была использована классификация длин склонов [39], состоящая из 8 градаций. К этой классификации мы добавили еще одну градацию – территории, имеющие длину склонов, равную нулю. Эти территории мы условно называем «локальными водоразделами», под которыми подразумеваем территории, с которых поток вещества начинается и не принимает на себя поток вещества (например, стекающей воды и влекомых почвенных частиц) с вышерасположенных территорий.

S_{se} представляет собой суммарную водосборную площадь для текущего узла регулярной растровой сетки [40, 41]. Для трёх моделей нами были вычислены показатели S_{se} , выполнен их статистический анализ и построены гистограммы частот для следующих интервалов площади: 0–100; 100–250; 250–1000; 1000–10000; 10000–100000; более 100000 м².

Оценка потерь почвы со склонов исследованного водосбора была выполнена с использованием модифицированного универсального уравнения эрозии почв и модели ГГИ [7] и с применением их программной реализации, разработанной

С.Ф. Красновым. Расчёт смыва производился для условий чёрного пара. Для сопоставления полученных результатов был использован элементарный статистический анализ, а также построенные на основе карт смыва гистограммы распределения площади пашни на водосборе с различными расчётными темпами смыва.

Результаты и их обсуждение

Результаты сравнительного анализа разностей углов наклона всего участка исследования показывают, что модель рельефа SRTM C-SIR имеет существенно меньшие ошибки уклонов, чем модель рельефа ASTER GDEM v.2 (табл. 1).

Табл. 1

Статистические показатели выборки разностей углов наклона (град.) для склонов междуречий тестируемого малого водосбора, олученные на основе глобальных ЦМР SRTM и ASTER

| Статистические показатели | SRTM | ASTER |
|---------------------------------------|-------|--------|
| Объем выборки, <i>n</i> | 35657 | 35657 |
| Средняя ошибка | -0.39 | -7.23 |
| Средняя абсолютная ошибка | 1.01 | 7.37 |
| Стандартное отклонение (по модулю) | 1.07 | 6.38 |
| Абсолютное значение 90%-ного квантиля | 3.14 | 15.15 |
| Абсолютное значение 95%-ного квантиля | 5.10 | 19.39 |
| Минимальное значение разности | -6.74 | -45.91 |
| Максимальное значение разности | 12.13 | 8.36 |

Так, например, суммы положительных и отрицательных ошибок в модели SRTM почти равны, что даёт среднюю ошибку, близкую к нулю (табл. 1). В то же время в модели ASTER GDEM средняя ошибка составляет -7.23° , что свидетельствует о завышении в модели ASTER GDEM углов наклона для равнинных территорий. Самое большое значение отклонения уклонов в модели ASTER GDEM для данной территории составляет 45.91° , тогда как в модели SRTM оно составляет около 12° .

Статистические показатели, вычисленные по абсолютной величине разности, также показывают меньшие ошибки в модели SRTM по сравнению с моделью ASTER GDEM. Средняя ошибка, вычисленная по модулю в модели SRTM, почти в 7 раз ниже, чем в модели ASTER GDEM (табл. 1). Стандартное отклонение, оценивающее разброс значений ошибки относительно среднего, в модели SRTM в 6 раз ниже, чем в модели ASTER GDEM.

Выборка длин линий тока для каждой из рассматриваемых моделей была описана набором элементарных статистических показателей, которые представлены в табл. 2 и на рис. 1. Анализ средних значений длин линий тока не позволяет выявить существенных различий между тремя анализируемыми моделями. Очень схожие между собой значения также демонстрирует показатель 90%-ного квантиля. Остальные показатели: максимум, стандартное отклонение, 95%-ный квантиль – указывают на большие различия между разными моделями. Но при этом в целом можно говорить о большем сходстве длин линий тока, вычисленных на основе модели SRTM, с длинами линий тока, вычисленными по модели ТОПО.

Табл. 2

Статистические показатели длин склонов междуречий тестируемого малого водосбора, полученные на основе ЦМР ТОПО, SRTM и ASTER

| Статистический показатель | ТОПО, м | SRTM, м | ASTER, м |
|---------------------------|---------|---------|----------|
| Среднее | 77.64 | 73.55 | 81.78 |
| Максимум | 939.41 | 1657.11 | 2437.44 |
| Стандартное отклонение | 98.96 | 160.74 | 226.81 |
| 90%-ный квантиль | 189.71 | 185.355 | 191.4 |
| 95%-ный квантиль | 260.7 | 357.84 | 422.48 |

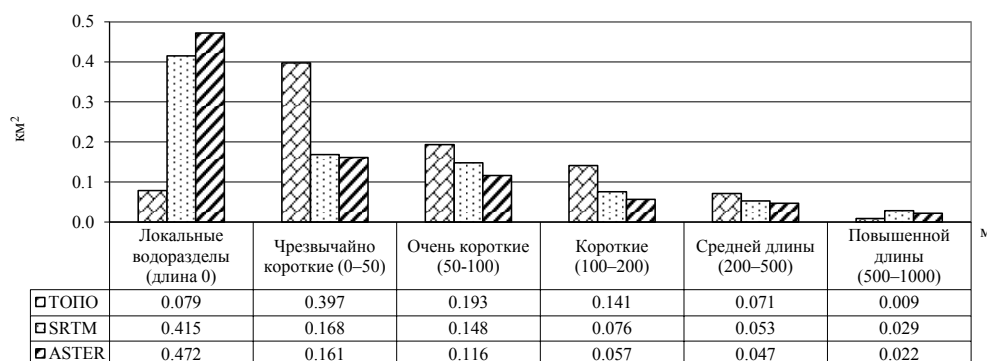


Рис. 1. Распределение площадей пахотных земель исследуемого водосбора по длинам склонов (в метрах) при использовании различных ЦМР

На рис. 1 представлены только шесть классов склонов длиной до 1000 м, поскольку склоны длиной более 1000 м на модели ТОПО отсутствуют. Модели SRTM и ASTER GDEM при рассмотрении склонов водосбора сильно завышают площади водораздельных пространств. Это завышение для исследуемого водосбора достигает 5 и более раз.

В то же время модели SRTM и ASTER GDEM несколько занижают площади, которые занимают чрезвычайно короткие; очень короткие; короткие склоны и склоны средней длины. При этом длины склонов, полученные с использованием модели SRTM, ближе к длинам склонов, полученным по ЦМР ТОПО, чем длины склонов, полученные по модели ASTER GDEM (рис. 1). При этом длинных склонов, очень длинных склонов и чрезвычайно длинных склонов в модели рельефа ТОПО нет вообще, тогда как при использовании моделей ASTER GDEM и SRTM они появляются. В целом тестируемая версия модели SRTM точнее отражает распределение длин линий тока по сравнению с моделью ASTER GDEM и позволяет получить близкие значения средней длины линий тока к значениям, полученным на основе ЦМР ТОПО. Но при этом использование модели SRTM не гарантирует отсутствия искажений при определении длин линий тока.

Средние значения площадей поступления материала с вышерасположенных склонов (S_{se}), которые были рассчитаны по ЦМР различной детальности, очень сильно различаются (табл. 3). Так, значения S_{se} , рассчитанные по моделям SRTM и ASTER GDEM, в 5–6 раз превышают среднее значение, рассчитанное по модели, созданной на основе топографической карты масштаба 1:10 000.

Табл. 3

Статистические показатели площадей поступления материала S_{se} (км^2) для склонов тестового водосбора, полученные на основе ЦМР ТОПО, SRTM и ASTER GDEM

| ЦМР | ТОПО | SRTM | ASTER |
|------------------------|--------|-------|-------|
| Среднее | 0.0012 | 0.008 | 0.015 |
| Максимум | 0.184 | 0.664 | 0.894 |
| Стандартное отклонение | 0.007 | 0.032 | 0.067 |
| 90%-ный квантиль | 0.0012 | 0.014 | 0.016 |
| 95%-ный квантиль | 0.0024 | 0.035 | 0.068 |

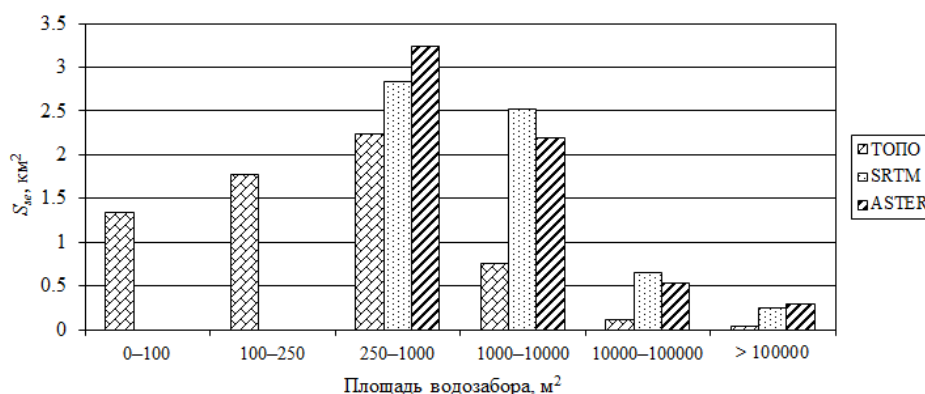


Рис. 2. Распределение пахотных земель исследуемого водосбора по площади области поступления материала (S_{se}) при использовании различных ЦМР

Остальные статистические показатели, характеризующие распределение площадей поступления материала с вышерасположенных склонов, также в разы, а иногда на порядок (90%-ный, 95%-ный квантили) выше при применении моделей ASTER GDEM v.2 и SRTM C-SIR, чем при применении модели, построенной на основе данных с топографической карты. На рис. 2 показано, чем вызваны такие различия. Из него видно, что при применении моделей SRTM и ASTER территорий, имеющих площадь поступления материала с вышерасположенных склонов в интервалах от 0 до 100 м^2 и от 100 до 250 м^2 , нет, тогда как во всех остальных интервалах эти показатели, полученные по моделям SRTM и ASTER GDEM, заметно превышают этот же показатель, полученный по ЦМР ТОПО. Такие различия обусловлены пространственной детальностью моделей рельефа SRTM и ASTER GDEM. Исходя из расстояния между узлами в регулярных сетках этих моделей площадь наименьшей территориальной единицы составляет около 600 м^2 , поэтому территорий, имеющих площадь поступления материала с вышерасположенных склонов меньше 600 м^2 , в этих моделях не может быть. Следовательно, при крупномасштабного картографирования проводить расчёты темпов смыва почвы с использованием показателя S_{se} , полученного с использованием моделей рельефа SRTM и ASTER GDEM, нельзя.

Из приведенных выше результатов сопоставления следует, что модель SRTM в большей мере соответствует модели ТОПО, чем модель ASTER GDEM, поэтому расчёты темпов смыва почв на пар были выполнены только на основе

Табл. 4

Статистические показатели темпов смыва почв (т/га в год), рассчитанных с использованием ЦМР разной детальности

| ЦМР | Среднее | Максимум | Стандартное отклонение | 90%-ный квантиль | 95%-ный квантиль |
|------|---------|----------|------------------------|------------------|------------------|
| ТОПО | 9.5 | 257.9 | 14.3 | 24.1 | 35.3 |
| SRTM | 7.9 | 141.8 | 13.7 | 25.5 | 37.2 |

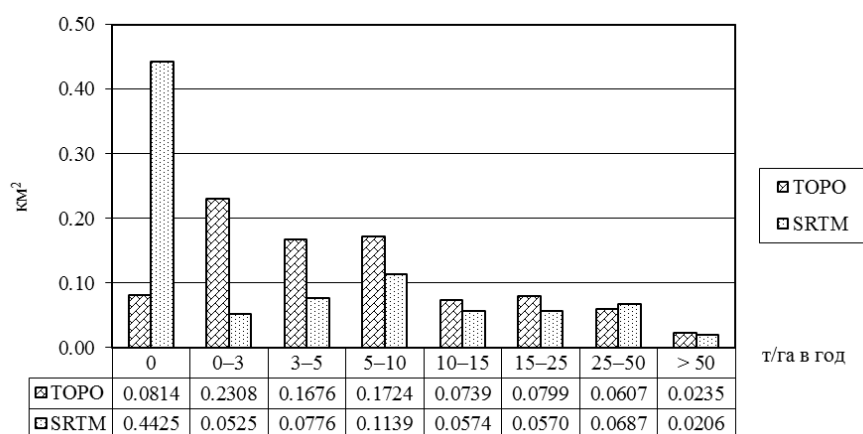


Рис. 3. Распределения площади пахотных земель исследуемого водосбора по интенсивности смыва почв (в т/га в год), рассчитанной по ЦМР SRTM и ТОПО

ЦМР SRTM C-SIR и ТОПО. Основные результаты представлены в табл. 4 и на рис. 3.

Использование модели рельефа SRTM для расчета потенциальных потерь почвы позволяет получить в среднем для водосбора немного заниженные, но близкие величины с аналогичными показателями, полученными по модели ТОПО (табл. 4). Однако соотношения площадей зон с различной интенсивностью смыва существенно отличаются друг от друга (рис. 3). Следовательно, применение тестируемой версии модели SRTM вполне допустимо для расчётов суммарных потерь почвы с пахотных склонов малых водосборов, но не может быть рекомендовано для использования при картировании темпов смыва почвы на картах крупного масштаба, так как в последнем случае будут слишком большие ошибки в расположении участков с различными темпами смыва. Основной причиной возникновения подобных ошибок является искусственное увеличение площади территорий с нулевыми значениями длины склона (табл. 2). Кроме того, в модели присутствуют заведомо грубые ошибки, доля которых невелика, но за счёт них возникают участки с аномально большими уклонами и длинами склонов (рис. 3), которые являются артефактами. Уже при среднемасштабном картографировании темпов смыва почв на основе расчётов по эрозионным моделям неизбежно происходит генерализация основных морфометрических характеристик, используемых при расчётах [4]. Поэтому тестируемая версия модели SRTM может быть успешно использоваться в расчётах не только для

определения среднегодовых темпов смыва почвы для речного бассейна, но и для создания карт интенсивности эрозии почв на склонах в среднем масштабе.

Полученные выводы подтверждаются результатами исследований в других регионах мира. Так, например, были проведены работы в центральной части Индии в пределах бассейна р. Нарманды по оценке потерь почвы с использованием USLE и таких глобальных ЦМР, как ASTER GDEM, SRTM и Cartosat, в сравнении с результатами натурных измерений. Исследования показали, что с помощью модели SRTM получается наиболее близкий к натурным измерениям результат, но так же, как и в наших исследованиях, получают заниженные по сравнению с натурными данными величины смыва [43].

К похожим выводам пришли и исследователи, выполнившие аналогичное сравнение в пределах Австралии на трех тестовых участках [44]. Было установлено, что модель SRTM дает заниженный результат при расчетах потерь почвы по сравнению с данными, опубликованными в [44]. При этом процент занижения изменяется от 10% до 40% в зависимости от участка исследования.

Оценки различий расчетных значений потерь почвы при применении ЦМР разной детальности (тахеометрическая съемка, топокарта масштаба 1:10 000 и топокарты масштаба 1:100 000) были выполнены для водосбора Грачёва лощина, расположенного в верховьях бассейна р. Воробжи, левого притока р. Сейм (бассейн Днепра) примерно в 20 км на юго-юго-восток от г. Курска. Установлено также снижение расчётных потерь почвы при использовании ЦМР более низкой детальности [45].

Заключение

Точность отображения рельефа слабо расчленённых склонов равнин центра Европейской части России цифровой моделью рельефа SRTM C-SIR достаточна для её использования при расчётах и картографировании эрозии почв в среднем масштабе на уровне малых речных бассейнов. Применение этой ЦМР на малых водосборах при крупномасштабных исследованиях допустимо только для расчётов средних по площади водосбора темпов эрозии. При этом наблюдается в среднем небольшое занижение темпов смыва почв при использовании модели SRTM C-SIR в сравнении с расчётами, выполненными на основе применения ЦМР, построенной по топографической карте масштаба 1:10 000. При использовании глобальных моделей рельефа для оценки потенциальных потерь почвы в крупном масштабе лучше использовать эрозионные модели, в которых для оценки вклада рельефа в качестве одного из параметров включена длина склонов, а не водосборную площадь S_{se} , для каждой индивидуальной точки расчёта, так как последняя сильно завышается при использовании глобальных ЦМР. Глобальная модель ASTER GDEM недостаточно точна для применения при расчётах интенсивности смыва почвы на уровне малых водосборов.

Благодарности. Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

Литература

1. *Walling D.E.* The sediment delivery problem // *J. Hydrol.* – 1983. – V. 65, No 1–3. – P. 209–237. – doi: 10.1016/0022-1694(83)90217-2.
2. *Lal R.* Soil degradation by erosion // *Land Degrad. Dev.* – 2001. – V. 12, No 6. – P. 519–539. – doi: 10.1002/ldr.472.
3. *Литвин Л.Ф.* География эрозии почв сельскохозяйственных земель России. – М.: Академкн., 2002. – 255 с.
4. *Karydas C.G., Panagos P., Gitas I.Z.* A classification of water erosion models according to their geospatial characteristics // *Int. J. Digital Earth.* – 2014. – V. 7, No 3. – P. 229–250. – doi: 10.1080/17538947.2012.671380.
5. *Merritt W.S., Letcher R.A., Jakeman A.J.* A review of erosion and sediment transport models // *Environ. Model. Software.* – 2003. – V. 18, No 8–9. – P. 761–799. – doi: 10.1016/S1364-8152(03)00078-1.
6. *Zhang Y., Degroote J., Wolter C., Sugumaran R.* Integration of modified universal soil loss equation (MUSLE) into a GIS framework to assess soil erosion risk // *Land Degrad. Dev.* – 2009. – V. 20, No 1. – P. 84–91. – doi: 10.1002/ldr.893.
7. *Ларионов Г.А.* Эрозия и дефляция почв. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1993. – 200 с.
8. *Баженова О.И., Любцова Е.М., Рыжов Ю.В., Макаров С.А.* Пространственно-временной анализ динамики эрозионных процессов на юге Восточной Сибири. – Новосибирск: Наука, 1997. – 208 с.
9. *Mitasova H., Hofierka J., Zlocha M., Iverson L.R.* Modeling topographic potential for erosion and depositing using GIS // *Int. J. Geogr. Inf. Syst.* – 1996. – V. 10, No 5. – P. 629–641. – doi: 10.1080/0269379960890210.
10. *Кошель С.М.* Моделирование рельефа по изолиниям // Университетская школа географической картографии. К 100-летию профессора К.А. Салищева / Ред. А.М. Берлянт. – М.: Аспект Пресс, 2005. – С. 198–208.
11. *Мальцев К.А.* Построение цифровых моделей рельефа при помощи кубических парабол // *Геоморфология.* – 2006. – № 3. – С. 30–36. – doi: 10.15356/0435-4281-2006-3-30-36.
12. *Florinsky I.* Digital terrain analysis in soil science and geology. – Acad. Press, 2016. – 506 p.
13. *Холл М.* Эксклюзивные модели рельефа Airbus DS для нефтегазовой отрасли // Земля из космоса: наиболее эффективные решения. – 2015. – № 4. – С. 16–19.
14. Глобальные цифровые модели рельефа // *Геоматика.* – 2015. – № 3. – С. 78–82.
15. *Reuter H.I., Neison A., Strobl P., Mehl W., Jarvis A.* A first assessment of Aster GDEM tiles for absolute accuracy, relative accuracy and terrain parameters // 2009 IEEE Int. Geoscience and Remote Sensing Symposium. – IEEE, 2009. – V. 5. – P. 240–243. – doi: 10.1109/IGARSS.2009.5417688.
16. The Long Term Archive | Science for a Changing World. – URL: <https://lta.cr.usgs.gov/>.
17. *Farr T.G., Rosen P.A., Caro E., Crippen R., Duren R., Hensley S., Kobrick M., Paller M., Rodriguez E., Roth L., Seal D., Shaffer S., Shimada J., Umland J., Werner M., Oskin M., Burbank D., Alsdorf D.* The Shuttle Radar Topography Mission // *Rev. Geophys.* – 2007. – V. 45, No 2. – Art. RG2004, P. 1–33. – doi: 10.1029/2005RG000183.
18. *Shortridge A., Messina J.* Spatial structure and landscape associations of SRTM error // *Remote Sens. Environ.* – 2011. – V. 115, No 6. – P. 1576–1587. – doi: 10.1016/j.rse.2011.02.017.

19. Szabó G., Singh S.K., Szabó S. Slope angle and aspect as influencing factors on the accuracy of the SRTM and the ASTER GDEM databases // *Phys. Chem. Earth, Parts A/B/C.* – 2015. – V. 83–84. – P. 137–145. – doi: 10.1016/j.pce.2015.06.003.
20. Pipaud I., Loibl D., Lehmkuhl F. Evaluation of TanDEM-X elevation data for geomorphological mapping and interpretation in high mountain environments – A case study from SE Tibet, China // *Geomorphology.* – 2015. – V. 246. – P. 232–254. – doi: 10.1016/j.geomorph.2015.06.025.
21. Frey H., Paul F. On the suitability of the SRTM DEM and ASTER GDEM for the compilation of topographic parameters in glacier inventories // *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* – 2012. – V. 18. – P. 480–490. – doi: 10.1016/j.jag.2011.09.020.
22. Mukherjee S., Joshi P.K., Mukherjee S., Ghosh A., Garg R.D., Mukhopadhyay A. Evaluation of vertical accuracy of open source Digital Elevation Model (DEM) // *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* – 2013. – V. 21. – P. 205–217. – doi: 10.1016/j.jag.2012.09.004.
23. Rodriguez E., Morris C.S., Belz J.E. A global assessment of the SRTM performance // *Photogramm. Eng. Remote Sens.* – 2006. – No 3. – P. 249–260. – doi: 10.14358/PERS.72.3.249.
24. ASTER Global DEM Validation: Summary Report. – 2009. – URL: https://lpdaac.usgs.gov/sites/default/files/public/aster/docs/ASTER_GDEM_Validation_Summary_Report.pdf.
25. Оньков И.В., Онянова Т.Я., Шуляева О.Ю. Исследование точности радарных ЦМР, построенных по снимкам ALOS PALSAR и модели SRTM, в зависимости от вида отражающей поверхности // *Геоматика.* – 2012. – № 4. – С. 33–36.
26. Думит Ж.А. К вопросу об ошибках цифрового моделирования рельефа (морфометрический аспект) // *Географические исследования Краснодарского края: Сб. науч. тр. / Отв. ред. А.В. Погорелов.* – Краснодар: КубГУ, 2007. – Вып. 2 – С. 49–53.
27. Рыжаков А.Н. Сравнительный анализ цифровых моделей рельефа, созданных на основе данных радарной и геодезической съемок // *Пути повышения эффективности орошаемого земледелия.* – 2016. – № 3. – С. 18–23.
28. Thomas J., Joseph S., Thrivikramji K.P., Arunkumar K.S. Sensitivity of digital elevation models: The scenario from two tropical mountain river basins of the Western Ghats, India // *Geosci. Front.* – 2014. – V. 5, No 6. – P. 893–909. – doi: 10.1016/j.gsf.2013.12.008.
29. Gilichinsky M., Melnikov D., Melekestsev I., Zaretskaya N., Inbar M. Morphometric measurements of cinder cones from digital elevation models of Tolbachik volcanic field, central Kamchatka // *Can. J. Remote Sens.* – 2010. – V. 36, No 4. – P. 287–300. – doi: 10.5589/m10-049.
30. Milevski I., Gorin S., Markoski B., Radevski I. Comparison of accuracy of DEMs available for the Republic of Macedonia // *Proc. 3rd Int. Geography Symposium – GEOMED 2013 / Ed. by R. Efe, I. Atalay, I. Cürebal.* – 2013. – P. 165–172.
31. Им С.Т. Погрешности расчета углов и азимутальных направлений склонов по данным SRTM // *Интерэкспо Гео-Сибирь.* – 2010. – Т. 1, № 4. – С. 164–167
32. Атлас земель сельскохозяйственного назначения. Министерство сельского хозяйства Российской Федерации. – URL: <http://atlas.mcx.ru/>.
33. Ажигиров А.А., Добровольская Н.Г., Голосов В.Н., Иванова Н.Н., Литвин Л.Ф. Эрозия почв и верхние звенья гидрографической сети // *Экологические проблемы эрозии почв и русловых процессов.* – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1992. – С. 66–80.
34. Litvin L.F., Zorina Ye.F., Sidorchuk A.Yu., Chernov A.V., Golosov V.N. Erosion and sedimentation on the Russian Plain, part 1: Contemporary processes // *Hydrolog. Processes.* – 2003. – V. 17, No 16. – P. 3335–3346. – doi: 10.1002/hyp.1390.
35. Инструкция по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов. – М.: ЦНИИГАиК, 2002. – 48 с.

36. *Hutchinson M.F.* A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits // *J. Hydrol.* – 1989. – V. 106, No 3–4. – P. 211–232. – doi: 10.1016/0022-1694(89)90073-5.
37. *Burrough P.A., McDonnell R.A., Lloyd C.D.* Principles of geographical information systems. – Oxford Univ. Press, 2015. – 432 p.
38. *Vigiak O., Malagó A., Bouraoui F., Vanmaercke M., Poesen J.* Adapting SWAT hillslope erosion model to predict sediment concentrations and yields in large Basins // *Sci. Total Environ.* – 2015. – V. 538. – P. 855–875. – doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.08.095.
39. *Заславский М.Н.* Эрозиоведение. – М.: Высш. шк., 1983. – 320 с.
40. *O'Callaghan J.F., Mark D.M.* The extraction of drainage networks from digital elevation data // *Comput. Vision, Graphics, Image Process.* – 1984. – V. 28, No 3. – P. 323–344. – doi: 10.1016/S0734-189X(84)80011-0.
41. *Погорелов А.В., Думит Ж.А.* Рельеф бассейна р. Кубани: морфологический анализ. – М.: ГЕОС, 2009. – 220 с.
42. *Мальцев К.А., Мухарамова С.С.* Построение моделей пространственных переменных (с применением пакета Surfer). – Казань: Казан. ун-т, 2014. – 103 с.
43. *Mondal A., Khare D., Kundu S., Mukherjee S., Mukhopadhyay A., Mondal S.* Uncertainty of soil erosion modelling using open source high resolution and aggregated DEMs // *Geosci. Frontiers.* – 2017. – V. 8, No 3. – P. 425–436. – doi: 10.1016/j.gsf.2016.03.004.
44. *Kinsey-Henderson A.E., Wilkinson S.N.* Evaluating Shuttle radar and interpolated DEMs for slope gradient and soil erosion estimation in low relief terrain // *Environ. Model. Software.* – 2013. – V. 40. – P. 128–139. – doi: 10.1016/j.envsoft.2012.08.010.
45. *Кузнецова Ю.С., Беляев В.Р., Голосов В.Н.* Влияние детальности исходной информации о рельефе на точность расчетов темпов смыва почв со склонов // *Геоморфология.* – 2011. – № 4. – С. 46–57.

Поступила в редакцию
17.04.18

Мальцев Кирилл Александрович, кандидат географических наук, доцент кафедры ландшафтной экологии

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: mlcvkirill@mail.ru

Голосов Валентин Николаевич, доктор географических наук, ведущий научный сотрудник НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева географического факультета

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
Ленинские горы, д. 1, г. Москва, 119991, Россия
Институт географии РАН
Старомонетный пер., д. 18, г. Москва, 119017, Россия
E-mail: gollossov@gmail.com

Гафуров Артур Маратович, младший научный сотрудник НИЛ «Космоэкология»

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: gafurov.kfu@gmail.com

**Digital Elevation Models and Their Use
for Assessing Soil Erosion Rates on Arable Lands**K.A. Maltsev^{a*}, V.N. Golosov^{b,c**}, A.M. Gafurov^{a***}^aKazan Federal University, Kazan, 420008 Russia^bMoscow State University, Moscow, 119991 Russia^cInstitute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 RussiaE-mail: *mlcykirill@mail.ru, **gollossov@gmail.com,
***gafurov.kfu@gmail.com

Received April 17, 2018

Abstract

The paper presents the results of assessing the accuracy of global digital elevation models (GDEMs), SRTM and ASTER GDEMs, based on a small catchment located on the eastern slope of the Central Russian Upland in the upper reaches of the Veduga River basin. The analysis of the errors in the morphometric parameters has been performed by comparing the part of the global DEM SRTM and ASTER GDEMs representing the relief of the selected catchment area with more accurate 1:10 000 (TOPO) maps data. The values of the slopes and the lengths of the slopes have been used as statistical indicators to estimate the accuracy of the models. The results of the comparison show that the SRTM model is more similar to the TOPO model than the ASTER GDEM. Therefore, the tested version of the SRTM model can be successfully used for calculations aimed to not only determine the average annual erosion rates for a river basin, but also to create maps of soil erosion intensity on slopes.

Keywords: erosion, digital elevation model, SRTM, ASTER, GIS, small valley

Acknowledgments. The work is performed according to the Russian Government Program of Competitive Growth of Kazan Federal University.

Figure Captions

- Fig. 1. Distribution of arable land areas of the studied catchment area along the length values of the slopes (m) using different GDEMs.
- Fig. 2. Distribution of arable lands of the studied catchment area along the area of the material flow (S_{se}) using different GDEMs.
- Fig. 3. Distributions of the area of arable lands of the studied catchment area based on the intensity of soil erosion (t/ha per year) calculated using the SRTM GDEM and TOPO.

References

1. Walling D.E. The sediment delivery problem. *J. Hydrol.*, 1983, vol. 65, nos. 1–3, pp. 209–237. doi: 10.1016/0022-1694(83)90217-2.
2. Lal R. Soil degradation by erosion. *Land Degrad. Dev.*, 2001, vol. 12, no. 6, pp. 519–539. doi: 10.1002/ldr.472.
3. Litvin L.F. *Geografiya erozii pochv sel'skokhozyaistvennykh zemel' Rossii* [Geography of Soil Erosion in Agricultural Lands of Russia]. Moscow, Akademiya, 2002. 255 p. (In Russian)
4. Karydas C.G., Panagos P., Gitas I.Z. A classification of water erosion models according to their geospatial characteristics. *Int. J. Digital Earth*, 2014, vol. 7, no. 3, pp. 229–250. doi: 10.1080/17538947.2012.671380.

5. Merritt W.S., Letcher R.A., Jakeman A.J. A review of erosion and sediment transport models. *Environ. Model. Software*, 2003, vol. 18, nos. 8–9, pp. 761–799. doi: 10.1016/S1364-8152(03)00078-1.
6. Zhang Y., Degroote J., Wolter C., Sugumaran R. Integration of modified universal soil loss equation (MUSLE) into a GIS framework to assess soil erosion risk. *Land Degrad. Dev.*, 2009, vol. 20, no. 1, pp. 84–91. doi: 10.1002/ldr.893.
7. Larionov G.A. *Eroziya i deflyatsiya pochv* [Erosion and Deflation of Soils]. Moscow, Izd. Mosk. Univ., 1993. 200 p. (In Russian)
8. Bazhenova O.I., Lyubtsova E.M., Ryzhov Yu.V., Makarov S.A. *Prostranstvenno-vremennoi analiz dinamiki erozionnykh protsessov na yuge Vostochnoi Sibiri* [Spatiotemporal Analysis of the Dynamics of Erosion Processes in the South of Eastern Siberia]. Novosibirsk, Nauka, 1997. 208 p. (In Russian)
9. Mitasova H., Hofierka J., Zlocha M., Iverson L.R. Modeling topographic potential for erosion and depositing using GIS. *Int. J. Geogr. Inf. Syst.*, 1996, vol. 10, no. 5, pp. 629–641. doi: 10.1080/0269379960890210.
10. Koshel' S.M. Terrain modeling by isolines. In: Berlyant A.M. (Ed.) *Universitetskaya shkola geograficheskoi kartografii. K 100-letiyu professora K.A. Salishcheva* [University School of Geographic Cartography. Honoring the 100th Birth Anniversary of Professor K.A. Salishchev]. Moscow, Aspekt Plyus, 2005. pp. 198–208. (In Russian)
11. Maltsev K.A. Building digital models of landscape using cubic parabolas. *Geomorfologiya*, 2006, no. 3. pp. 30–36. doi: 10.15356/0435-4281-2006-3-30-36. (In Russian)
12. Florinsky I. *Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology*. Acad. Press, 2016. 506 p.
13. Hall M. Exclusive terrain models developed by Airbus DS for oil and gas industry. *Zemlya Kosmosa: Naibolee Eff. Resheniya*, 2015, no. 4, pp. 16–19. (In Russian)
14. Global digital terrain models. *Geomatika*, 2015, no. 3, pp. 78–82. (In Russian)
15. Reuter H.I., Neison A., Strobl P., Mehl W., Jarvis A. A first assessment of Aster GDEM tiles for absolute accuracy, relative accuracy and terrain parameters. *2009 IEEE Int. Geoscience and Remote Sensing Symposium*. IEEE, 2009, vol. 5, pp. 240–243. doi: 10.1109/IGARSS.2009.5417688.
16. The Long Term Archive | Science for a Changing World. Available at: <https://lta.cr.usgs.gov/>.
17. Farr T.G., Rosen P.A., Caro E., Crippen R., Duren R., Hensley S., Kobrick M., Paller M., Rodriguez E., Roth L., Seal D., Shaffer S., Shimada J., Umland J., Werner M., Oskin M., Burbank D., Alsdorf D. The Shuttle Radar Topography Mission. *Rev. Geophys.*, 2007, vol. 45, no. 2, art. RG2004, pp. 1–33. doi: 10.1029/2005RG000183.
18. Shortridge A., Messina J. Spatial structure and landscape associations of SRTM error. *Remote Sens. Environ.*, 2011, vol. 115, no. 6, pp. 1576–1587. doi: 10.1016/j.rse.2011.02.017.
19. Szabó G., Singh S.K., Szabó S. Slope angle and aspect as influencing factors on the accuracy of the SRTM and the ASTER GDEM databases. *Phys. Chem. Earth, Parts A/B/C*, 2015, vols. 83–84, pp. 137–145. doi: 10.1016/j.pce.2015.06.003.
20. Pipaud I., Loibl D., Lehmkuhl F. TanDEM-X elevation data for geomorphological mapping and interpretation in high mountain environments – A case study from SE Tibet, China. *Geomorphology*, 2015, vol. 246, pp. 232–254. doi: 10.1016/j.geomorph.2015.06.025.
21. Frey H., Paul F. On the suitability of the SRTM DEM and ASTER GDEM for the compilation of topographic parameters in glacier inventories. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, 2012, vol. 18, pp. 480–490. doi: 10.1016/j.jag.2011.09.020.
22. Mukherjee S., Joshi P.K., Mukherjee S., Ghosh A., Garg R.D., Mukhopadhyay A. Evaluation of vertical accuracy of open source Digital Elevation Model (DEM). *Int. J. Appl. Earth Obs. and Geoinf.*, 2013, vol. 21, pp. 205–217. doi: 10.1016/j.jag.2012.09.004.
23. Rodriguez E., Morris C.S., Belz J.E. A global assessment of the SRTM performance. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 2006, no. 3, pp. 249–260. doi: 10.14358/PERS.72.3.249.
24. ASTER Global DEM Validation: Summary Report, 2009. Available at: https://lpdaac.usgs.gov/sites/default/files/public/aster/docs/ASTER_GDEM_Validation_Summary_Report.pdf.
25. On'kov IV, Onyanova T.Ya., Shilyaeva O.Yu. A study of the accuracy of radar DTMs based on ALOS PALSAR images and the SRTM model depending on the type of reflecting surface. *Geomatika*, 2012, no. 4, pp. 33–36. (In Russian)

26. Dumit Zh.A. On the problem of errors in numerical modeling of the relief (morphometric aspect). In: Pogorelov A.V. (Ed.) *Geograficheskie issledovaniya Krasnodarskogo kraya* [Geographical Studies of the Krasnoyarsk Region]. Krasnodar, KubGU, 2007, no. 2, pp. 49–53. (In Russian)
27. Ryzhakov A.N. Comparative analysis of digital terrain models created on the basis of radar and geodetic survey data. *Puti Povysh. Eff. Oroschaemogo Zemled.*, 2016, no. 3, pp. 18–23. (In Russian)
28. Thomas J., Joseph S., Thirvikramji K.P., Arunkumar K.S. Sensitivity of the digital elevation models: The scenario from the two tropical mountain rivers basins of the Western Ghats, India. *Geosci. Front.*, 2014, vol. 5, no. 6, pp. 893–909. doi: 10.1016/j.gsf.2013.12.008.
29. Gilichinsky M., Melnikov D., Melekestsev I., Zaretskaya N., Inbar M. Morphometric measurements of cinder cones from digital elevation models of Tolbachik volcanic field, central Kamchatka. *Can. J. Remote Sens.*, 2010, vol. 36, no. 4, pp. 287–300. doi: 10.5589/m10-049.
30. Milevski I., Gorin S., Markovski B., Radevski I. Comparison of the accuracy of DEMs available for the Republic of Macedonia. *Proc. 3rd Int. Geography Symp. – GEOMED 2013*. Efe R., Atalay I., Cürebal I. (Eds.), 2013. pp. 165–172.
31. Im S.T. Slope and aspect errors derived from SRTM. *Interesko Geo-Sibir'*, 2010, vol. 1, no. 4, pp. 164–167. (In Russian)
32. Atlas of Agricultural Lands. Ministry of Agriculture of the Russian Federation. Available at: <http://atlas.mcx.ru/>.
33. Azhigirov A.A., Dobrovolskaya N.G., Golosov V.N., Ivanova N.N., Litvin L.F. Soil erosion and upper links of the hydrographic network. In: *Ekologicheskie problemy erozii pochv i ruslovykh protsessov* [Ecological Problems of Soil Erosion and Channel Processes]. Moscow, Izd. Mosk. Univ., 1992. pp. 66–80. (In Russian)
34. Litvin L.F., Zorina Ye.F., Sidorchuk A.Yu., Chernov A.V., Golosov V.N. Erosion and sedimentation on the Russian Plain, part 1: Contemporary processes. *Hydrol. Processes*, 2003, vol. 17, no. 16, pp. 3335–3346. doi: 10.1002/hyp.1390.
35. *Instruktsiya po fotogrammetricheskim rabotam pri sozdanii tsifrovyykh topograficheskikh kart i planov* [Instruction on Photogrammetric Works when Creating Digital Topographic Maps and Plans]. Moscow, TsNIIGAiK, 2002. 48 p. (In Russian)
36. Hutchinson M.F. A new procedure for gridding elevation and stream of data with automatic removal of spurious pits. *J. Hydrol.*, 1989, vol. 106, nos. 3–4, pp. 211–232. doi: 10.1016/0022-1694(89)90073-5.
37. Burrough P.A., McDonnell R.A., Lloyd C.D. *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford Univ. Press, 2015. 432 p.
38. Vigiak O., Malagó A., Bouraoui F., Vanmaercke M., Poesen J. Adapting SWAT hillslope erosion model to predict sediment concentrations and yields in large Basins. *Sci. Total Environ.*, 2015, vol. 538, pp. 855–875. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.08.095.
39. Zaslavskii M.N. *Eroziovedenie* [Erosiology]. Moscow, Vyssh. Shk., 1983. 320 p. (In Russian)
40. O'Callaghan J.F., Mark D.M. The extraction of the drainage networks from digital elevation data. *Comput. Vision, Graphics, Image Process.*, 1984, vol. 28, no. 3, pp. 323–344. doi: 10.1016/S0734-189X(84)80011-0.
41. Pogorelov A.V., Dumit Zh.A. *Rel'ef basseina r. Kubani: morfologicheskii analiz* [Relief of the Kuban River Basin: Morphological Analysis]. Moscow, GEOS, 2009. 220 p. (In Russian)
42. Maltsev K.A., Mukharamova S.S. *Postroenie modelei prostranstvennykh peremennykh (s primeneniem paketa Surfer)* [Building Models of Spatial Variables (Using the Surfer Package)]. Kazan, Kazan. Univ., 2014. 103 p. (In Russian)
43. Mondal A., Khare D., Kundu S., Mukherjee S., Mukhopadhyay A., Mondal S. Uncertainty of soil erosion modeling using open source high resolution and aggregated DEMs. *Geosci. Front.*, 2017, vol. 8, no. 3, pp. 425–436. doi: 10.1016/j.gsf.2016.03.004.
44. Kinsey-Henderson, A.E., Wilkinson S.N. Evaluating Shuttle radar and interpolated DEMs for slope gradient and soil erosion estimation in low relief terrain. *Environ. Model. Software*, 2013, vol. 40, pp. 128–139. doi: 10.1016/j.envsoft.2012.08.010.

-
45. Kuznetsova Yu.S., Belyaev V.R., Golosov V.N. Influence of the amount of detail in the initial data on the relief on the accuracy of calculation of the rates of flushing of soils from the slopes. *Geomorphologiya*, 2011, no. 4, pp. 46–57. (In Russian)
-

⟨ **Для цитирования:** Мальцев К.А., Голосов В.Н., Гафуров А.М. Цифровые модели рельефа и их использование в расчётах темпов смыва почв на пахотных землях // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2018. – Т. 160, кн. 3. – С. 514–530. ⟩

⟨ **For citation:** Maltsev K.A., Golosov V.N., Gafurov A.M. Digital elevation models and their use for assessing soil erosion rates on arable lands. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2018, vol. 160, no. 3, pp. 514–530. (In Russian) ⟩