

Оценка применимости цифровых моделей рельефа для моделирования эрозии почв (на примере малого водосбора в Курской области)

А. П. Жидкин¹, В. Н. Голосов^{2,3,4}, А. С. Добрянский³

¹ Почвенный институт им. В. В. Докучаева, Москва, 119017, Россия
E-mail: gidkin@mail.ru

² Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
Москва, 119999, Россия
E-mail: gollossov@gmail.com

³ Институт географии РАН, Москва, 119017, Россия
E-mail: alex@igras.ru

⁴ Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 420008, Россия

В статье сопоставлены расчёты эрозионно-аккумулятивных процессов на малом распаханном водосборе, выполненные с использованием 10 различных цифровых моделей рельефа (ЦМР) (на основе съёмок беспилотным летательным аппаратом, оцифрованных топокарт, ALOS, SRTM, ASTER и др.). Расчёт потенциальной эрозии почв проводился с применением модели WATEM/SEDEM, основанной на алгоритме RUSLE. Актуальность работы обусловлена отсутствием сравнительных оценок влияния ЦМР на результаты математического моделирования эрозии почв. Проведённые исследования выявили, что результаты математического моделирования в значительной степени зависят от разрешения ЦМР, в частности отмечена тенденция увеличения площадей зон аккумуляции наносов при укрупнении размера ячейки ЦМР. Среднегодовые оценки темпов наносов, вынесенных за пределы пашни, достаточно близки при использовании ЦМР на основе съёмки беспилотным летательным аппаратом, ALOS и SRTM при близком размере ячейки ЦМР (от 20 до 38 м). Наименьшие среднегодовые потери почвы от водной эрозии получены при использовании наиболее детальных ЦМР (размер ячейки 1 и 5 м). Модель ASTER не следует применять для расчётов эрозии почв в крупном масштабе из-за существенных искажений рельефа.

Ключевые слова: WATEM/SEDEM, SRTM, ALOS, ASTER, топографическая карта, беспилотный летательный аппарат, аккумуляция, нанос, чернозём, интерполяция, разрешение

Одобрена к печати: 29.09.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-133-144

Введение

Данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) широко используются в различных областях науки, в том числе для оценки состояния почвенного покрова и мониторинга его деградации. В частности, данные ДЗЗ используются для оценки эрозии почв — наиболее деструктивного процесса деградации почвенного покрова (Montanarella et al., 2016). Мониторинг овражной эрозии в настоящее время проводится непосредственно с помощью космических снимков высокого разрешения (Медведева и др., 2018). Оценка плоскостного (делювиального) смыва почв по данным ДЗЗ затруднительна. Однако данные ДЗЗ используются для построения цифровых моделей рельефа (ЦМР), которые, в свою очередь, выступают основой для математического моделирования эрозионно-аккумулятивных процессов.

С увеличением точности ЦМР математическое эрозионное моделирование приобрело широкое распространение. Ежегодно публикуется уже почти тысяча работ с применением эрозионных математических моделей (Alewell et al., 2019). В настоящее время отсутствуют единые стандарты и требования к использованию ЦМР при эрозионном моделировании. В разных работах применяются ЦМР разного разрешения, построенные на основе разных источников, характеризующихся различной детальностью отображения рельефа местности. Для проведения эрозионного моделирования в среднем и мелком масштабе используются ЦМР,

полученные на основе данных ДЗЗ (Мальцев и др., 2019; Borrelli et al., 2017), поскольку более детальные ЦМР недоступны на большие по площади территории. При крупномасштабных исследованиях чаще используются ЦМР, полученные на основе оцифровки топографических карт или по данным съёмки беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) (Жидкин и др., 2021; Golosov et al., 2018). Применение разных ЦМР неизбежно сказывается на количественных оценках эрозии почв, проводимых в разных масштабах. При этом влияние детальности ЦМР на результаты эрозионного моделирования в настоящее время слабо изучено (Alewell et al., 2019). В меньшей степени это касается использования ЦМР для средне- и мелкомасштабного картографирования (Пространственно-временные..., 2019; Mondal et al., 2017), благодаря чему удалось выявить, что оценки эрозии почв, полученные при использовании SRTM-30 (англ. Shuttle Radar Topographic Mission), значительно точнее, чем на основе ASTER (англ. Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) и Cartosat.

Цель данной работы состоит в сравнительной оценке результатов математического моделирования эрозионно-аккумулятивных процессов на основе различных ЦМР при крупномасштабном картографировании на примере малого пахотного водосбора.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования был выбран малый водосбор «Спокоевка», расположенный в 15 км к юго-западу от Курска в бассейне р. Воробжи. Водосбор имеет общую площадь 84 га, из которых 75 га приходится на пашню.

Для моделирования эрозии почв было использовано 10 различных ЦМР, включая широко применяемые для решения различных задач (табл. 1). Исходными были ЦМР на основе: фотограмметрической обработки аэрофотосъёмки с беспилотных летательных аппаратов; моделирования рельефа с векторизованной топографической карты масштаба 1:10 000; глобальных ЦМР — ALOS (AW3D30) (Takaku et al., 2014, 2018) и ASTER GDEM v2 (Tachikawa et al., 2011), созданных на основе фотограмметрической обработки космических снимков в оптическом диапазоне, SRTM (Farr et al., 2007; Rodriguez et al., 2006), полученной с использованием радарного комплекса SIRC (Kobrick, 2006).

Таблица 1. Источники и параметры цифровых моделей рельефа, использованных для расчётов темпов эрозионно-аккумулятивных процессов на водосборе

№	Источник	Исходный размер пикселя ЦМР	Размер пикселя ЦМР для расчёта, м	Сокращённое название
1	Съёмка БПЛА	0,1 м	1	БПЛА1
2	Съёмка БПЛА		5	БПЛА5
3	Съёмка БПЛА		20	БПЛА20
4	Топографическая карта (интерполяция «Топо в растр»)	—	20	ТОПО_р
5	Топографическая карта (интерполяция триангуляцией)			ТОПО_т
6	ALOS (AW3D30)	1 угл. с	19	ALOS
7	SRTMGL1N v003		23	SRTM23
8	SRTM plus v3	38 м	38	SRTM38
9	ASTERGTM v003	1 угл. с	23	ASTER23
10	ASTER GDEM v2	38 м	38	ASTER38

Аэрофотосъёмка с БПЛА была выполнена 20 сентября 2019 г. с использованием квадрокоптера Mavic pro platinum с высоты 160 м над точкой взлёта. Для фотограмметрической обработки снимков использовался программный комплекс Agisoft Metashape

Professional. Результатом обработки стали ортофотомозаика с пространственным разрешением 5 см/пиксель, ЦММ разрешением 10 см/пиксель и фотограмметрическое облако точек. Пространственная привязка уточнялась на основе установления плановых координат характерных объектов по ортотрансформированным космическим снимкам, находящимся в открытом доступе, корректировка высотных отметок — на основе цифровой модели ALOS. Всего использовалось 10 опорных точек для устранения ошибок привязки, рассчитанной по данным о положении камеры с бортового средства глобального позиционирования БПЛА. Итоговая ЦМР с разрешением 10 см/пиксель получена в результате обработки облака точек с устранением влияния растительного покрова и шумов. Изменение пространственного разрешения модели до 1, 5 и 20 м проводилось в среде Global Mapper алгоритмом Bilinear.

Оцифровка рельефа топографической карты масштаба 1:10 000 проводилась вручную. Привязка топокарты 1:10 000 была проведена по отметкам характерных точек местности с топокарты Государственного научно-внедренческого центра геоинформационных систем и технологий (Госгисцентр) открытого пользования 1:25 000 с проверкой по космическим снимкам. ЦМР на основе векторизованного рельефа топографических карт была создана с использованием двух наиболее распространённых алгоритмов: а) алгоритма триангуляции в программе Global Mapper; б) алгоритма модуля «Топо в растр» (*англ.* Topo to Raster) в программе ESRI ArcMap.

ЦМР ALOS (AW3D30) была выгружена с официального портала Японского агентства аэрокосмических исследований (Japan Aerospace Exploration Agency — JAXA) (<https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30>). SRTM и ASTER получены из двух различных источников: через Распределённый центр хранения данных по наземным процессам (*англ.* Physical Oceanography Distributed Active Archive Center — LP DAAC) (SRTM: <https://lpdaac.usgs.gov/products/srtmgl1v003>; ASTER: <https://lpdaac.usgs.gov/products/astgtmv003>) и через модуль загрузки данных геоинформационной системы (ГИС) Global Mapper. Данные ALOS и полученные из LP DAAC, ASTER и SRTM имеют одинаковое пространственное разрешение в 1 угл. с в равнопромежуточной цилиндрической проекции (EPSG:4326) в системе координат WGS84 (всемирная система геодезических параметров Земли, *англ.* World Geodetic System). Таким образом, эти модели имеют различное разрешение в широтном направлении для разных широтных зон при одинаковом пространственном разрешении пикселя в долготном направлении — около 30 м. Для территории исследования исходное разрешение в широтном направлении составило около 19,5 м. Расчёт по модели требовал трансформации данных ЦМР в прямоугольную систему координат проекции UTM (*англ.* Universal Transverse Mercator, проекция Меркатора) с изменением формы ячейки до квадратной. Все ЦМР были спроецированы в UTM 36-й зоны. Передискретизация при трансформировании цифровых моделей и изменении пространственного разрешения проводилось четырьмя разными методами в среде QGIS (библиотека gdalwarp) для оценки их применимости: Nearest Neighbor, Bilinear, Cubic, Cubic Spline. Размер ячейки при передискретизации, с одной стороны, определялся рекомендациями модели, с другой — имел наименьшую погрешность интерполяции согласно заложенному в gdalwarp алгоритму и составил 23,4 м для квадратной ячейки.

Данные SRTM и ASTER более старой версии, выгруженные через модуль загрузки Global Mapper, имеют пространственное разрешение 38 м с квадратным размером пикселя в проекции Меркатора (EPSG:3857) в системе координат WGS 84. Для этих данных изменения разрешения не проводилось, а изменение проекции при сохранении частоты дискретизации не повлекло потери данных.

Расчёт потенциальной эрозии почв проводился на основе модели WATEM/SEDEM v. 2004 (*англ.* Water and Tillage Erosion Model and Sediment Delivery Model) (Van Oost et al., 2000; Van Rompaey et al., 2001). Данная модель основана на алгоритме RUSLE и широко используется для расчёта потенциальных темпов эрозионно-аккумулятивных процессов для малых водосборов (Pandey et al., 2016). Для всех вариантов расчёта кроме рельефа использовались одинаковые параметры, а именно: эродируемость почв (*K*-фактор) $35 \text{ кг} \cdot \text{ч} \cdot \text{МДж}^{-1} \cdot \text{мм}^{-1}$ (Козлов и др., 2019), эрозионный индекс дождевых осадков $0,029 \text{ МДж} \cdot \text{мм} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$ (Panagos et al., 2017), почвозащитная роль возделываемых культур 0,45 (Ларионов, 1993). Для

каждой ЦМР *LS*-фактор (эрозионный потенциал рельефа) рассчитывался согласно (McCool et al., 1987). В модели WATEM/SEDEM он определяется по линиям тока, которые характеризуется длиной и уклоном. *LS*-фактор рассчитывается по относительным высотам в пределах ЦМР. Поэтому различия в системах абсолютных высот ЦМР не вносят значительных погрешностей в итоговые расчёты. Это позволяет сопоставлять результаты моделирования эрозионно-аккумулятивных процессов, полученные на основе использования различных ЦМР.

Важно учитывать, что эрозионные модели, включающие в блок расчётов USLE (англ. Universal Soil Loss Equation), основаны на эмпирических зависимостях, полученных при наблюдениях на стоковых площадках. Параметры стандартной стоковой площадки составляют длину 72,5 фута (22,6 м), ширину 6 футов (1,86 м), что равно площади 1/100 акра (~42 м²). Поэтому в методическом руководстве по применению модели WATEM/SEDEM рекомендовано проводить расчёты с использованием ЦМР с размером ячейки 20 м, что соответствует длине стоковой площадки (Van Oost et al., 2000; Van Rompaey et al., 2001). Отметим, что в данном случае для сравнения были взяты ЦМР с большим различием в детальности информации. Так, различия между 20-метровым (БПЛА20) и 1-метровым разрешением (БПЛА1) составляют 20 раз по длине и 400 раз по площади ячейки. В свою очередь, различия между 23-метровым и 38-метровым разрешением (SRTM, ALOS, ASTER) значительно ниже и составляют 1,7 раза по длине и 2,7 раза по площади ячейки.

Расчёт различий между темпами эрозионно-аккумулятивных процессов, полученных на основе БПЛА20 и других ЦМР, проводился вычитанием растров при помощи инструмента grid calculator в SAGA GIS.

Результаты и обсуждение

Результаты моделирования интенсивности эрозионно-аккумулятивных процессов на пахотных землях в крупном масштабе важны по ряду причин. Во-первых, количественная оценка суммарных объёмов материала, эродированного и переотложившегося внутри пашни, позволяет оценить объёмы наносов, которые выносятся за её пределы. Совместно с последующей оценкой аккумуляции наносов в верхних звеньях флювиальной сети это позволяет оценить объёмы наносов и переносимых совместно с ними загрязняющих веществ, транспортируемых в постоянные водотоки. Во-вторых, они позволяют получить пространственную картину расположения зон смыва и аккумуляции внутри пашни. Это важно для выделения эрозионно-опасных участков с наиболее высокими значениями смыва, на которых целесообразно применять почвозащитные мероприятия.

Расчётные величины балансов наносов представлены в *табл. 2*. При использовании ЦМР разного разрешения на основе БПЛА различия в эрозионных потерях составили 43 %, что в целом сопоставимо с различиями, получаемыми при использовании ЦМР из других источников (на основе топографической карты, ALOS и SRTM). При этом отмечается тенденция к снижению расчётных эрозионных потерь и объёмов наносов, выносимых за пределы водосбора, в ряду БПЛА20, БПЛА5 и БПЛА1, т. е. при уменьшении размера ячейки ЦМР (см. *табл. 2*).

Изменение ЦМР в процессе передискретизации по алгоритмам Bilinear, Cubic, Cubic Spline, использованным при подготовке ЦМР ALOS (AW3D30), SRTMGL1N v003, ASTERGTM v003 для расчётов по эрозионной модели WATEM/SEDEM, не оказало принципиального влияния на результаты эрозионного моделирования (см. *табл. 2*). Наиболее близкие к средним значения были получены при использовании алгоритма интерполяции Cubic Spline. Близость полученных значений при использовании SRTM23 с разными алгоритмами передискретизации и SRTM38 свидетельствует об отсутствии принципиального значения источника и формата скачивания данных ЦМР для расчёта эрозионных потерь. Аналогичная ситуация отмечена также для ASTER23 и ASTER38.

При этом оказалось недопустимым применение алгоритма Nearest Neighbor в связи с проявлением эффекта ступенчатости. В данном алгоритме при ресамплинге исходные зна-

чения ячеек не сглаживаются, что приводит к потере данных для такой частоты дискретизации и некорректному расчёту по модели WATEM/SEDEM.

Таблица 2. Результаты расчётов баланса наносов (т/год) на основе использования разных ЦМР и их соотношения (%) по сравнению с оценками составляющих баланса с расчётами на основе ЦМР БПЛА20

	БПЛА20	БПЛА5	БПЛА1	ТОПО_р	ТОПО_т	ALOS*	SRTM23*	SRTM38	ASTER23*	ASTER38
Эрозионные потери почв на пашне, т/год (числитель); различие с расчётом по БПЛА20, % (знаменатель)**	684	<u>607</u> 12	<u>440</u> 43	<u>875</u> 25	<u>929</u> 30	<u>748–776</u> 9–13	<u>743–753</u> 8–10	<u>761</u> 11	<u>1073–1330</u> 44–64	<u>1262</u> 59
Аккумуляция в пределах пашни, т/год (числитель); различие с расчётом по БПЛА20, % (знаменатель)**	189	<u>322</u> 52	<u>252</u> 29	<u>234</u> 21	<u>153</u> 21	<u>281–374</u> 39–66	<u>433–446</u> 78–81	312 49	<u>264–255</u> 30–33	<u>293</u> 43
Вынос за пределы пашни, т/год (числитель); различие с расчётом по БПЛА20, % (знаменатель)**	495	<u>285</u> 54	<u>188</u> 90	<u>640</u> 26	<u>776</u> 44	<u>402–467</u> 6–21	<u>302–311</u> 46–48	448 10	<u>818–1167</u> 49–81	<u>969</u> 65
Доля наносов, переотложившихся в пределах пашни, от суммарного смыва, %	28	53	57	27	16	38–48	58–59	41	20–24	23

* Диапазоном даны результаты расчётов на основе ЦМР с разным алгоритмом передискретизации Bilinear, Cubic, Cubic Spline.

** Различия рассчитаны как разница по отношению к среднему арифметическому.

При построении ЦМР на основе оцифрованных горизонталей топокарты масштаба 1:10 000 использование интерполяции инструментом «Топо в растр» и триангуляцией привело к разнонаправленным различиям в объёмах смыва и аккумуляции, что в итоге существенно повлияло на разницу в оценках объёмов выноса материала за пределы пашни (см. табл. 2).

Сравнение ЦМР из разных источников информации выявило 1,5–2-кратное завышение относительно расчётов с применением других ЦМР расчётных значений смыва и аккумуляции при использовании модели ASTER (в сторону аномального завышения объёмов эрозии почв) и, как следствие, завышения объёма наносов, выносимых за пределы водосбора (см. табл. 2).

Результаты применения ЦМР сравнительно близкого (23- и 38-метрового) разрешения из разных источников информации (БПЛА20, ТОПО_р, ТОПО_т, ALOS и SRTM) свидетельствуют об относительно небольших различиях в расчётных балансах наносов, полученных на основе их использования, хотя более существенные отличия характерны для расчётов, полученных на основе использования ЦМР ТОПО_р и ТОПО_т.

Обращает на себя внимание достаточно большой диапазон различий в расчётных оценках внутрисклоновой аккумуляции на пашне. Причём высокие значения характерны для наиболее детальных ЦМР (БПЛА1 и БПЛА5) и моделей ALOS и SRTM (см. табл. 2).

Варьирование в объёмах выноса наносов за пределы пашни также велико. Отмечается чрезмерное завышение данного параметра, полученного на основе ASTER. Также отчётливо проявилось отклонение в сторону наименьших объёмов выноса наносов за пределы пашни при использовании ЦМР с высоким разрешением (БПЛА1 и БПЛА5). В настоящее время выполнены оценки суммарного переотложения наносов в днище балки на данном водосборе за пост-чернобыльский период. Сопоставление полученных фактических объёмов аккумуляции с расчётными — тема отдельной статьи. Но обращают на себя внимание очень близкие (5,3–6,6 т/га в год) значения среднегодового смыва с пашни, которые получены на основе использования ЦМР БПЛА20, ALOS и STRM. Это в любом случае позволяет говорить, что при

их использовании можно получать сопоставимые результаты потерь почвы с пашни для данного типа рельефа.

Помимо оценок баланса наносов важную роль для целей почвоведения и сельского хозяйства играет пространственная структура проявлений эрозионно-аккумулятивных процессов. Использование ЦМР разного разрешения, построенных на основе съёмки с БПЛА, позволило выявить сходство и различия в расположении зон смыва и аккумуляции в пределах водосбора (рис. 1). Основные зоны смыва и аккумуляции наносов приурочены к одним и тем же участкам. В частности, участки с наиболее высокими темпами смыва располагаются в верховье левого отвершка и ложбинах в центральной части на левом борту балки. В целом восточная часть водосбора характеризуется более высокой эрозионной опасностью по сравнению с его западной частью. Зоны наиболее интенсивной аккумуляции наносов приурочены к верховью правого отвершка и центральной части мелких ложбин на левом борту балки. Однако различия в детальности ЦМР, полученных по результатам съёмки с БПЛА, оказали значительное влияние на размещение зон эрозии и переотложения наносов в зависимости от микрорельефа склонов. При использовании БПЛА1 на карте детально читаются участки эрозии почв в пределах мелких потяжин и ложбин в различных частях водосбора, а участки аккумуляции практически не идентифицируются, хотя фактически присутствуют (см. табл. 1). При использовании БПЛА5 данные особенности проявились в генерализованном виде, а при БПЛА20 все особенности микрорельефа сглажены и на карте отчётливо отражены только зоны смыва и аккумуляции на водосборах крупных ложбин (см. рис. 1).

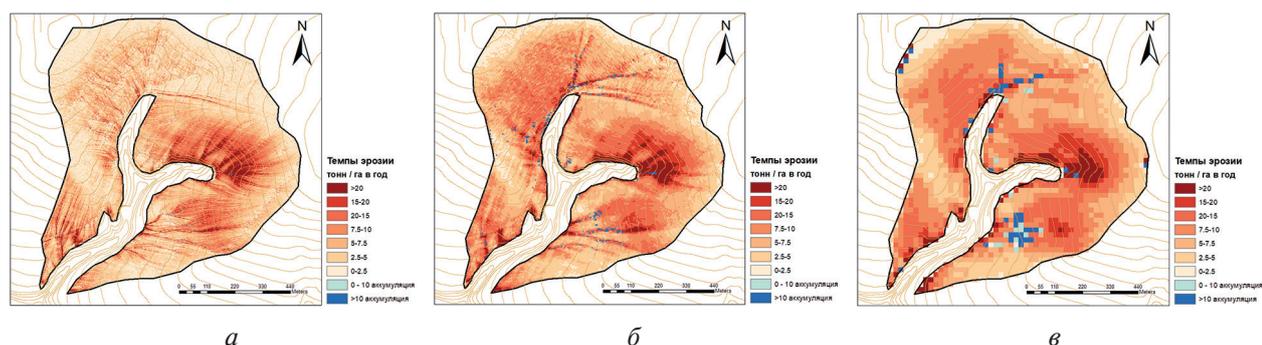


Рис. 1. Расчётные темпы эрозионно-аккумулятивных процессов на основе БПЛА с разрешением 1 м (а), 5 м (б), 20 м (в)

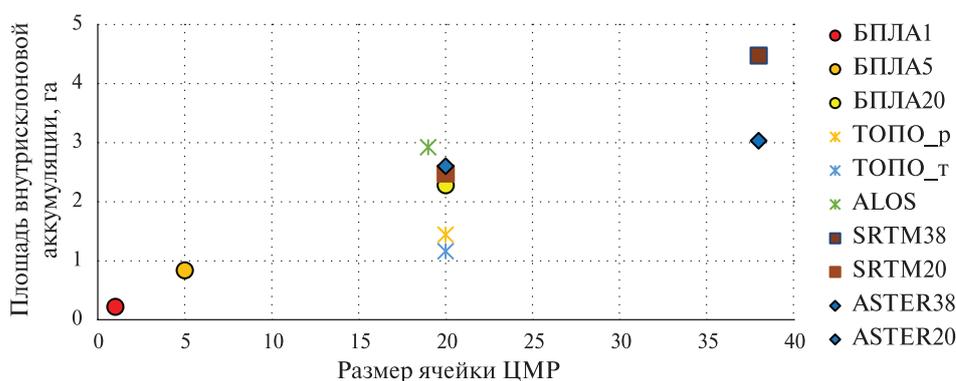


Рис. 2. Зависимость между площадью аккумуляции наносов в пределах пашни и размером ячейки ЦМР

В наибольшей мере изменение размера ячейки ЦМР оказало влияние на расчётную площадь участков аккумуляции наносов в пределах пашни, которая при использовании БПЛА1 оказалась в 10 раз меньше, чем при БПЛА20 (рис. 2). Аналогичная тенденция — увеличение

площади зон аккумуляции наносов по мере роста размера ячейки — прослеживается и для других ЦМР (см. рис. 2).

На рис. 3 показаны пространственные различия между расчётными темпами эрозионно-аккумулятивных процессов, полученными на основе расчётов с использованием БПЛА20 и другими ЦМР. Отмечается нарастание пространственных различий в ряду моделей БПЛА5, ТОПО_р, ТОПО_т, ALOS, SRTM23, ASTER23 (см. рис. 3а–е). В частности, расчёты на основе БПЛА20 и БПЛА5 в значительной степени близки между собой (см. рис. 3а). Различия приурочены преимущественно к крупным, хорошо выраженным в рельефе ложбинам, которые по-разному отображаются на ЦМР в зависимости от их разрешения, а также к участкам с развитым микрорельефом в южной (приустьевой) части водосбора.

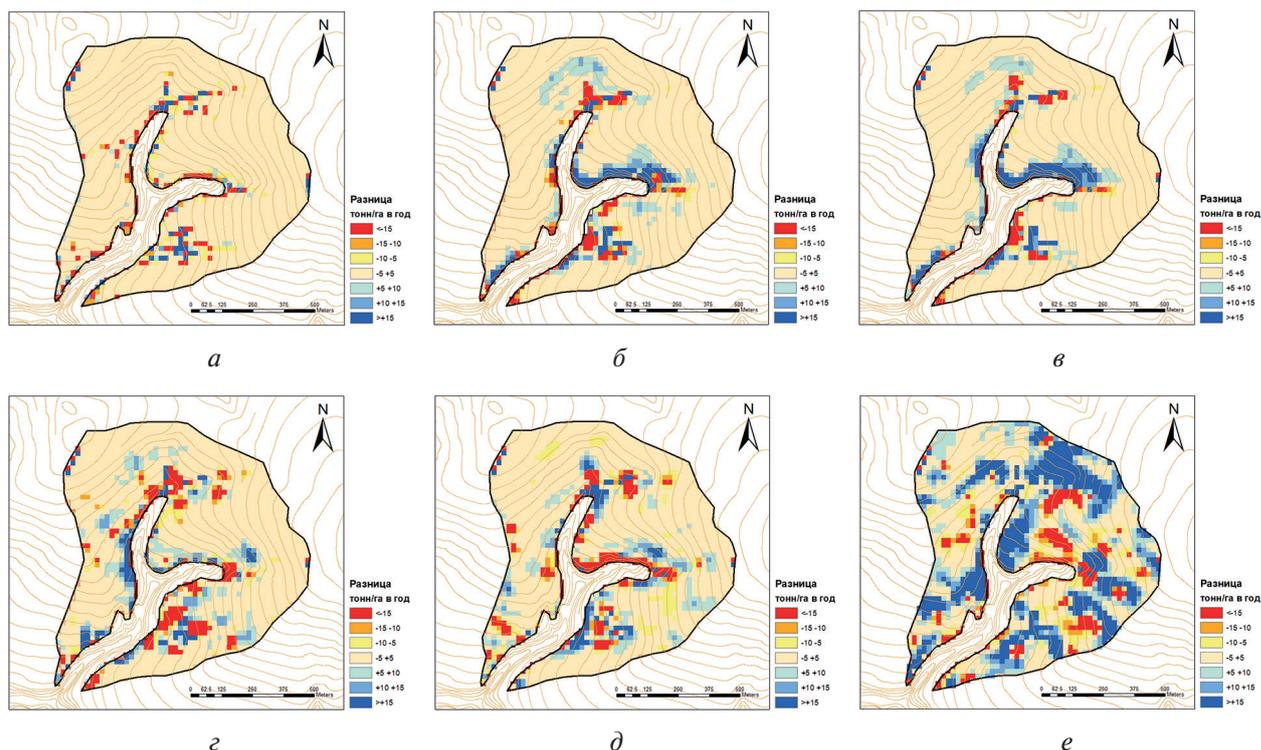


Рис. 3. Разница в пространственном распределении по площади водосбора зон смыва и аккумуляции, выявленных при расчётах с использованием ЦМР БПЛА20 (принят в качестве эталона) и БПЛА5 (а); ТОПО_р (б); ТОПО_т (в); ALOS (г); SRTM23 (д); ASTER23 (е)

Расчёты эрозии почв на основе ЦМР ТОПО_р и ТОПО_т дают близкие отклонения от расчётов на основе БПЛА20 (см. рис. 3б, в). В обоих случаях отмечаются завышения (БПЛА20 относительно ТОПО_р и ТОПО_т) значений темпов смыва в днищах ложбин и занижения темпов аккумуляции по периферии пашни на её нижних, примыкающих к бортам балки участках. Возможной причиной подобных различий оказывается обстоятельство, что при рисовке горизонталей на топографических картах картограф стремился учитывать положение важных элементов рельефа: бровок и тыловых швов линейных эрозионных форм, тогда как построение ЦМР на основе ДДЗ проводится автоматически. В частности, по периферии полей часто образуется напашь, слабо выраженная в рельефе, но значительно влияющая на переотложение наносов.

Различия в расчётных темпах эрозии почв между БПЛА20 и ЦМР на основе ДЗЗ (ALOS и SRTM) характеризуются не только приуроченностью к определённым формам рельефа, но также и «случайными» — хаотично размещёнными в пространстве — участками смыва и аккумуляции, появление которых никак не связано с особенностями перераспределения наносов на пашне (рис. 3г, д). При использовании в расчётах ЦМР ALOS и SRTM пространственная

картина перераспределения наносов несколько искажается, хотя в основном она отражает основные закономерности распределения по площади участков, как эрозионных, так и зон преимущественного переотложения наносов.

Пространственное размещение зон смыва и аккумуляции, полученное на основе использования ЦМР ASTER, абсолютно нереалистично и никак не коррелирует с общими закономерностями формирования стока воды и наносов на склонах (см. *рис. 3е*).

Отметим, что пространственное расположение зон аккумуляции для разных групп ЦМР заметно различается. Если на детальных ЦМР участки переотложения наносов, по сути, не формируют ареалов (см. *рис. 1*), то в случаях ЦМР ALOS и SRTM зоны аккумуляции находятся на конкретных участках: в местах размещения хорошо выраженных в рельефе ложбин и по нижнему краю пашни. Только детальные полевые исследования фактического расположения участков с преобладанием переотложения наносов, которые могут быть идентифицированы по повышенной по сравнению с эталоном мощностью почвенного горизонта А и В (А — поверхностный гумусо-аккумулятивный, В — переходный к материнской породе), могут позволить проверить достоверность расположения зон сильного смыва и интенсивной аккумуляции, выявленных на основе расчётов.

Следует с вниманием относиться к рекомендациям разработчиков моделей к разрешению ЦМР и с осторожностью сопоставлять оценки расчётов, полученных на основе ЦМР разного разрешения. Как указывалось выше, для WATEM/SEDEM рекомендуется использование ЦМР 20-метрового разрешения, что обусловлено параметрами модели, с целью наиболее корректного расчёта балансов наносов. При этом следует обратить внимание, что применение ЦМР большей детальности может иметь большое значение для выявления участков с высокой контрастностью их протекания в условиях развитого микрорельефа, несмотря на некоторые искажения расчётных темпов эрозионно-аккумулятивных процессов. В частности, информация о положении и площади таких участков играет важную роль при картографировании почвенного покрова, например для точечного земледелия и решения других прикладных задач. Необходимы дальнейшие исследования по выявлению оптимального пространственного разрешения ЦМР и их стандартизации для получения корректных и сопоставимых для рельефа с разной морфологией результатов эрозионного моделирования.

Заключение

Разрешение ЦМР в значительной степени оказывает влияние на результаты расчётов темпов эрозионно-аккумулятивных процессов на основе использования модели WATEM/SEDEM. Выявлена тенденция увеличения рассчитанных по модели площадей зон аккумуляции наносов по мере укрупнения размера ячейки ЦМР. Наименьшие среднегодовые потери почвы за счёт водной эрозии получены в случае использования для расчётов наиболее детальных ЦМР (размер ячейки 1 и 5 м).

Среднегодовые оценки темпов выноса наносов за пределы пашни достаточно близки при использовании ЦМР БПЛА20, ALOS и SRTM при близком размере ячейки ЦМР (от 20 до 38 м). Однако соотношение доли наносов, переотлагающихся внутри пашни (38–60 % от суммарного объёма перемещённого почвенного субстрата), ближе при расчётах ЦМР БПЛА1, БПЛА5, ALOS и SRTM.

Пространственное положение и конфигурацию зон смыва и аккумуляции внутри пашни более реалистично отражают расчёты, выполненные на основе ЦМР, построенных по данным съёмки с использованием БПЛА и топографических карт масштаба 1:10 000, но данный вывод нуждается в полевой верификации.

Модель ASTER не следует использовать для расчётов смыва на пашне из-за существенных искажений рельефа.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 19-29-05025 МК (расчёты смыва, подготовка текста статьи),

госзадания Института географии РАН № АААА-А19-119022190168-8 (получение и обработка данных съёмок с БПЛА, обработка ЦМР), госзадания № 0591-2019-0029 (параметризация эрозионной модели, оцифровка топографической карты).

Литература

1. Жидкин А. П., Смирнова М. А., Геннадиев А. Н., Лукин С. В., Заздравных Е. А., Лозбенов Н. И. Цифровое моделирование строения и степени эродированности почвенного покрова (Прохоровский район Белгородской области) // Почвоведение. 2021. № 1. С. 17–30. DOI: 10.31857/S0032180X21010159.
2. Козлов Д. Н., Жидкин А. П., Лозбенов Н. И. Цифровое картографирование эрозионных структур почвенного покрова на основе имитационной модели смыва (северная лесостепь Среднерусской возвышенности) // Бюл. Почв. ин-та им. В. В. Докучаева. 2019. № 100. С. 5–29. DOI: 10.19047/0136-1694-2019-100-5-35.
3. Ларионов Г. А. Эрозия и дефляция почв: основные закономерности и количественные оценки. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1993. 200 с.
4. Мальцев К. А., Иванов М. А., Шарифуллин А. Г., Голосов В. Н. Изменения темпов смыва почвы в речных бассейнах южного мегасклона европейской части России за последние 30 лет // Почвоведение. 2019. № 6. С. 757–768. DOI: 10.1134/S0032180X19060091.
5. Медведева Р. А., Голосов В. Н., Ермолаев О. П. Пространственно-временная оценка овражной эрозии в зоне интенсивного земледелия европейской части России // География и природные ресурсы. 2018. № 3. С. 29–37. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2018-3(29-37).
6. Пространственно-временные закономерности развития современных процессов природно-антропогенной эрозии на Русской равнине / под ред. Голосова В. Н., Ермолаева О. П. Казань; М.: Изд-во АН РТ, 2019. 372 с.
7. Alewell C., Borrelli P., Meusburger K., Panagos P. Using the USLE: Chances, challenges and limitations of soil erosion modelling // Intern. Soil and Water Conservation Research. 2019. V. 7. Iss. 3. P. 203–225. DOI: 10.1016/j.iswcr.2019.05.004.
8. Borrelli P., Robinson D. A., Fleischer L. R., Lugato E., Ballabio C., Alewell C., Meusburger K., Modugno S., Schütt B., Ferro V., Bagarello V., Oost K. V., Montanarella L., Panagos P. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion // Nature Communications. 2017. V. 8(1). Art. No. 2013. DOI: 10.1038/s41467-017-02142-7.
9. Farr T. G., Rosen P. A., Caro E., Crippen R., Duren R., Hensley S., Kobrick M., Paller M., Rodriguez E., Roth L., Seal D., Schaffer S., Shimada J., Umland J., Werner M., Oskin M., Burbank D., Alsdorf D. The shuttle radar topography mission // Reviews Geophysics. 2007. V. 45(2). P. 1944–9208. DOI: 10.1029/2005RG000183.
10. Golosov V., Koiter A., Ivanov M., Maltsev K., Gusarov A., Sharifullin A., Radchenko I. Assessment of soil erosion rate trends in two agricultural regions of European Russia for the last 60 years // J. Soils Sediments. 2018. V. 18(12). P. 3388–3403. DOI: 10.1007/s11368-018-2032-1.
11. Kobrick M. On the toes of giants: How SRTM was born // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 2006. V. 72(3). P. 206–210.
12. McCool D. K., Brown L. C., Foster G. R. Revised Slope Steepness Factor for the Universal Soil Loss Equation // Trans. American Society of Agricultural Engineers. 1987. V. 30. P. 1387–1396.
13. 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 // Geoscience Frontiers. 2017. V. 8. P. 425–436. DOI: 10.1016/j.gsf.2016.03.004.
14. Montanarella L., Pennock D. J., McKenzie N., Badraoui M., Chude V., Baptista I., Mamo T., Yemefack M., Singh Aulakh M., Yagi K., Young Hong S., Vijarnsorn P., Zhang G.-L., Arruays D., Black H., Krasilnikov P., Sobocká J., Alegre J., Henriquez C. R., de Lourdes Mendonça-Santos M., Taboada M., Espinosa-Victoria D., AlShankiti A., Alavi Panah S. K., Elsheikh E. A. E. M., Hempel J., Camps Arbestain M., Nachtergaele F., Vargas R. World's soils are under threat // Soil. 2016. V. 2. P. 79–82. DOI: 10.5194/soild-2-1263-2015.
15. Panagos P., Borrelli P., Meusburger K., Bofu Yu, Klik A., Lim K. J., Yang J. E., Ni J., Miao C., Chattopadhyay N., Sadeghi S. H., Hazbavi Z., Zabihi M., Larionov G. A., Krasnov S. F., Gorobets A. V., Levi Y., Erpul G., Birkel C., Hoyos N., Naipal V., Oliveira P. T., Bonilla C. A., Meddi M., Nel W., Dashti H. A., Boni M., Diodato N., Van Oost K., Nearing M., Ballabio C. Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records // Scientific Reports. 2017. V. 7(1). Art. No. 4175. DOI: 10.1038/s41598-017-04282-8.
16. Pandey A., Himanshu S. K., Mishra S. K., Singh V. P. Physically based soil erosion and sediment yield models revisited // Catena. 2016. V. 147. P. 595–620. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.08.002>.
17. Rodriguez E., Morris C. S., Belz J. E. A global assessment of the SRTM performance, Photogramm // Photogrammetric Engineering Remote Sensing. 2006. V. 72. P. 249–260. DOI: 10.14358/PERS.72.3.249.

18. Tachikawa T., Kaku M., Iwasaki A., Gensh D. B., Oimoen M. J., Zhang Z., Danielson J. J., Kreiger T., Curtis B., Haase J., Abrams M., Carabajal C. ASTER global digital elevation model version 2 — Summary of validation results: technical report / compiler: D. Meyer; NASA Land Processes Distributed Active Archive Center, Joint Japan – US ASTER Science Team, Sioux Falls: EROS, 2011. 27 p.
19. Takaku J., Tadono T., Tsutsui K. Generation of High Resolution Global DSM from ALOS PRISM, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences // Intern. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. ISPRS TC 4th Symp. 14–16 May 2014, Suzhou, China. 2014. V. XL-4. P. 243–248. DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-4-243-2014.
20. Takaku J., Tadono T., Tsutsui K., Ichikawa M. Quality Improvements of ‘AW3D’ Global DSM Derived from ALOS PRISM // Proc. IEEE Intern. Symp. Geoscience and Remote Sensing (IGARSS). Valencia, Spain. 2018. P. 1612–1615. DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8518360.
21. Van Oost K., Govers G., Desmet P. J. J. Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage // Landscape Ecology. 2000. V. 15. P. 577–589. DOI: 10.1023/A:1008198215674.
22. Van Rompaey A., Verstraeten G., Van Oost K., Govers G., Poesen J. Modelling mean annual sediment yield using a distributed approach // Earth Surface Processes and Landforms. 2001. V. 26(11). P. 1221–1236. DOI: 10.1002/esp.275.

Assessment of the accuracy of digital elevation models for modeling soil erosion (by the example of a small catchment area in the Kursk Region)

A. P. Zhidkin¹, V. N. Golosov^{2,3,4}, A. S. Dobryansky³

¹ V. V. Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow 119017, Russia
E-mail: gidkin@mail.ru

² Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia
E-mail: golosov@gmail.com

³ Institute of Geography RAS, Moscow 119017, Russia
E-mail: alex@igras.ru

⁴ Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan 420008, Russia

Results of evaluation of sediment redistribution in a small cultivated catchment based on the basis of 10 different digital elevation models (DEM) (unmanned aerial vehicle (UAV) surveys, digitized topographic maps, ALOS, SRTM, ASTER, etc.) are presented. Potential soil erosion was calculated using the WATEM/SEDEM based on the RUSLE algorithm. The relevance of the work is due to the lack of comparative assessments of the impact of DEMs on the calculated values of erosion and sedimentation using the erosion modelling. Studies have revealed that the results of mathematical modeling largely depend on the resolution of the DEM. In particular, a tendency to increase the areas of sedimentation zones with an increase in the size of the DEM cell is noted. The average annual estimates of sediment budget are quite close in the case of using a UAV DEM, ALOS and SRTM with a close size of the DEM cell (from 20 to 38 meters). The smallest average annual soil losses from water erosion were obtained using the most detailed DEM (cell size 1 and 5 m). The ASTER model should not be used for calculations of soil erosion on a catchment scale due to the significant distortion of the relief.

Keywords: WATEM/SEDEM, SRTM, ALOS, ASTER, topographic map, unmanned aerial vehicle, accumulation, sediment, chernozem, interpolation, resolution

Accepted: 29.09.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-133-144

References

- Zhidkin A. P., Smirnova M. A., Gennadiev A. N., Lukin S. V., Zazdravnykh E. A., Lozbenev N. I., Digital mapping of soil associations and eroded soils (Prokhorovskii district, Belgorod oblast), *Eurasian Soil Science*, 2021, Vol. 54, No. 1, pp. 13–24, DOI: 10.1134/S1064229321010154.
- Kozlov D. N., Zhidkin A. P., Lozbenev N. I., Digital mapping of soil cover eroded patterns on the basis of soil erosion simulation model (northern forest-steppe of the Central Russian Upland), *Dokuchaev Soil Bul.*, 2019, Vol. 100, pp. 5–35 (in Russian), DOI: 10.19047/0136-1694-2019-100-5-35.
- Larionov G. A., *Eroziya i deflyatsiya pochv: osnovnye zakonomernosti i kolichestvennye otsenki* (Soil erosion and deflation: basic patterns and quantitative estimates), Moscow: Izd. Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta, 1993, 200 p. (in Russian).
- Mal'tsev K. A., Ivanov M. A., Sharifullin A. G., Golosov V. N., Changes in the rate of soil loss in river basins within the southern part of European Russia, *Eurasian Soil Science*, 2019, Vol. 52, No. 6, pp. 718–727, DOI: 10.1134/S1064229319060097.
- Medvedeva R. A., Golosov V. N., Ermolaev O. P., Spatial-temporal assessment of gully erosion in the zone of intensive agriculture in the European part of Russia, *Geography and Natural Resources*, 2018, Vol. 39, No. 3, pp. 204–211, DOI: 10.1134/S1875372818030034.
- Prostranstvenno-vremennye zakonomernosti razvitiya sovremennykh protsessov prirodno-antropogennoi erozii na Russkoi ravnine* (Spatio-temporal patterns of contemporary processes dynamics of natural and human-induced erosion on agricultural lands of the Russian Plain), Golosov V. N., Ermolaev O. P. (eds.), Kazan'; Moscow: Izd. AN RT, 2019, 372 p. (in Russian).
- Alewell C., Borrelli P., Meusburger K., Panagos P., Using the USLE: Chances, challenges and limitations of soil erosion modelling, *Intern. Soil and Water Conservation Research*, 2019, Vol. 7, Issue 3, pp. 203–225, DOI: 10.1016/j.iswcr.2019.05.004.
- Borrelli P., Robinson D. A., Fleischer L. R., Lugato E., Ballabio C., Alewell C., Meusburger K., Modugno S., Schütt B., Ferro V., Bagarello V., Oost K. V., Montanarella L., Panagos P., An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion, *Nature Communications*, 2017, Vol. 8(1), Art. No. 2013, DOI: 10.1038/s41467-017-02142-7.
- Farr T. G., Rosen P. A., Caro E., Crippen R., Duren R., Hensley S., Kobrick M., Paller M., Rodriguez E., Roth L., Seal D., Schaffer S., Shimada J., Umland J., Werner M., Oskin M., Burbank D., Alsdorf D., The shuttle radar topography mission, *Reviews Geophysics*, 2007, Vol. 45(2), pp. 1944–9208, DOI: 10.1029/2005RG000183.
- Golosov V., Koiter A., Ivanov M., Maltsev K., Gusarov A., Sharifullin A., Radchenko I., Assessment of soil erosion rate trends in two agricultural regions of European Russia for the last 60 years, *J. Soils Sediments*, 2018, Vol. 18(12), pp. 3388–3403, DOI: 10.1007/s11368-018-2032-1.
- Kobrick M., On the toes of giants: How SRTM was born, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2006, Vol. 72(3), pp. 206–210.
- McCool D. K., Brown L. C., Foster G. R., Revised Slope Steepness Factor for the Universal Soil Loss Equation, *Trans. American Society of Agricultural Engineers*, 1987, Vol. 30, pp. 1387–1396.
- 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, *Geoscience Frontiers*, 2017, Vol. 8, pp. 425–436, DOI: 10.1016/j.gsf.2016.03.004.
- Montanarella L., Pennock D. J., McKenzie N., Badraoui M., Chude V., Baptista I., Mamo T., Yemefack M., Singh Aulakh M., Yagi K., Young Hong S., Vijarnsorn P., Zhang G.-L., Arrouays D., Black H., Krasilnikov P., Sobocká J., Alegre J., Henriquez C. R., de Lourdes Mendonça-Santos M., Taboada M., Espinosa-Victoria D., AlShankiti A., Alavi Panah S. K., Elsheikh E. A. E. M., Hempel J., Camps Arbestain M., Nachtergaele F., Vargas R., World's soils are under threat, *Soil*, 2016, Vol. 2, pp. 79–82, DOI: 10.5194/soild-2-1263-2015.
- Panagos P., Borrelli P., Meusburger K., Bofu Yu, Klik A., Lim K. J., Yang J. E., Ni J., Miao C., Chattopadhyay N., Sadeghi S. H., Hazbavi Z., Zabihi M., Larionov G. A., Krasnov S. F., Gorobets A. V., Levi Y., Erpul G., Birkel C., Hoyos N., Naipal V., Oliveira P. T., Bonilla C. A., Meddi M., Nel W., Dashti H. A., Boni M., Diodato N., Van Oost K., Nearing M., Ballabio C., Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records, *Scientific Reports*, 2017, Vol. 7(1), Art. No. 4175, DOI: 10.1038/s41598-017-04282-8.
- Pandey A., Himanshu S. K., Mishra S. K., Singh V. P., Physically based soil erosion and sediment yield models revisited, *Catena*, 2016, Vol. 147, pp. 595–620, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.08.002>.
- Rodriguez E., Morris C. S., Belz J. E., A global assessment of the SRTM performance, *Photogrammetric Engineering Remote Sensing*, 2006, Vol. 72, pp. 249–260, DOI: 10.14358/PERS.72.3.249.
- Tachikawa T., Kaku M., Iwasaki A., Gensh D. B., Oimoen M. J., Zhang Z., Danielson J. J., Kreiger T., Curtis B., Haase J., Abrams M., Carabajal C., *ASTER global digital elevation model version 2 — Summary*

- of validation results: technical report*, NASA Land Processes Distributed Active Archive Center, Joint Japan-US ASTER Science Team, Sioux Falls: EROS, 2011, 27 p.
19. Takaku J., Tadono T., Tsutsui K., Generation of High Resolution Global DSM from ALOS PRISM, *Intern. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ISPRS TC 4th Symp.*, 14–16 May 2014, Suzhou, China, 2014, Vol. XL-4, pp. 243–248, DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-4-243-2014.
 20. Takaku J., Tadono T., Tsutsui K., Ichikawa M., Quality Improvements of ‘AW3D’ Global DSM Derived from ALOS PRISM, *IEEE Intern. Symp. Geoscience and Remote Sensing (IGARSS)*, Valencia, Spain, 2018, pp. 1612–1615, DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8518360.
 21. Van Oost K., Govers G., Desmet P.J.J., Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage, *Landscape Ecology*, 2000, Vol. 15, pp. 577–589, DOI: 10.1023/A:1008198215674.
 22. Van Rompaey A., Verstraeten G., Van Oost K., Govers G., Poesen J., Modelling mean annual sediment yield using a distributed approach, *Earth Surface Processes and Landforms*, 2001, Vol. 26(11), pp. 1221–1236, DOI: 10.1002/esp.275.