

УДК 528.88:551.4.013+631.459.2

DOI: 10.18524/2303-9914.2020.2(37).216561

О. О. Світличний, доктор геогр. наук, професор
Одеський національний університет імені І. І. Мечникова,
кафедра фізичної географії, природокористування
і геоінформаційних технологій,
Шампанський пров, 2, Одеса, 65058, Україна
svetlitchnyi.aa.od@gmail.com

ПРО ВИКОРИСТАННЯ ВІЛЬНО ПОШИРЮВАНИХ ГЛОБАЛЬНИХ ЦИФРОВИХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЄФУ ВИСОКОЇ ПРОСТОРОВОЇ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ ДЛЯ РОЗРАХУНКІВ ВОДНОЇ ЕРОЗІЇ ГРУНТУ

Виконано оцінку точності відображення рельєфу вільно поширюваними глобальними цифровими моделями рельєфу високої просторової роздільної здатності SRTM, ASTER GDEM і AW3D30 і можливості їх використання для просторово-розподілених розрахунків водної ерозії ґрунтів. Оцінка точності цифрових моделей рельєфу виконана для тестової ділянки площею близько 340 км², розташованої на півночі Одеської області на південних відрогах Подільської височини. Як еталон використана цифрова модель рельєфу, побудована на основі оцифровки великомасштабної топографічної карти і подальшої просторової інтерполяції результатів методом звичайного точкового кригінга.

Ключові слова: SRTM90, SRTM30, ASTER GDEM, AW3D30, ерозія ґрунту, розрахунки, оцінка точності.

ВСТУП

Цифрова модель рельєфу (ЦМР) є обов'язковим цифровим шаром геоінформаційних систем різного спрямування і/або в складі ГІС, або самостійно використовується в геоморфології, гідрології, геології, метеорології і кліматології, ґрунтознавстві, ландшафтознавстві, геоботаніці, археології, сільському господарстві, інженерних вишукуваннях і проектуванні, військової справі та інших науках і сферах людської діяльності. Довгий час цифрові моделі рельєфу території дослідження або проектування будувалися або на основі інструментальної зйомки рельєфу території, або з використанням результатів оцифровки великомасштабних топографічних карт. У будь-якому випадку побудова ЦМР представляла собою трудомістку процедуру, обсяг якої збільшувався зі збільшенням розміру і складності рельєфу території, а також підвищення вимог до точності моделі. Ситуація змінилася в останні два десятиліття, коли у вільному доступі з'явилися цифрові моделі рельєфу глобального охоплення і високої просторової роздільної здатності SRTM, ASTER GDEM і AW3D30.

Масиви цифрових даних про рельєф SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) представляють собою результат обробки даних радарної інтерферометричної зйомки, проведеної з борту космічного корабля багаторазового використання (шаттла) «Індевор» з 11 по 22 лютого 2000 р. Зйомка проведена для поверхні Земної кулі між 60° північної широти і 56° південної широти і охоплює близько 80 % суші [36, 37].

Перший випуск результатів радарної зйомки рельєфу, виконаної космічним човником, у вигляді цифрової моделі рельєфу здійснений в 2003 році з FTP-сервера Геологічної служби США (USGS). Обробка первинних даних була виконана Національним управлінням з авіації і дослідження космічного простору (NASA) і Геологічною службою США. Для Сполучених Штатів дані були надані з просторовою роздільною здатністю 1 кутова секунда ($1''$) (приблизно 30 м), для решті світу дані були представлені з просторовою роздільною здатністю 3 кутові секунди ($3''$) (приблизно 90 м). В результаті подальшої обробки первинних даних, в тому числі із залученням додаткової інформації, були випущені версії: 2 – «остаточна» 3 – «оброблена» або SRTM Plus, 4 і 4.1. Обробка полягала у виділенні берегових ліній, фільтрації помилкових значень, заповненні «дірок» в матриці висот, наявність яких в первинному масиві даних обумовлено рядом причин, серед яких «затінення» окремих елементів рельєфу, характерне для гірських районів, складність визначення висоти поверхні Землі для водних просторів, специфічні технічні проблеми. [24, 28, 36]. Постобробка первинних даних і поширення останніх версій, в тому числі поточної версії 4.1 [32], здійснюються Консорціумом просторової інформації Консультативної групи з міжнародних сільськогосподарських досліджень (CGIAR Consortium for Spatial Information - CGIAR CGI Consortium).

У вересні 2014 р. Геологічною службою США було оголошено, а в 2015 р. розпочато паралельно з поширенням 90-метрових даних вільне поширення SRTM30 - топографічних даних 30-метрової просторової роздільної здатності для всієї поверхні Земної кулі, покритої радарної зйомкою.

Всі версії топографічних даних SRTM поширюються з використанням географічної системи координат (широта, довгота) на основі референц-еліпсоїда WGS84 (EPSG: 4326). Висоти даються відносно поверхні геоїда EGM96 з округленням до цілих метрів.

Наступною після цифрової моделі рельєфу SRTM є глобальна цифрова модель рельєфу, створена спільно Міністерством економіки, торгівлі і промисловості Японії (Ministry of Economy, Trade, and Industry – METI) і NASA, США. Цифрова модель рельєфу в рамках цього проекту побудована на основі автоматичної обробки даних стереоскопічної в ближньому інфрачервоному діапазоні зйомки поверхні Землі, проведеної в грудні 1999 р. вдосконаленим супутниковим радіометром теплового випромінювання та відбивання (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer – ASTER), встановленим на борту супутника NASA "Terra". Створена цифрова модель наземного

рельєфу для поверхні Земної кулі між 83° північної широти і 83° південної широти отримала назву ASTER GDEM [14].

Версія 1 ASTER GDEM почала вільно поширюватися METI і NASA влітку 2009 р, вдосконалена версія 2 – в жовтні 2011 р. [15], в серпні 2019 р. було оголошено про випуск 3-ої версії ASTER GDEM [26]. Третя версія ASTER GDEM створена на основі даних стереоскопічної зйомки в проміжок часу між 1 березня 2000 і 30 листопада 2013 р. ASTER GDEM версії 3 характеризується більш високою якістю покриття і, відповідно, меншою ймовірністю появи помилок, а також використанням більш досконалих алгоритмів обробки даних, що забезпечили підвищену в порівнянні з попередніми версіями точність по вертикалі і горизонталі [11, 16].

ASTER GDEM поширюється так само, як і масив топографічних даних SRTM, в географічній системі координат WGS84/EGM96 с просторовою роздільною здатністю 1 кутова секунда (приблизно 30 метрів) і з округленням висот до цілих метрів.

Японське агентство аерокосмічних досліджень (Japan Aerospace Exploration Agency – JAXA) з 2014 року розпочало реалізацію проекту зі створення «точної цифрової 3D-карти» глобального охоплення на основі використання 3-х мільйонів архівів сцен, отриманих з 2006 по 2011 рр. за допомогою датчика панхроматичного дистанційного стереокартографування (Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping – PRISM), встановленого на вдосконаленому супутнику спостереження Землі (Advanced Land Observing Satellite - ALOS). Результатом цього проекту, що отримав назву «ALOS World 3D», стало створення за термінологією розробників «цифрової моделі рельєфу» (Digital Elevation Model) або «цифрової моделі поверхні» (Digital Surface Model) для суші Земної кулі, що лежить між 82° північної і 82° південної широти з просторовою роздільною здатністю 0,15 кутової секунди (близько 5 м) [17, 27, 35].

З травня 2015 року, як зазначено на сайті JAXA [41], або з травня 2016 року, як значиться на сайті OpenTopography [23], Японським агентством аерокосмічних досліджень розпочато вільне поширення глобальної цифрової моделі поверхні з горизонтальною роздільною здатністю 1 кутова секунда, що іменується «AW3D30». Набір даних AW3D30 відповідно до [23] є найбільш точним в даний час масивом топографічних даних в глобальному масштабі.

Цифрова модель рельєфу AW3D30 так само як SRTM і ASTER-GDEM для координування в горизонтальній площині використовує географічну систему координат на основі референц-еліпсоїда WGS84. Але висоти відраховуються не від поверхні референц-геоїда, як в SRTM і ASTER GDEM, а від поверхні референц-еліпсоїда WGS84. При цьому висоти в AW3D30 представлені дійсними числами.

Необхідно відзначити, що, строго кажучи, всі три обговорювані цифрові моделі не є цифровими моделями рельєфу, оскільки при їх зйомці фіксується висотне положення поверхні що відбиває або випромінює, в тому числі буді-

вель, споруд, лісових масивів. Строго кажучи, це – цифрові моделі місцевості (ЦММ), які є цифровими моделями рельєфу лише для оголеної поверхні і, з деякою умовністю, для сільськогосподарських угідь, які, власне, і становлять інтерес в даній статті. Тому будемо надалі слідом за їх розробниками використовувати для позначення масивів топографічних даних SRTM, ASTER GDEM і AW3D30 терміни "глобальна цифрова модель рельєфу" або "цифрова модель рельєфу", враховуючи проте ту обставину, що наявні в межах території моделювання будівлі, споруди, лісонасадження можуть внести спотворення в масиви топографічних даних, причому тим більші, чим вище їх просторова роздільна здатність.

Велике значення для практичного використання має точність вільно поширюваних глобальних цифрових моделей рельєфу. Розробниками глобальних ЦМР виконана попередня оцінка їх горизонтальної і вертикальної точності. Для ЦМР SRTM спочатку була оголошена можлива помилка з імовірністю 90 % в плані менше 20 м, по висоті - менше 16 м [2]. В подальшому вона була зменшена, зокрема, для Євразії в середньому до 8,8 м і 6,2 м, відповідно [12, 29]. Вертикальна точність глобальної ЦМР ASTER версії 2 для Євразії оцінена в 10,38 м, горизонтальна – до 0,20" або 6 м [15]. Для ЦМР ASTER версії 3 характерно деяке підвищення вертикальної і горизонтальної точності. Зокрема, для території Японії середня помилка висоти зменшилася з 12,6 м, до 12,1 м, планова – з 6 м до 5,4 м [16]. ЦМР AW3D30 має заявлену вертикальну і горизонтальну точність 5 м [35, 27, 39].

Однак дослідження, проведені в різних країнах, показали, що реальна точність матриць висот глобальних ЦМР може істотно відрізнятись від оголошеної розробниками. Зокрема, в Технічному звіті, присвяченому оцінці точності ЦМР SRTM [12], вертикальна і планова помилки ЦМР в межах Євразії при середніх величинах 8,8 м і 6,2 м можуть перевищувати 15 м. У публікаціях, присвячених оцінці вертикальної точності цифрових моделей рельєфу SRTM з просторовою роздільною здатністю 3" і 1" і ASTER GDEM з просторовою роздільною здатністю 1", проведеної в Швейцарії [22], Угорщині [34], Тунісі [20], Індії [25], Російської Федерації [8], як правило, відзначається більш висока вертикальна точність моделі STRM. При цьому в більшості випадків робиться висновок, що обидві моделі є «корисними» і можуть замінити місцеві топографічні карти.

В останні роки в зв'язку з появою у вільному доступі глобальної цифрової моделі рельєфу AW3D30 низкою дослідників проведена порівняльна оцінка точності трьох глобальних ЦМР – SRTM30, ASTER та AW3D30 [6, 13, 21, 30, 40], а також двох ЦМР – AW3D30 та SRTM [5, 31]. У всіх дослідженнях найбільш високою вертикальною точністю характеризується цифрова модель AW3D30, для якої середньо квадратична помилка в дослідженнях [6, 13, 30] склала 5,40-5,68 м, в дослідженні [21] – 7,87 м. Однак в дослідженні [40] вертикальна середньо квадратична помилка моделі AW3D30 склала 13,06 м, хоча і була найменшою з

трьох розглянутих ЦМР. Важливо підкреслити, що висновки про точність тієї чи іншої цифрової моделі рельєфу зроблені авторами проведених досліджень на основі використання в якості критеріїв вертикальної точності, як правило, абсолютної і відносної різниці середніх висот, середньо квадратичної помилки (RMSE), коефіцієнта кореляції і критерія Неша-Скаттліфа оцінюваної ЦМР і деякої референц-ЦМР. Як референц-ЦМР використані ЦМР, побудована на основі великомасштабної топографічної карти (М 1:10000-1:100000), або опорна геодезична мережа, або висотні позначки земної поверхні, отримані на основі високоточної GPS-зйомки.

Що стосується досліджень з оцінки можливості застосування загальнодоступних глобальних ЦМР для розрахунків ерозійних втрат ґрунту, то їх кількість досить обмежена. При цьому в присвячених цій темі публікаціях [8, 25] досліджуються тільки дві ЦМР – SRTM і ASTER GDEM і в основному одна математична модель водної ерозії – Універсальне рівняння втрат ґрунту (USLE). У статті [25], присвяченій аналізу впливу на результати розрахунків ерозійних втрат ґрунту розміру комірки раstra, отримано, що при розмірі комірки 30 м середній модуль змиву ґрунту практично однаковий при використанні моделей рельєфу SRTM і ASTER (9,60 і 9,70 т/га/рік, відповідно). Але площі з певним інтервалом значень інтенсивності змиву відрізняються досить суттєво. У статті [8] виконана оцінка результатів розрахунків змиву ґрунту на орних землях тестового водозбору, розташованого в Вороніжській області Російської Федерації, з використанням цифрових моделей рельєфу SRTM з просторовою роздільною здатністю 90 м і ASTER GDEM версії 2 з просторовою роздільною здатністю 30 м. Для розрахунків втрат ґрунту використано модифіковане Універсальне рівняння ерозії ґрунтів і модель ГГІ [7]. Встановлено, що використання цифрової моделі рельєфу SRTM90 дозволяє отримати в середньому для водозбору трохи занижені, але близькі до отриманих з використанням референц-ЦМР значення потенційного змиву ґрунту. Однак співвідношення площ зон з різною інтенсивністю змиву істотно відрізняються. При цьому цифрова модель рельєфу ASTER для розрахунків змиву ґрунту використана не була внаслідок нереалістичності низки морфометричних показників, отриманих на її основі.

Таким чином, вертикальна точність вільно поширюваних глобальних цифрових моделей рельєфу, по-перше, істотно змінюється в залежності від характеру рельєфу і виду поверхні, в зв'язку з чим в конкретних умовах потребує незалежній перевірці. По-друге, при явній більш високій точності цифрової моделі місцевості ASTER для неї характерні специфічні особливості, як, наприклад, наявність досить великої кількості локальних викидів значень. Можливість використання глобальних ЦМР для розрахунку ерозійних втрат ґрунту з використанням сучасних математичних моделей вивчена в даний час явно недостатньо. Наявні нечисленні спроби це оцінити вказали на важливість коректної оцінки просторового розподілу ерозійних втрат ґрунту по схилу або во-

дозбору, що залежить в першу чергу від коректної оцінки таких морфометричних показників рельєфу як місцеві ухили і експозиції, які не враховуються при стандартній оцінці точності ЦМР. У зв'язку з викладеним уявляється актуальною оцінка можливості використання вільно поширюваних глобальних цифрових моделей рельєфу високої просторової роздільної здатності для розрахунків ерозійних втрат ґрунту, в тому числі їх просторового розподілу в межах схилу або невеликого водозбору, що і є метою цієї статті.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

В якості тестової ділянки обрана територія фізико-географічного стаціонару Одеського національного університету імені І. І. Мечникова, розташованого в Балтському районі Одеської області на південних відрогах Подільської височини в басейнах двох малих річок – Кодими і Савранки, що відносяться до басейну Південного Бугу. Тестова ділянка має прямокутну форму. Розміри ділянки: із заходу на схід – 23,0 км, з півночі на південь – 14,6 км, площа ділянки – близько 340 км².

На півночі територія обмежена долиною річки Смолянка, що є притокою р. Савранки, на півдні – балкою Пассат, що відноситься до басейну р. Кодими. Поверхня ділянки розчленована серією балок, в центральній і південній частині (в басейні р. Кодими) орієнтованих з північного заходу на південний схід, в північній частині (басейні р. Савранки) – з півдня на північ. Для басейну р. Кодими характерні балки довжиною 7-15 км з пологими довгими схилами, балки басейну р. Савранки значно коротші (2-4 км), з більш крутими схилами. Макроформа схилів опукла. Середня абсолютна висота ділянки складає 189,4 м, позначки вододілів – 225-235 м, глибина ерозійного врізу балок – 50-80 м, долини річки Смолянки – близько 100 м.

Як місцева референц-ЦМР використана цифрова модель рельєфу тестової ділянки (рис. 1) з розміром комірки растра 30 м, побудована на основі топографічної карти масштабу 1: 100000. Побудову цифрової моделі виконано на кафедрі фізичної географії та природокористування ОНУ імені І. І. Мечникова В. О. Бурдейною. При побудові ЦМР просторова інтерполяція виконана з використанням звичайного точкового кригінгу.

Більшу частину території тестової ділянки займають сільськогосподарські землі, які використовуються для вирощування переважно зернових і просапних сільськогосподарських культур, але є також лісові масиви, полезахисні лісові смуги, дороги, кілька сіл з одноповерховою забудовою садибного типу.

Розрахунки змиву (або ерозійних втрат) ґрунту виконувалися з використанням просторово-розподіленої ГІС-реалізованої фізико-статистичної моделі змиву-акумуляції ґрунту, розробленої на кафедрі фізичної географії та природокористування ОНУ імені І. І. Мечникова [33]. При цьому змив ґрунту розраховувався в припущенні, що вся територія розорана, а ґрунтовий покрив представлений одним ґрунтовим різновидом – чорноземом типовим. Тобто

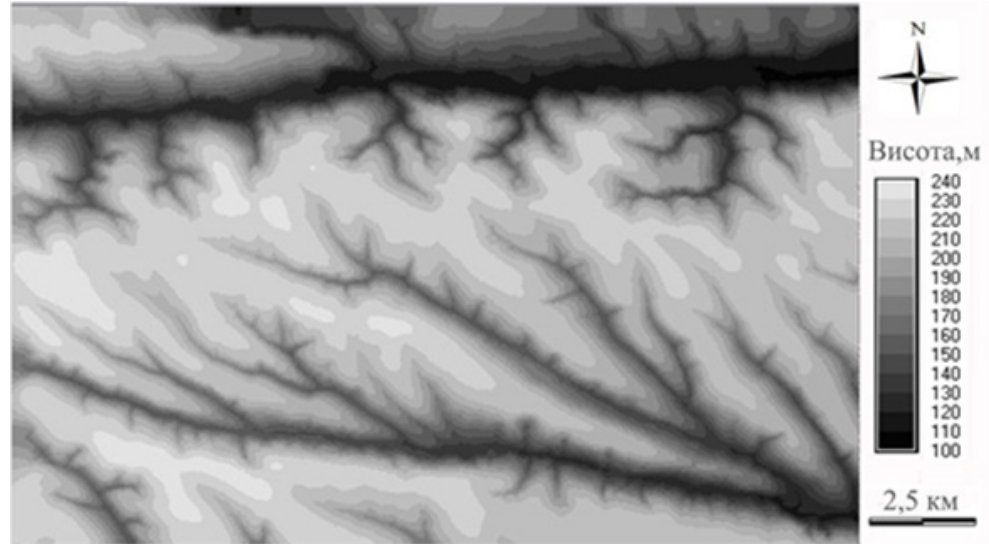


Рис. 1. Рельєф тестової ділянки (цифрова модель рельєфу ТОРО30)

розраховувався умовний потенціальний змив – змив ґрунту в даних рельєфних і гідрометеорологічних умовах при повній розораності території, але без урахування просторової структури ґрунтового покриву.

Оцінювалися глобальні цифрові моделі рельєфу:

- 1) SRTM версії 4.1 з просторовою роздільною здатністю 1" (близько 30 м);
- 2) SRTM версії 3 з просторовою роздільною здатністю 3" (близько 90 м);
- 3) ASTER GDEM версії 3 з просторовою роздільною здатністю 1";
- 4) AW3D30 с такою ж просторовою роздільною здатністю.

Ці цифрові моделі рельєфу розміром $1 \times 1^\circ$ для району розташування тестової ділянки були завантажені з відповідних Інтернет-сайтів і були використані для «вирізання» відповідних ЦМР для тестової ділянки. Позначимо цифрові моделі рельєфу тестової ділянки як SRTM30, SRTM90, ASTER30 і AW3D30. Референц-ЦМР тестової ділянки з розміром комірки растра 30 м позначимо як ТОРО30, а створену на її основі ЦМР шляхом ковзного осереднення в вікні розміром 3×3 комірки з комірки 90 м – як ТОРО90. Вона також приймала участь в оцінюванні з метою встановлення впливу збільшення розміру комірки растра цифрової моделі рельєфу на результати розрахунків змиву ґрунту.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Візуальний аналіз цифрових моделей рельєфу показав, що всі вони досить добре відображають особливості рельєфу тестової ділянки. Основні морфометричні характеристики всіх ЦМР представлені в табл. 1. З таблиці випливає, що середня абсолютна висота ділянки відповідно до цифрових моделей рельєфу SRTM30, SRTM90 і ASTER30 близька середній абсолютній висоті ЦМР

ТОРО30. Різниця середніх абсолютних висот цих моделей рельєфу і місцевої референц-ЦМР змінюється від +0,84 м до –0,37 м, тобто по модулю складає не більше, ніж 0,5 %.

Таблиця 1

**Основні морфометричні характеристики цифрових моделей рельєфу
тестової ділянки**

Характеристика	Цифрові моделі рельєфу тестової ділянки					
	ТОРО30	ТОРО90	SRTM30	SRTM90	ASTER30	AW3D30
Мінімальна висота, м	107,76	107,00	107,39	107,39	70,78	133,5
Максимальна висота, м	238,47	238,39	251,49	250,00	263,74	288,86
Середня висота, м	189,44	189,35	190,28	189,75	189,07	220,82
Середньоквадратичне відхилення висоти, м	32,85	32,79	33,16	33,07	33,60	32,74
Ухил мінімальний, %	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ухил максимальний, %	45,5	26,2	45,4	26,9	69,9	79,4
Ухил середній, %	5,99	5,44	6,14	5,42	8,56	6,73
Середньоквадратичне відхилення ухилу, %	4,96	4,19	4,88	4,12	5,82	5,83
Частина площі з ухилами менше 0,01	12,2	12,2	5,8	9,0	2,2	12,2
Частина площі з ухилами більше 0,10	19,4	15,3	18,2	14,3	32,6	23,0
Середня довжина ліній струму води, м	423,7	746,3	313,8	640,9	284,1	318,3

Висоти цифрової моделі рельєфу тестової ділянки AW3D30 істотно відрізняються як від висот референц-ЦМР, так і від висот інших цифрових моделей рельєфу в бік завищення. Середня абсолютна висота AW3D30 вище середньої абсолютної висоти ТОРО30 на 31,38 м або на 16,6 %, мінімальна – на 25,74 м, максимальна – на 50,39 м. Це завищення обумовлено тим, що вертикальні позначки місцевості на AW3D30 відраховуються від поверхні референц-еліпсоїда WGS84, а не референц-геоїда EGM96, як в моделях SRTM і ASTER. Карта відхилень геоїда моделі EGM96 від еліпсоїда WGS84, наведена в [4], для району розташування тестової ділянки дає приблизно – 30 м, що відповідає різниці середніх висот ТОРО30 і AW3D30.

Мінімальні абсолютні висоти моделей ТОРО90, SRTM30 і SRTM90 практично не відрізняються від мінімальної абсолютної висоти референц-ЦМР. Виняток становить ASTER30, мінімальна абсолютна висота якої дорівнює 70,78 м, що практично на 37 м нижче мінімальної абсолютної висоти ЦМР ТОРО30. Це явна помилка, так званий локальний «викид» моделі ASTER30,

оскільки в оточуючих комірках растру абсолютні висоти поверхні перевищують 100 м. Максимальна абсолютна висота ЦМР ASTER30 дорівнює 263,74 м, що на 25,27 м вище, ніж референц-ЦМР (табл. 1). Аналіз показує, що це також локальний «викид», тобто помилкове значення, але зі знаком «плюс». Одна з поруч розташованих комірок має позначку 249,92 м, тобто на відстані 30 м перепад висот на ЦМР тут становить 13,82 м, що неможливо для рівної вододільної поверхні, на якій розташована комірка з максимальною абсолютною висотою.

Необхідно відзначити ще дві важливі особливості цифрової моделі рельєфу ASTER30, що відрізняють її від інших цифрових моделей рельєфу. Перша полягає в нерегулярності ЦМР навіть на плоских вододілах, яка виражена перепадами висот в 10-15 м і більше на відстані в кілька десятків метрів. Друга – в наявності на ЦМР крім локальних «викидів» ще одного «артефакту», який представляє собою поздовжні замкнуті зниження субмеридіанального простягання довжиною від декількох сотень метрів до 2-х кілометрів, шириною 150-200 м і глибиною до 20-30 м. У межах тестової ділянки на ЦМР ASTER30 таких знижень налічується близько десятка. На місцевості, як і на інших цифрових моделях рельєфу, таких знижень не виявлено.

Підкреслимо, що при розрахунках змиву ґрунту безпосередньо абсолютна або відносна висоти земної поверхні участі не приймають. Факторами ерозійного процесу є ухил, довжина, експозиція, поздовжня і поперечна форма схилів, які обчислюються з використанням цифрової моделі рельєфу даної території. При цьому в сучасних просторово-розподілених моделях ерозійних втрат ґрунту використовується не довжина схилу як така, а довжина лінії струму води до даної комірки растру, яка може бути як менше, так і, в певних випадках, більше довжини схилу.

Відносно коректності ухилів схилів, обчислених з використанням глобальних ЦМР, необхідно відзначити наступне. По-перше, зі зменшенням просторової роздільної здатності ЦМР, тобто зі збільшенням розміру комірок растру, закономірно зменшуються як середній, так і максимальний ухил поверхні. При цьому для максимальних ухилів це зниження виражене в значно більшому ступені. Так, з табл. 1 випливає, що середні ухили, обчислені з використанням моделей TOPO90 і SRTM90, приблизно на 10 % менше середніх ухилів, обчислених з використанням моделей TOPO30 і SRTM30, відповідно. Для максимальних ухилів це зменшення становить близько 40 %. По-друге, і середні, і максимальні ухили для різних глобальних ЦМР 30-ти метрової просторової роздільної здатності в різному ступені відрізняються від відповідних ухилів для TOPO30. Лише модель SRTM30 дає максимальний ухил, що практично не відрізняється від відповідного ухилу TOPO30, а середній – всього на 13 % більший. Для моделі ASTER30 це перевищення становить 54 і 57 %, для моделі AW3D30 – 75 і 24 %, відповідно.

Ще більше відрізняються один від одного і від референц-розподілу просто-

рові розподіли ухилів. На рис. 2 представлена діаграма розподілу площі тестової ділянки за діапазонами ухилів для всіх шести аналізованих ЦМР. Аналіз рис. 2 показує, що в різному ступені близькими до розподілу ухилів референц-ЦМР є розподіл ухилів ЦМР TOPO90, SRTM90 і AW3D30. Найбільшою мірою відрізняються від референц-ЦМР розподіли ухилів моделей SRTM30 і ASTER30.

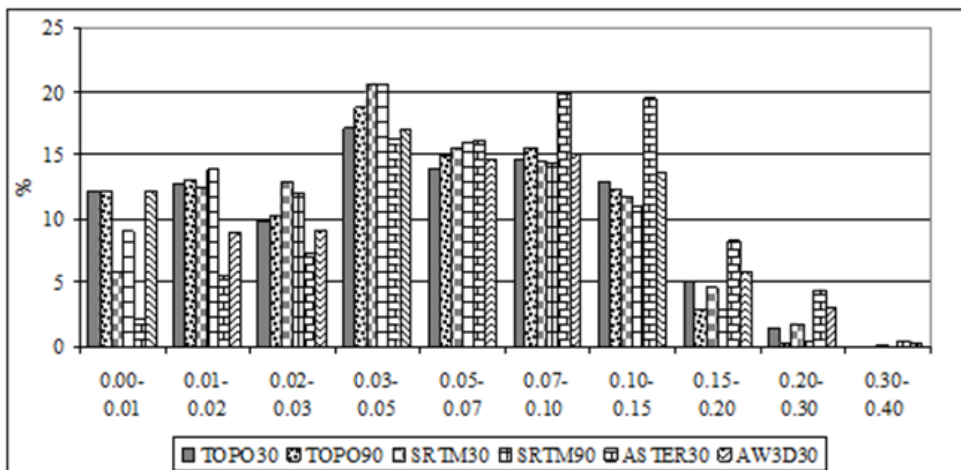


Рис. 2. Розподіл площі ділянки (%) за градаціями ухилів поверхні (в безрозмірних одиницях) для шести цифрових моделей рельєфу

Однією з причин особливостей просторового розподілу ухилів, обчислених з використанням цифрових моделей рельєфу високої просторової роздільної здатності SRTM30 і ASTER30, є представлення висот в цих моделях цілими числами. За рахунок округлення до цілого числа висот суміжних комірок ухил може бути штучно занижений або завищений щодо істинного значення. Так, в привододільних частинах схилів, де ухил зазвичай менше 0,01, за рахунок округлення відміток поверхні до цілих метрів ухил може бути штучно зменшений до 0,0 або збільшений до 0,017 в залежності від співвідношення відміток комірок, розташованих вище і нижче даної. Поверхня привододільних просторів на карті ухилів в цьому випадку розбивається на ізольовані області підвищених і знижених значень (рис. 3).

Для моделі ASTER30 на просторовий розподіл ухилів крім цього впливає наявність на цифровій моделі рельєфу артефактів, обумовлених технічними особливостями зйомки земної поверхні і подальшої обробки результатів. У зв'язку з цим просторовий розподіл ухилів для моделі ASTER30 має найбільш складний і нерегулярний характер (рис. 3с).

Ще однією причиною спотворення просторового розподілу ухилів на глобальних ЦМР, отриманих на основі дистанційного зондування Землі, є

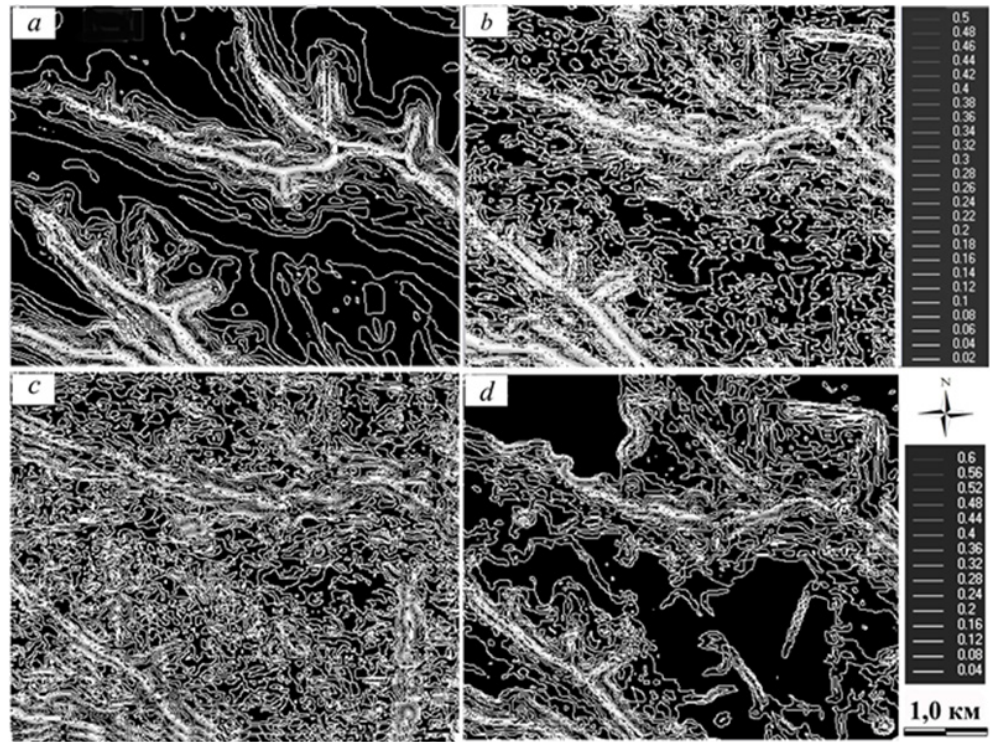


Рис. 3. Фрагменти карт просторового розподілу ухилів поверхні (безрозм.), побудованих з використанням цифрових моделей рельєфу TOPO30 (a), SRTM30 (b), ASTER30 (c) і AW3D30

наявність на розглянутій території лісонасаджень, будівель і споруд. Оскільки при використанні як активних, так і пасивних методів зйомки в місцях розташування цих об'єктів фіксуються не висотні відмітки земної поверхні, а поверхні цих об'єктів, це неминуче додатково ускладнює просторовий розподіл висотних відміток і, відповідно, ухилів. При цьому, чим вище просторова роздільна здатність ЦМР, тим більший вплив надають перераховані об'єкти на розподіл висот і ухилів. З точки зору мети даного дослідження особливо необхідно відзначити негативний вплив на коректність ЦМР високої просторової роздільної здатності лісових смуг різного призначення, які знаходяться у межах сільгоспугідь.

У цифровій моделі рельєфу SRTM90 висоти також представлені цілими числами, однак вона значно більш коректно відображає розподіл ухилів за рахунок втричі більшого горизонтального базису при обчисленні місцевого ухилу, рівного $2a$, де a – розмір комірки растра. Лісосмуги внаслідок їх невеликої ширини, а одноповерхові будівлі – розмірів по відношенню до розміру комірки, при 90-метрової просторової роздільної здатності практично не впливають на розподіл висот і ухилів в межах території, що розглядається.

«Високоточна» цифрова модель рельєфу AW3D30, висоти якої представлені дійсними числами, вільна від спотворення поля ухилів поблизу вододілів, обумовленого округленням висотних відміток поверхні до цілих метрів, характерного для ЦМР SRTM30 і ASTER30. Однак підвищена вихідна детальність зйомки AW3D30 (5 м) в поєднанні з наявністю на тестовій ділянці штучних об'єктів обумовлюють більш складний просторовий розподіл ухилів поверхні, ніж одержуваний на основі TOPO30. Проте, з просторових розподілів, представлених у вигляді карт (рис. 3) і діаграми (рис. 2) випливає, що розподіл ухилів для AW3D30 найбільшою мірою відповідає просторовому розподілу ухилів, характерного для референц-ЦМР.

Нерегулярність поверхні ЦМР високої просторової роздільної здатності внаслідок представлення висот цілими числами, наявність штучних і природних об'єктів на зомній поверхності і не усунених постобробкою артефактів обумовлюють спотворення не тільки просторового розподілу ухилів, але також експозицій поверхні і, як результат, ліній струму води. Внаслідок цього для ЦМР SRTM30 і ASTER30 характерна на чверть або навіть на третину зменшена по відношенню до референц-ЦМР середня довжина ліній струму, а для TOPO90 і SRTM90 навпаки – в 1,5-1,7 рази збільшена (табл. 1).

Зазначені особливості розглянутих цифрових моделей рельєфу, безумовно, повинні впливати на результати розрахунків водної ерозії ґрунту. В першу чергу це відноситься до просторового розподілу ухилів, оскільки модуль змиву ґрунту пропорційний ухилу в ступені, який в середньому дорівнює 1,3-1,4. Зміна довжини ліній струму води також має проявитися при розрахунках змиву ґрунту, але в меншій мірі, оскільки модуль змиву ґрунту пропорційний довжині схилу в ступені, в середньому меншим 0,5.

Результати розрахунків середньорічного модуля потенційного змиву (або втрат) ґрунту для тестової ділянки представлені в табл. 2. З таблиці випливає, що середні по площі модулі потенційного змиву ґрунту, розраховані з використанням глобальних ЦМР, відрізняються від значення, отриманого з використанням референц-ЦМР (15,4 т/га/рік) не більше, ніж на 16,2 % в бік заниження (SRTM90). Причому для трьох цифрових моделей рельєфу (SRTM30, SRTM90 і AW3D30) характерні більш низькі значення середніх по площі модулів змиву по відношенню до референц-ЦМР, для двох (TOPO90 і ASTER30) – більш високі. В цілому, всі значення досить близькі і потрапляють в один діапазон оцінки ерозійної небезпеки земель 10-20 т/га/рік – «висока ерозійна небезпека» [10].

Близькі розрахункові значення середніх по чималій площі тестової ділянки (близько 340 км²) ерозійних втрат ґрунту, незважаючи на суттєво різні просторові розподіли ухилів поверхні і довжин ліній струму для різних ЦМР, очевидно, обумовлені тим, що при розрахунках зміни ухилів і довжин ліній струму частково компенсують один одного. Дійсно, збільшення ухилів в порівнянні з референц-ЦМР, характерне для цифрових моделей рельєфу високої просторо-

Таблиця 2

Середні по площі тестової ділянки середньорічні модулі змиву ґрунту, отримані з використанням різних цифрових моделей рельєфу

Номер по порядку	Цифрова модель рельєфу	Модуль змиву ґрунту, т/га/рік	Відмінність від ТОРО30 в	
			т/га/рік	%
1	ТОРО30	15,4	0,0	0,0
2	ТОРО90	16,0	0,6	3,9
3	SRTM30	14,4	-1,0	-6,5
4	SRTM90	12,9	-2,5	-16,2
5	ASTER30	15,8	0,4	2,6
6	AW3D30	13,7	-1,7	-11,0

рової роздільної здатності (1"), компенсується зменшенням для них довжини ліній струму (табл. 1). Для цифрових моделей з роздільною здатністю 3" характерне для них зменшення ухилів в порівнянні з референц-ЦМР буде частково компенсуватися збільшенням довжини ліній струму. Однак ступінь такої компенсації залежить від характеру рельєфу, особливостей його відображення цифровою моделлю, а також розмірів території. Тому наведені в табл. 2 числа, що характеризують відмінність середніх модулів змиву для глобальних ЦМР від референц-ЦМР, відповідають особливостям конкретної ділянки. Для інших ділянок, а також при зменшенні розмірів даної ця відмінність може як зменшуватися, так і збільшуватися, особливо при використанні ЦМР ASTER30, враховуючи характерну для неї наявність артефактів.

На відміну від середніх по площі модулів змиву ґрунту просторовий розподіл модулів змиву, розрахованих з використанням глобальних ЦМР, в деяких випадках істотно відрізняється від одержуваного з використанням місцевої референц-ЦМР (рис. 4). В першу чергу це відноситься до просторового розподілу, одержаного з використанням ЦМР ASTER30. Так, площа умовно ерозійно безпечних земель (зі зливом ґрунту менше 2 т/га/рік) для референц-ЦМР становить 29,2 %, а для ASTER30 – 10,4 %, тобто майже в три рази менше. При цьому в 1,5 і 1,3 рази, відповідно, збільшена площа земель з високою (10-20 т/га/рік) і дуже високою (20-50 т/га/рік) ерозійної небезпекою.

Хороша відповідність референц-розподілу змиву ґрунту, як і слід було очікувати, демонструє розподіл для ЦМР ТОРО90, для якого по всіх діапазонах величини змиву ґрунту (крім останнього - понад 50 т/га/рік) відповідні площі не відрізняються більш, ніж на 16 %. Площа ж земель з катастрофічною ерозійною небезпекою (>50 т/га/рік) для ЦМР ТОРО90 менше відповідної референц-площі на 29 %. Але найкращу відповідність референц-розподілу демонструє просторовий розподіл змиву ґрунту, отриманий з використанням

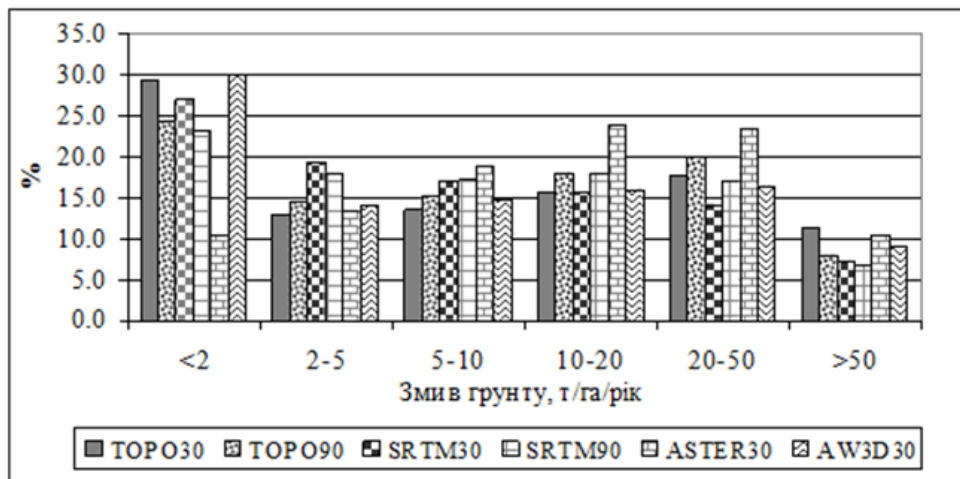


Рис. 4. Розподіл площі тестової ділянки (%) по градаціях потенційного змиву ґрунту

AW3D30. Для всіх діапазонів величини змиву ґрунту (крім діапазону >50 т/га/рік) відмінність площ категорій земель не перевищує 10 %, для діапазону > 50 т/га/рік становить 20 %.

ВИСНОВКИ

1. Глобальні вільно поширювані цифрові моделі рельєфу проекту SRTM з просторовою роздільною здатністю 1" (близько 30 м) і 3" (близько 90 м), цифрові моделі рельєфу ASTER GDEM і AW3D30 з просторовою роздільною здатністю 1" в цілому добре відображають основні особливості рельєфу тестової ділянки площею близько 340 км², розташованої на півночі Одеської області на південних відрогах Подільської височини.

2. Середні абсолютні висоти тестової ділянки для цифрових моделей рельєфу SRTM30, SRTM90 і ASTER30 відрізняються від прийнятої в якості місцевої референц-ЦМР картографічної цифрової моделі рельєфу з просторовою роздільною здатністю 30 м не більше, ніж на 0,5 %. Висоти ЦМР AW3D30 відрізняються від інших приблизно на 30 м в зв'язку з використанням для визначення висот еліпсоїда WGS84, а не геоїда EGM96, як у інших.

3. Мінімальні і максимальні висоти всіх розглянутих глобальних ЦМР відрізняються від референц-ЦМР. Для моделей SRTM90, SRTM30 і AW3D30 з урахуванням поправки на референц-еліпсоїд ця відмінність може бути пов'язана з тим, що вони, строго кажучи, є не цифрові моделі рельєфу, а цифрові моделі місцевості. Для ASTER30 істотне значення також мають точкові «викиди» в два-три десятка метрів, які є технічними помилками зйомки, не усунутими при постобробці даних.

4. Середні по площі, максимальні значення і просторовий розподіл ухилів схилів і довжин ліній струму, отримані з використанням глобальних цифрових

моделей рельєфу в тій чи іншій мірі відрізняються від відповідних характеристик референц-ЦМР. На це крім технічних особливостей зйомки впливають наявність лісонасаджень, будівель і споруд (ASTER30 і AW3D30), представлення висот цілими числами (SRTM90, SRTM30 і ASTER30) і наявність не усунених постобробкою артефактів (ASTER30).

5. Для розрахунків та картографування ерозійних втрат ґрунту в межах сільськогосподарських земель з використанням сучасних просторово-розподілених математичних моделей рекомендуються цифрові моделі рельєфу AW3D30 і SRTM90, що забезпечили в проведеному дослідженні відповідність просторового розподілу розрахованих величин змиву ґрунту розподілу, отриманому з використанням місцевої референц-ЦМР. При цьому при використанні AW3D30 необхідно контролювати наявність на сільськогосподарських землях лісових смуг, будівель і споруд, які можуть внести місцеві спотворення в карти ухилів, експозицій і ліній струму води. SRTM90 внаслідок значно нижчого просторової роздільної здатності згладжує рельєф, через що середній модуль змиву кілька знижується (на 16,2 % для тестової ділянки), але просторовий розподіл ерозійних втрат ґрунту добре відповідає розподілу, отриманому з використанням референц-ЦМР.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бумблис В. И. Рельеф территорий как пространственный функциональный и ресурсный базис недвижимости и подвижности [Текст] / В. И. Бумблис // Геоинформационный портал ГИС-Ассоциации. – Режим доступа: <http://www.gisa.ru/41696.html>.
2. Дубинин М. Общее описание ASTER GDEM [Текст] / М. Дубинин // Вебсайт GIS-Lab, 2009. – Режим доступа: <https://gis-lab.info/qa/aster-gdem.html>.
3. Дубинин М. Описание и получение данных SRTM / М. Дубинин // Вебсайт GIS-Lab, 2014. – Режим доступа: <https://gis-lab.info/qa/srtm.html>.
4. Жаров В. Е. Сферическая астрономия [Текст] / В. Е. Жаров. – Фрязино, 2006. – 480 с.
5. Карпухина Н. В. Методические аспекты гляциоморфологического картографирования в краевой зоне юго-восточного сектора последнего скандинавского ледникового покрова [Текст] / Н. В. Карпухина, О. С. Сизов // Геоморфология. – 2020. – № 2. – С. 21-38. – Режим доступа: DOI: 10.31857/S0435428120020054.
6. Козуб Ю. И. Повышение точности цифровой модели рельефа для целей ландшафтного картографирования на территорию Республики Дагестан [Текст] / Ю. И. Козуб // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. – 2018. – Т. 12. – № 3. – С. 96-102. – Режим доступа: DOI: 10.31161/1995-0675-2018-12-3-96-102.
7. Ларионов Г. А. Эрозия и дефляция почв [Текст] / Г. А. Ларионов. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1993. – 200 с.
8. Мальцев К. А. Цифровые модели рельефа и их использование в расчётах темпов смыва почв на пахотных землях [Текст] / К. А. Мальцев, В. Н. Голосов, А. М. Гафуров // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2018. – Т. 160, кн. 3. – С. 514–530.
9. Мешин И. Н. Построения цифровой модели рельефа по данным радарной интерферометрической съёмки [Текст] / И. Н. Мешин // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. – 2012. – №1(44). – С. 60-63.
10. Світличний О. О. Основи ерозієзнавства [Текст]: підручник для вищих навч. закладів / О. О. Світличний, С. Г. Чорний. – Суми: ВТД «Університетська книга», 2007. – 266 с.

11. Abrams M. ASTER Global Digital Elevation Model (GDEM) and ASTER Global Water Body Dataset (ASTWBD) [Текст] / М. Abrams, R. Crippen, H. Fujisada // *Remote Sens.* – 2020. – 12(7). – Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/rs12071156>.
12. An assessment of the SRTM topographic products, Technical Report JPL D-31639 [Текст] / E. Rodriguez, C. S. Morris, J. E. Belz [та ін.] // Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California. – 2005. – 143 p. – Режим доступу: https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/SRTM_D31639.pdf.
13. Apeh O. I. Accuracy Assessment of Alos W3d30, Aster Gdem and Srtm30 Dem: A Case Study of Nigeria, West Africa [Текст] / О. І. Апех, V. N. Uzodinma, E. S. Ebinne, E. C. Moka, E. U. Onah // *Journal of Geographic Information System.* – 2019. – №11. – P. 111-123. – Режим доступу: DOI: 10.4236/jgis.2019.11200.
14. ASTER GDEM Readme File – ASTER GDEM Version 1 [Текст] / Режим доступу: http://www.gisat.cz/images/upload/6f8e0_aster-gdem-readme-ev1-dot-0.pdf.
15. ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 – Summary of Validation Results [Текст] / T. Tachikawa, M. Kaku, A. Iwasaki [та ін.] // ASTER GDEM Validation Team. – 2011. – 27 p. – Режим доступу: https://pdfs.semanticscholar.org/6306/3a4b83357be18f2b453cfe34509c8b77da07.pdf?_ga=2.36226022.738829358.1594921941-993585188.1594921941.
16. Abrams M. ASTER GDEM V3 (ASTER Global DEM). User Guide [Текст] / М. Abrams, R. Crippen, 2019. – 10 p. – Режим доступу: https://lpdaac.usgs.gov/documents/434/ASTGTM_User_Guide_V3.pdf.
17. ALOS Global Digital Surface Model (DSM) “ALOS World 3D-30m” (AW3D30) Dataset. Product Format Description. Version 1.1 [Текст] / Earth Observation Research Center (EORC), Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), 2017. – 11 p. – Режим доступу: <http://docplayer.net/54804225-Alos-global-digital-surface-model-dsm-alos-world-3d-30m-aw3d30-dataset-product-format-description-version-1-1.html>.
18. ASTER Global DEM Validation: Summary Report [Текст] / METI & NASA, ASTER GDEM Validation Team, 2009. – 28 p. – Режим доступу: https://pdfs.semanticscholar.org/5606/ea-d88307ae1700c3db6744c6be5aedc4935c.pdf?_ga=2.258449996.738829358.1594921941-993585188.1594921941.
19. Earth Explorer (2015) [Текст] / USGS, Earth Resources Observation and Science Center, Sioux Fall, SD. – Режим доступу: <http://earthexplorer.usgs.gov>.
20. Evaluation and Validation of Recent Freely-Available ASTER-GDEM V.2, SRTM V.4.1 and the DEM Derived from Topographical Map over SW Grombalia (Test Area) in North East of Tunisia [Текст] / S. Ouerghi, R. F. A. ELsheikh, H. Achou [та ін.] // *Journal of Geographic Information System.* – 2015. – 7. – P. 266-279. Режим доступу: <http://dx.doi.org/10.4236/jgis.2015.73021>.
21. Florinsky I. V. Comparative accuracy of the AW3D30 DSM, ASTER GDEM, and SRTM1 DEM: A case study on the Zaoksky testing ground, Central European Russia [Текст] / I. V. Florinsky, T. N. Skrypitsyna, O. S. Luschikova // *Remote Sensing Letters.* – 2018. – Vol. 9. – Issue 7. – P. 706-714. Режим доступу: <https://doi.org/10.1080/2150704X.2018.1468098>.
22. Frey H. On the suitability of the SRTM DEM and ASTER GDEM for the compilation of topographic parameters in glacier inventories [Текст] / H. Frey, F. Paul // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation.* – 2012. – Vol. 18. – P.480-490. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2011.09.020>.
23. High-Resolution Topography Data and Tool [Дані, текст] / OpenTopography Website, 2020. – Режим доступу: <https://portal.opentopography.org/datasets>.
24. Hole-filled SRTM for the globe: version 4 [Текст] / A. Jarvis, H.I. Reuter, A. Nelson [та ін.] / CGIAR Consortium for Spatial Information Website. – 2008. – Режим доступу: <http://srtm.csi.cgiar.org>.
25. Mondal A. Uncertainty analysis of soil erosion modeling using different resolution of open source DEMs [Текст] / A. Mondal, D. Khare, S. Kundu // *Geocarto International.* 2016. – Режим доступу: <http://dx.doi.org/10.1080/10106049.2016.1140822>.
26. New Version of the ASTER GDEM [Текст] / Nasa EARTHDATA Website, 2019. – Режим доступу: <https://earthdata.nasa.gov/learn/articles/new-aster-gdem>.

27. Precise Global DEM Generation by ALOS PRISM, ISPRS Ann. Photogramm [Текст] / T. Tadono, H. Ishida, F. Oda [та ін.] // *Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* – 2014. – II-4. – P. 71–76. – Режим доступу: <https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-4-71-2014>, 2014.
28. Reuter H. I. An evaluation of void filling interpolation methods for SRTM data [Текст] / H. I. Reuter, A. Nelson, A. Jarvis // *International Journal of Geographic Information Science.* – 2007. – 21:9. – P. 983-1008. – Режим доступу: <http://srtm.csi.cgiar.org/downl.ad/Reuteretal2007.pdf>.
29. Rodríguez E. A Global Assessment of the SRTM [Текст] / E. Rodríguez, C. S. Morris, J. E. Belz // *Performance Photogrammetric Engineering & Remote Sensing.* – 2006. – Vol. –72. –No. 3. – P. 249–260. – Режим доступу: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.404.4045&rep=rep1&type=pdf>.
30. Santillan J. R. Vertical Accuracy Assessment of 30-m Resolution ALOS, ASTER, and SRTM Global DEMs over Northeastern Mindanao, Philippines [Текст] / J. R. Santillan, M. Makinano-Santillan // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.* – 2016. – XLI-B4. – P.149-156. – Режим доступу: <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B4-149-2016>.
31. Sefercik U.G. Country-scale discontinuity analysis of AW3D30 and SRTM Global DEMS: case study in Turkey [Текст] / U. G. Sefercik, U. Gokmen // *Arabian Journal of Geosciences.* – 2019. – 12. – 7: 226. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4370-8>.
32. SRTM 90m Digital Elevation Database v4.1 [Дані, текст] / CGIAR CSI Consortium for Spatial Information Website. – Режим доступу: <https://cgiarcsi.community/data/srtm-90m-digital-elevation-database-v4-1/>.
33. Svetlitchnyi A. A. Spatially distributed GIS-realized mathematical model of rainstorm erosion losses of soil [Текст] / A. A. Svetlitchnyi, A. V. Piatkova // *Journal of Geology, Geography and Geomorphology.* – 2019. – 28(3). – P. 562-571. – Режим доступу: <https://doi.org/10.15421/11195>.
34. Szabó G. Slope angle and aspect as influencing factors on the accuracy of the SRTM and the ASTER GDEM databases [Текст] / G. Szabó, S. K. Singh, S. Szabó // *Phys. Chem. Earth, Parts A/B/C.* – 2015. – Vols. 83–84. – P. 137–145. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2015.06.003>.
35. Takaku J. Generation of High Resolution Global DSM from ALOS PRISM. [Текст] / J. Takaku, T. Tadono, K. Tsutsui // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ISPRS.* – 2014. – Vol. XL-4. – P.243-248. – Режим доступу: <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-4-243-2014> [Accessed 21 September 2020].
36. The Shuttle Radar Topography Mission [Текст] / T. G. Farr, P. A. Rosen, E. Caro [та ін.] // *Review of Geophysics.* – 2007. – 45. – RG2004. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>.
37. The Shuttle Radar Topography Mission—A New Class of Digital Elevation Models Acquired by Spaceborne Radar [Текст] / B. Rabus, M. Eineder [та ін.] // *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS.* – 2003. – 57. – P 241-262. – Режим доступу: [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-2716\(02\)00124-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-2716(02)00124-7).
38. Uncertainty of soil erosion modeling using open source high resolution and aggregated DEMs [Текст] / A. Mondal, D. Khare, S. Kundu [та ін.] // *Geosci. Front.* – 2017. – Vol. 8. – No. 3. – P. 425–436. – Режим доступу: <http://dx.doi.org/10.1016/j.gsf.2016.03.004>.
39. Validation of 'AW3D' global DSM generated from ALOS PRISM [Текст] / J. Takaku, T. Tadono, K. Tsutsui [та ін.] // *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume III-4.* – 2016. – P. 25-31. – Режим доступу: DOI: 10.5194/isprsannals-III-4-25-2016.
40. Vertical Accuracy Evaluation of Freely Available Latest High-Resolution (30 m) Global Digital Elevation Models over Cameroon (Central Africa) with GPS/Leveling Ground Control Points [Текст] / L. Yар, L. H. Kandé, R. Nouayou [та ін.] // *International Journal of Digital Earth.* – 2019. – Vol. – 12. – Issue 5. – P. 500-524. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1080/17538947.2018.1458163>.
41. World Elevation Data (30-meter mesh version) is now available at JAXA's site free of charge! [Текст] / Japan Aerospace Exploration Agency JAXA Website, May 18, 2015. – Режим доступу: <https://global.jaxa.jp/projects/sat/alos/index.html>.

REFERENCES

1. Bumbly V. I. (2007), Relief territoriy kak prostranstvennyy funktsionalnyy i resursnyy bazis nedvizhimosti i dvizhimosti [*Territory relief as a spatial functional and resource basis of real estate and movable*]. Geoinformatsionnyy portal GIS-Assotsiatsii. Available at: <http://www.gisa.ru/41696.html> [Accessed 21 September 2020].
2. Dubinin M. (2009), Obshchee opisanie ASTER GDEM [*General description of ASTER GDEM*]. Website GIS-Lab. Available at: <https://gis-lab.info/qa/aster-gdem.html> [Accessed 21 September 2020].
3. Dubinin M. (2014) Opisanie i poluchenie dannykh SRTM [*Description and acquisition of SRTM data*]. Website GIS-Lab. Available at: <https://gis-lab.info/qa/srtm.html> [Accessed 21 September 2020].
4. Zharov V. Ye. (2006), *Sfericheskaya astronomiya [Spherical astronomy]*. Fryazino, 480 p.
5. Karpukhina N. V., Sizov O. S. (2020), Metodicheskie aspekty glyatsiomorfologicheskogo kartografirovaniya v kraevoy zone yugo-vostochnogo sektora poslednego skandinavskogo lednikovogo pokrova [Methodological aspects of glaciomorphological mapping in the marginal zone of the southeastern sector of the last Scandinavian ice sheet], *Geomorphology*, No 2, pp. 21-38. Available at: DOI: 10.31857/S0435428120020054 [Accessed 21 September 2020].
6. Kozub Yu. I. (2018), Povyshenie tochnosti tsifrovoy modeli relefa dlya tseley landshaftnogo kartografirovaniya na territoriyu Respubliki Dagestan [Improving the accuracy of the digital elevation model for the purposes of landscape mapping on the territory of the Republic of Dagestan]. *Bulletin of the Dagestan State Pedagogical University. Natural and exact sciences*, vol. 12, No. 3, pp. 96-102. Available at: DOI: 10.31161/1995-0675-2018-12-3-96-102 [Accessed 21 September 2020].
7. Larionov G. A. (1993). *Eroziya i deflyatsiya pochv [Soil erosion and deflation]*. Moscow, Publishing house Mosk. un-ta, 200 p.
8. Maltsev K. A., Golosov V. N., Gafurov A. M. (2018), Tsifrovye modeli relefa i ikh ispolzovanie v raschetakh tempov smyva pochv na pakhotnykh zemlyakh [Digital elevation models and their use in calculating the rate of soil washout on arable land]. *Scient. Not, Kazan. un-t. Ser: Natural Science*, vol.160, book. 3, pp. 514–530.
9. Meshin I. N. (2012). Postroyeniya tsifrovoy modeli relefa po dannym radarnoy interferometricheskoy semki [Building a digital elevation model based on radar interferometric survey data]. *Automated technologies of survey and design*, No.1(44), pp. 60-63.
10. Svitly`chny`j O. O., Chorny`j S. G. (2007), *Osnovy` eroziyevnavstva [Bases of soil erosion science]*. Sumy: VTD "University Book", 266 p.
11. Abrams, M., Crippen, R., Fujisada, H. (2020), ASTER Global Digital Elevation Model (GDEM) and ASTER Global Water Body Dataset (ASTWBD) // *Remote Sens.*, 12(7). Available at: <https://doi.org/10.3390/rs12071156>. [Accessed 28 September 2020].
12. Rodriguez, E., Morris, C. S., Belz, J. E., Chapin, E. C., Martin, J. M., Daffer, W., Hensley, S. (2005), An assessment of the SRTM topographic products, Technical Report JPL D-31639 // Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, 143 p. Available at: https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/SRTM_D31639.pdf [Accessed 21 September 2020].
13. Apeh O. I., Uzodinma V. N., Ebinne E. S., Moka, E. C. Onah E. U. (2019), Accuracy Assessment of Alos W3d30, Aster Gdem and Srtm30 Dem: A Case Study of Nigeria, West Africa // *Journal of Geographic Information System*, vol. 11, pp. 111-123. Available at: DOI: 10.4236/jgis.2019.11200 [Accessed 21 September 2020].
14. ASTER GDEM Readme File – ASTER GDEM Version 1. Available at: http://www.gisat.cz/images/upload/6f6e0_aster-gdem-readme-ev1-dot-0.pdf [Accessed 21 September 2020].
15. Tachikawa, T., Kaku, M., Iwasaki, A., Gesch, D., Oimoen, M., Zhang, Z., Danielson, J., Krieger, T., Curtis, B., Haase, J., Abrams, M., Crippen, R., Carabaja, C. (2011), ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 – Summary of Validation Results. *ASTER GDEM Validation Team*, 27 p. Available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/6306/3a4b83357be18f2b453cfe34509c8b>

- 77da07.pdf?_ga=2.36226022.738829358.1594921941-993585188.1594921941 [Accessed 21 September 2020]
16. Abrams, M., Crippen, R. (2019), ASTER GDEM V3 (ASTER Global DEM). *User Guide*, 10 p. Available at: https://lpdaac.usgs.gov/documents/434/ASTGTM_User_Guide_V3.pdf [Accessed 21 September 2020].
 17. ALOS Global Digital Surface Model (DSM) “ALOS World 3D-30m” (AW3D30) Dataset. Product Format Description. Version 1.1 (2017). *Earth Observation Research Center (EORC), Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)*, 8 p. Available at: <http://docplayer.net/54804225-Alos-global-digital-surface-model-dsm-alos-world-3d-30m-aw3d30-dataset-product-format-description-version-1-1.html> [Accessed 21 September 2020]. [Accessed 21 September 2020].
 18. ASTER Global DEM Validation: Summary Report (2009). METI & NASA ASTER GDEM Validation Team, 28 p. Available at: https://pdfs.semanticscholar.org/5606/ead88307ae1700c3db6744c6be5aedc4935c.pdf?_ga=2.258449996.738829358.1594921941-993585188.1594921941 [Accessed 21 September 2020].
 19. Earth Explorer (2015), USGS, Earth Resources Observation and Science Center, Sioux Fall, SD. Available at: <http://earthexplorer.usgs.gov> [Accessed 21 September 2020].
 20. Ouerghi, S., ELsheikh, R. F. A., Achour, H., Bouazi, S. (2015), Evaluation and Validation of Recent Freely-Available ASTER-GDEM V.2, SRTM V.4.1 and the DEM Derived from Topographical Map over SW Grombalia (Test Area) in North East of Tunisia // *Journal of Geographic Information System*, 7, pp. 266-279. Available at: <http://dx.doi.org/10.4236/jgis.2015.73021> [Accessed 28 September 2020].
 21. Florinsky, I. V., Skrypitsyna, T. N., Luschikova, O. S. (2018), Comparative accuracy of the AW3D30 DSM, ASTER GDEM, and SRTM1 DEM: A case study on the Zaoksky testing ground, Central European Russia // *Remote Sensing Letters*, vol. 9, is. 7, pp. 706-714. Available at: <https://doi.org/10.1080/2150704X.2018.1468098> [Accessed 21 September 2020].
 22. Frey, H., Paul, F. (2012), On the suitability of the SRTM DEM and ASTER GDEM for the compilation of topographic parameters in glacier inventories // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 18, pp.480-490. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2011.09.020> [Accessed 21 September 2020].
 23. High-Resolution Topography Data and Tool (2010), *OpenTopography Website*, 2020. – Available at: <https://portal.opentopography.org/datasets> [Accessed 21 September 2020].
 24. Jarvis, A., Reuter, H. I., Nelson A., Guevara E. (2008), Hole-filled SRTM for the globe: version 4 / CGIAR Consortium for Spatial Information Website. [Available at: <http://srtm.csi.cgiar.org> [Accessed 21 September 2020].
 25. Mondal, A., Khare, D., Kundu, S. (2016). Uncertainty analysis of soil erosion modeling using different resolution of open source DEMs // *Geocarto International*. Available at: <http://dx.doi.org/10.1080/10106049.2016.1140822> [Accessed 21 September 2020].
 26. New Version of the ASTER GDEM (2019), *Nasa EARTHDATA Website*. Available at: <https://earthdata.nasa.gov/learn/articles/new-aster-gdem> [Accessed 21 September 2020].
 27. Tadono, T., Ishida, H., Oda, F., Naito, S., Minakawa, K., Iwamoto, H. (2014), Precise Global DEM Generation by ALOS PRISM, ISPRS Ann. Photogramm // *Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, II-4, 71–76. Available at: <https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-4-71-2014>, 2014 [Accessed 21 September 2020].
 28. Reuter, H. I., Nelson, A., Jarvis, A. (2007), An evaluation of void filling interpolation methods for SRTM data // *International Journal of Geographic Information Science*, 21:9, pp. 983-1008. Available at: <http://srtm.csi.cgiar.org/downl.ad/Reuteretal2007.pdf> [Accessed 21 September 2020].
 29. Rodríguez, E., Morris, C. S., Belz, J. E. (2006), A Global Assessment of the SRTM Performance // *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 72, No. 3, pp. 249–260. Available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?DOI=10.1.1.404.4045&rep=rep1&type=pdf> [Accessed 21 September 2020].
 30. Santillan, J. R., Makinano-Santillan, M. (2016), Vertical Accuracy Assessment of 30-m Resolu-

- tion ALOS, ASTER, and SRTM Global DEMs over Northeastern Mindanao, Philippines // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B4, 149-156. Available at: <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B4-149-2016> [Accessed 21 September 2020].
31. Sefercik, U. G., Gokmen, U. (2019), Country-scale discontinuity analysis of AW3D30 and SRTM Global DEMS: case study in Turkey // *Arabian Journal of Geosciences*, 12, 7: 226. Available at: <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4370-8> [Accessed 21 September 2020].
 32. SRTM 90m Digital Elevation Database v4.1 (2020). CGIAR CSI Consortium for Spatial Information Website. Available at: <https://cgiiarcsi.community/data/srtm-90m-digital-elevation-database-v4-1/> [Accessed 21 September 2020].
 33. Svetlitchnyi, A. A., Piatkova, A. V. (2019), Spatially distributed GIS-realized mathematical model of rainstorm erosion losses of soil // *Journal of Geology, Geography and Geomorphology*, 28(3), pp. 562-571. Available at: DOI: 10.15421/111953 [Accessed 21 September 2020].
 34. Szabó, G., Singh, S. K., Szabó, S. (2015), 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. Available at: doi: 10.1016/j.pce.2015.06.003 [Accessed 21 September 2020].
 35. Takaku, J., Tadono, T., Tsutsui, K. (2014), Generation of High Resolution Global DSM from ALOS PRISM // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ISPRS*, vol.XL-4, pp.243-248. Available at: <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-4-243-2014> [Accessed 21 September 2020].
 36. 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. (2007), The Shuttle Radar Topography Mission // *Review of Geophysics*, 45, RG2004. Available at: <https://doi.org/10.1029/2005RG000183> [Accessed 21 September 2020].
 37. Rabus, B., Eineder, M., Roth, A., Bamler, R. (2003), The Shuttle Radar Topography Mission—A New Class of Digital Elevation Models Acquired by Spaceborne Radar. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 57, 241-262. Available at: [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-2716\(02\)00124-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-2716(02)00124-7) [Accessed 21 September 2020].
 38. Mondal A., Khare, D., Kundu, S., Mukherjee, S., Mukhopadhyay, A., Mondal, S. (2017), Uncertainty of soil erosion modeling using open source high resolution and aggregated DEMs. *Geosci. Front.*, vol. 8, no. 3, pp. 425–436. Available at: DOI: 10.1016/j.gsf.2016.03.004 [Accessed 21 September 2020].
 39. Takaku, J., Tadono, T., Tsutsui, K., Ichikawa, M. (2016), Validation of ‘AW3D’ global DSM generated from ALOS PRISM // *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume III-4, pp. 25-31. – Available at: DOI: 10.5194/isprscanals-III-4-25-2016 [Accessed 21 September 2020].
 40. Yap, L., Kandé, L. H., Nouayou, R., Kamguia, J., Ngouh, N. A. and Makuate, M. B. (2019), Vertical Accuracy Evaluation of Freely Available Latest High-Resolution (30 m) Global Digital Elevation Models over Cameroon (Central Africa) with GPS/Leveling Ground Control Points. *International Journal of Digital Earth*, 1-25. Available at: <https://doi.org/10.1080/17538947.2018.1458163> [Accessed 21 September 2020].
 41. World Elevation Data (30-meter mesh version) is now available at JAXA's site free of charge! (2015), Japan Aerospace Exploration Agency JAXA Website. Available at: <https://global.jaxa.jp/projects/sat/alos/index.html> [Accessed 21 September 2020].

Надійшла 25.10. 2020 р.

А. А. Светличный, доктор геогр. наук, профессор
Одесский национальный университет имени И. И. Мечникова,
кафедра физической географии, природопользования
и геоинформационных технологий,
Шампанский пер, 2, Одесса, 65058, Украина
svetlitchnyi.aa.od@gmail.com

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СВОБОДНО РАСПРОСТРАНЯЕМЫХ ГЛОБАЛЬНЫХ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА ВЫСОКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТОВ ВОДНОЙ ЭРОЗИИ ПОЧВЫ

Резюме

Выполнена оценка точности отображения рельефа свободно распространяемыми глобальными цифровыми моделями рельефа высокой пространственной разрешающей способности SRTM, ASTER GDEM и AW3D30 и возможности их использования для пространственно-распределенных расчетов водной эрозии почв. Оценка точности цифровых моделей рельефа выполнена для тестового участка площадью около 340 км², расположенного на севере Одесской области на южных отрогах Подольской возвышенности. В качестве эталона использована цифровая модель рельефа, построенная на основе оцифровки крупномасштабной топографической карты и последующей пространственной интерполяции результатов методом обычного точечного Кригинга.

Ключевые слова: SRTM90, SRTM30, ASTER GDEM, AW3D30, водная эрозия почвы, расчеты, оценка точности.

A. A. Svetlitchnyi

Odessa I. I. Mechnikov National University,
Department of Physical Geography, Nature Management and Geoinformation
Technology
Champagne Lane, 2, Odessa, 65058, Ukraine
svetlitchnyi.aa.od@gmail.com

ON THE USE OF FREELY DISTRIBUTED GLOBAL DIGITAL ELEVATION MODELS OF THE HIGH SPATIAL RESOLUTION FOR CALCULATIONS OF WATER EROSION OF SOIL

Abstract

Problem Statement and Purpose. In the last two decades, when digital elevation models (DEMs) of global coverage and high spatial resolution have appeared in free access, the problem of assessing not only the planned or vertical accuracy of these DEMs but also the assessment of their applicability for mathematical modeling of

hydrological or geomorphological processes has become relevant. The aim of this article is to evaluate the possibility of using freely distributed global digital elevation models of high spatial resolution for calculations of soil erosion losses, including their spatial distribution within a slope or a small catchment area.

Data & Methods. The article evaluated the global DEMs SRTM with spatial resolution of 3 angular seconds and 1 angular second, ASTER GDEM (ASTER30) and AW3D30 with spatial resolution of 1 angular second. Estimation of the DEMs was performed for a test site with an area of about 340 km², located in the north of Odessa region on the southern spurs of the Podolsk Upland. A digital elevation model based on the digitization of a large-scale topographic map and subsequent spatial interpolation of the results by the method of ordinary point Kriging was used as a reference. Calculations of soil erosion losses were performed using a spatially distributed GIS-implemented physical-statistical model of erosion-accumulation, developed at the Department of Physical Geography and Nature Management of ONU named after I. I. Mechnikov.

Results. All evaluated digital elevation models in general well reflect the basic features of a relief of a test site. The average absolute heights of the estimated digital elevation models differ from the average height of the local reference DEM by no more than 0.5 %. However, the minimum and maximum heights, average surface slopes, length of current lines, slope exposure and, especially, their spatial distributions obtained using evaluated global DEMs, to some extent differ from those obtained using a cartographic digital elevation model. In addition to the technical features of the survey, this is influenced by the presence within the test site of trees, buildings, structures (ASTER30 and AW3D30), as well as the representation of heights in integers (SRTM90, SRTM30 and ASTER30). For ASTER30, it is also important the existence of post-processing errors ("artifacts") that have not been eliminated. The inadequacy of a quantitative assessment of the main factors of the erosion process, which are the slopes and exposure of slopes, as well as the lengths of water flow lines, inevitably affect the accuracy of calculating both the average values of soil erosional losses and, especially, their spatial distribution. This inadequacy manifested itself to the greatest extent in the digital elevation model ASTER GDEM. Based on the study for calculations and mapping of soil erosion losses using spatially distributed mathematical models, we recommend digital elevation models AW3D30 and SRTM90, which provided good compliance of the results of calculations of both average values of soil erosion losses and spatial distribution of them to the corresponding characteristics obtained using cartographical digital elevation model.

Keywords: SRTM90, SRTM30, ASTER GDEM, AW3D30, water soil erosion, calculations, accuracy assessment.