



## ОЦЕНКА ЭРОЗИОННОЙ ОПАСНОСТИ ПОЧВ И ЕЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ

Г. С. ЛАЗОВИК<sup>1)</sup>, А. А. ТОПАЗ<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Белгеодезия, пр. Машерова, 17, 220029, г. Минск, Беларусь

<sup>2)</sup>Белорусский государственный университет,  
пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Представлен способ создания комплексной картосхемы эрозионной опасности почв территории с применением интегральной модели RUSLE, данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и геоинформационных технологий. Выполнен анализ проводившихся по этой тематике исследований, который показал более активное использование интегральных показателей водно-эрозионных процессов в зарубежных научных работах. Обоснована актуальность обновления методики изучения эрозионных процессов. Приведены теоретические основы применения интегральных моделей эрозии почвенного покрова, аргументировано использование модели RUSLE и предложен оптимальный способ ее применения. Разработана методика исследования, состоящая из трех основных этапов: первичной обработки данных ДЗЗ, расчета факторов развития эрозии и создания комплексной картосхемы эрозионной опасности почв территории. Путем обработки материалов аэрофотосъемки получены облако точек, цифровая модель рельефа и ортофотоплан исследуемой территории. Приведены результаты геоинформационного анализа данных ДЗЗ, который включал расчет фактора уязвимости почв эрозии, а также топографического фактора. На основе интегрального показателя водно-эрозионной опасности составлена комплексная картосхема эрозионной опасности почв территории. Выявлены основные закономерности географического распределения значений интегрального показателя водно-эрозионной опасности почв территории и дана оценка разработанной методике. Установлено, что картосхема отражает общую закономерность протекания процессов водной эрозии: они активнее происходят в местах распространения более расчлененного рельефа. Показано влияние почвенного фактора на рисунок картосхемы: рисунок на территориях, занятых дерново-подзолистыми суглинистыми почвами, качественно отличается от рисунка на землях, где распространены дерново-подзолистые супесчаные почвы. Проанализировано отображение на картосхеме различных частей развитых линейных форм рельефа, сформированного временными водотоками. Показано, что предложенная методика может быть использована для оценки водно-эрозионной опасности почв территории. Сделан вывод о необходимости учета большего количества факторов и уточнения оценки уже существующих.

**Ключевые слова:** данные дистанционного зондирования Земли; геоинформационный анализ; водная эрозия; расчетная модель RUSLE; картосхема эрозионной опасности.

### Образец цитирования:

Лазовик ГС, Топаз АА. Оценка эрозионной опасности почв и ее картографирование с использованием ГИС-технологий. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология.* 2021;2:18–31.  
<https://doi.org/10.33581/2521-6740-2021-2-18-31>

### For citation:

Lazovik HS, Topaz AA. Assessment of soil erosion hazard and its mapping using GIS technologies. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology.* 2021;2:18–31. Russian.  
<https://doi.org/10.33581/2521-6740-2021-2-18-31>

### Авторы:

**Глеб Сергеевич Лазовик** – геодезист отдела формирования и ведения базы геодезических данных.

**Антонина Анатольевна Топаз** – кандидат географических наук, доцент; доцент кафедры геодезии и космоаэрокартографии факультета географии и геоинформатики.

### Authors:

**Hleb S. Lazovik**, geodesist at the department of formation and maintenance of geodetic data.

[lazovikg@gmail.com](mailto:lazovikg@gmail.com)

**Antonina A. Topaz**, PhD (geography), docent; associate professor at the department of geodesy and aerospace cartography, faculty of geography and geoinformatics.

[topaz\\_antonina@mail.ru](mailto:topaz_antonina@mail.ru)





## ASSESSMENT OF SOIL EROSION HAZARD AND ITS MAPPING USING GIS TECHNOLOGIES

*H. S. LAZOVIK<sup>a</sup>, A. A. TOPAZ<sup>b</sup>*

*<sup>a</sup>Belgeodesy, 17 Mašeraŭ Avenue, Minsk 220029, Belarus*

*<sup>b</sup>Belarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus*

*Corresponding author: A. A. Topaz (topaz\_antonina@mail.ru)*

The article presents a method for creating a territory erosion hazard integrated map using RUSLE integral model, Earth remote sensing data and GIS technologies. The studies carried out on this topic are presented, the analysis of which has shown a more active use of integral indicators of water-erosion processes in foreign scientific works. Urgency of updating methodology for studying erosion processes has been substantiated. Theoretical foundations of the application of integral models of soil erosion are given, the application of the RUSLE model is substantiated, and the optimal way of using this model is proposed. The research methodology has been developed, consisting of primary processing of remote sensing data, calculation of the factors of erosion development and creation of a territory erosion hazard integrated map. Based on the processing of aerial photography materials, a point cloud, a digital elevation model and an orthomosaic map of the study area were created. The results of the geoinformation analysis of the remote sensing data, which included calculation of the soil erodibility factor and the topographic factor, are presented. Based on the integral indicator of water-erosion hazard, a complex map of the erosion hazard of the territory has been created. Main patterns of geographical distribution of the values of the integral indicator of the water-erosion hazard of the territory are revealed, devised methodology is assessed. It was found that the schematic map reflects the general pattern of water erosion processes: they are more active in places where more dissected relief is spread. Influence of the soil factor on the pattern of the schematic map is shown: the pattern in the territories occupied by sod-podzolic loamy soils qualitatively differs from the pattern on the lands where sod-podzolic sandy loam soils are widespread. Patterns on the schematic map of different parts of the developed linear forms of relief, formed by temporary streams, are described. It is shown that the proposed method can be used to assess the water-erosion hazard of the territory. The need to take into account a larger number of factors and to refine the assessment of existing ones is concluded.

**Keywords:** Earth remote sensing data; geoinformation analysis; water erosion; RUSLE equation; erosion hazard map.

### Введение

В настоящее время увеличение масштабов сельскохозяйственного воздействия на почвенный покров требует совершенствования управления земельными ресурсами, в частности локальных и региональных мониторинговых наблюдений за состоянием почвенного покрова (в пределах отдельных полей и водосборов). Эта необходимость определяет поиск эффективных инструментов анализа и интерпретации большого объема пространственных данных о структуре почвенного покрова, факторах почвообразования и характере землепользования. Все это находит отражение в развитии геоинформационных систем, ориентированных на работу с пространственной информацией, хранимой в базе данных, а также модернизации инструментов моделирования различных уровней сложности, обеспечивающих создание комплексных физически обоснованных моделей, прогнозирующих результаты воздействия природных и антропогенных процессов на состояние ландшафта в каждой точке изучаемого пространства.

Моделирование процесса водной эрозии почвенного покрова является сложной и до конца не решенной проблемой. Одной из важнейших задач эрозионных исследований выступает также оценка эрозионной опасности почв.

Длительное время рассматриваемой проблемой занимались сотрудники лаборатории защиты почв от эрозии Института почвоведения и агрохимии НАН Беларуси (в 2006 г. преобразована в лабораторию агрофизических свойств и защиты почв от эрозии). Большой вклад в развитие исследований по эрозиоведению и почвозащитному земледелию внесли В. В. Жилко, А. И. Паярскайте, А. Ф. Черныш, А. А. Лепешев, Ю. П. Качков, С. М. Зайко, А. Н. Червань, А. М. Устинова, В. Б. Цырибко и др. [1–5].

В целом традиционная для Беларуси методика изучения процессов водной эрозии базируется на использовании аналоговых методов. Относительно недавнее появление, освоение и использование геоинформационных систем открыли возможности как для обновления традиционных методов изучения процессов водной эрозии, так и для их принципиальной замены.

Анализ литературных источников показал, что на сегодняшний день в белорусской науке исследованиям, посвященным использованию геоинформационных технологий в изучении процессов водной эрозии, уделено достаточно ограниченное внимание: как правило, они проводились в рамках более широких



экологических и геоморфологических исследований [6–8]. Следует отметить, что для этих исследований характерно рассмотрение водно-эрозионных процессов лишь через один показатель – соотношение видов угодий [6], величину плоскостного смыва [7], величину густоты форм линейной эрозии [7] либо устойчивость почв к водной эрозии [8]. В ряду публикаций данной тематики выделяется работа [9], посвященная использованию ГИС-технологий для оценки активности эрозии и денудации рельефа в пределах учебной географической станции БГУ «Западная Березина».

В зарубежной русскоязычной научной литературе новым методам изучения водно-эрозионных процессов уделено более пристальное внимание. Так, в исследовании А. Н. Мунтяна [10] выполнено моделирование водной эрозии с помощью уравнения *RUSLE (revised universal soil loss equation)*, а в качестве ключевых параметров использованы климатические условия, эродруемость почв, фактор рельефа и густота растительного покрова. В статье И. В. Казанцева и С. А. Ибрагимовой [11] приведены методы расчета коэффициента эрозионной опасности, коэффициента экологической стабилизации и зависимости урожайности от степени смытости почв на примере Самарской области. При вычислении этих параметров ключевыми исходными данными являлись сведения о крутизне склонов и тон изображения на космическом снимке на смытых почвах и в среднем на выделенном контуре. В работе Ж. А. Буряк [12] по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) выявлены эрозионно трансформированные ареалы пашни, для которых вычислено среднее значение рельефной функции, определенное как критичное. В результате пространственного анализа для территории исследуемого полигона построена карта эрозионно опасных земель, сочетающая в себе распределение критичных значений рельефной функции и экспозиций склонов. Следует отметить, что для данных исследований характерны два принципиальных отличия от представленных ранее работ белорусских ученых. Первое отличие заключается в активном использовании интегральных показателей (в частности, с применением уравнения *RUSLE*). Второе, не менее важное отличие состоит в принципиальном отказе от разделения водной эрозии на плоскостную и линейную в контексте исследования водно-эрозионной опасности.

В зарубежных англоязычных исследованиях уравнение *RUSLE* также нашло широкое применение (см., например, [13; 14]).

Таким образом, актуальность выполненных авторами исследований была обусловлена необходимостью обновления методики изучения эрозионных процессов (конкретно – процессов водной эрозии), а их главная цель заключалась в разработке и апробации методики создания комплексной картосхемы эрозионной опасности почвы территории с использованием данных ДЗЗ и ГИС-технологий.

В качестве объекта представленного исследования выбрана территория Новогрудской возвышенности Западно-Белорусской физико-географической провинции. Исходными данными выступили аэрофотоснимки, полученные в результате аэрофотосъемки с применением полноформатного цифрового сенсора *ADS100 (Leica Geosystems, Швейцария)*.

Задачи исследования включали обработку исходных данных ДЗЗ в целях построения облака точек, цифровой модели рельефа (ЦМР) и создания ортофотоплана, выполнение расчетов и составление на их основе комплексной картосхемы эрозионной опасности почв для исследуемой территории, а также оценку полученных результатов.

### Материалы и методика исследования

Эрозионно опасными считаются такие почвы, где сочетания природных условий (климат, рельеф, почвообразующие и подстилающие породы, осадки) создают возможность проявления эрозии почв при их сельскохозяйственном использовании. Эрозионная опасность оценивается величиной потенциального смыва. В настоящее время существуют ряд моделей эрозии почвенного покрова – *AGNPS (agricultural non-point-source pollution model)* [15], *WEPP (water erosion prediction project)* [16], *USLE (universal soil loss equation)* [17], *RUSLE* [18] и *MUSLE (modified universal soil loss equation)* [19], реализация которых частично представлена в различных программных продуктах. Эти модели базируются на разбиении водораздела на отдельные ячейки регулярной сети и назначении каждой ячейке набора атрибутов, таких как уклон, длина склона, эрозионная интенсивность дождя, коэффициент эродруемости почвы и др.

Большинство программных средств, полностью реализующих подобные модели, представляют собой исследовательские версии, методы и алгоритмы которых требуют дополнительного анализа и оценки эффективности. Поскольку эффективность практического использования моделей во многом определяется наличием исходных данных, при разработке современных моделей эрозии почвенного покрова ставится задача создания такой модели, для которой требуется минимум необходимой информации.



Эмпирическая модель RUSLE, предложенная У. Уишмейером и Д. Смитом и доработанная К. Ренардом и Д. Фостером, является простым математическим выражением, базирующимся на пяти основных факторах, определяющих интенсивность протекания водно-эрозионных процессов [19].

Возможность применения универсального уравнения потерь почвы от эрозии (RUSLE) при прогнозе проявления водно-эрозионных процессов в условиях холмистого рельефа Минской возвышенности была оценена в работе Е. Н. Горбачевой [19] как перспективная, а создание эффективных инструментов построения ЦМР по стереоданным аэрофото- и космосъемки, в частности, для целей почвенно-эрозионного моделирования названо целесообразным.

На основе анализа научных работ, посвященных вопросам изучения водной эрозии с использованием ГИС-технологий и данных ДЗЗ, было принято решение о целесообразности применения модели RUSLE. Использовалось уравнение RUSLE, имеющее вид

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P,$$

где  $A$  – интегральный показатель водно-эрозионной опасности;  $R$  – фактор эродирующей способности дождей;  $K$  – фактор уязвимости почв эрозии;  $L$  – фактор длины склона;  $S$  – фактор крутизны склона;  $C$  – фактор растительности и севооборота;  $P$  – фактор эффективности противоэрозионных мероприятий.

В связи с малой площадью изучаемой территории и недостаточной для исследований в локальном масштабе густотой государственной сети гидрометеорологических наблюдений Республики Беларусь фактор эродирующей способности дождей был принят равным единице на всей территории исследования. Фактор растительности и севооборота и фактор эффективности противоэрозионных мероприятий также были приняты равными единице на исследуемой территории ввиду высокой динамичности этих параметров.

Закономерным следствием взятия в расчет меньшего количества факторов явилась качественная характеристика эрозионной опасности категориями «высокая» и «низкая», а также переходными между ними тремя категориями. Другим следствием стало рассмотрение лишь потенциальной водно-эрозионной опасности без учета фактора растительности и севооборота и фактора эффективности противоэрозионных мероприятий.

На основе почвенной карты и ЦМР рассчитаны фактор уязвимости почв эрозии (почвенный фактор) и топографический (рельефный) фактор (последний принят как равноценная замена факторам длины и крутизны склона). С их использованием вычислен интегральный показатель водно-эрозионной опасности, значения которого распределены по шкале из пяти качественных оценок от низких до высоких.

Полученные результаты подверглись экспертной оценке. В итоге были выявлены основные закономерности географического распределения значений интегрального показателя водно-эрозионной опасности. Кроме того, проведено сравнение итоговой картосхемы с ортофотопланом исследуемой территории, позволившее установить причины расхождений расчетной оценки водно-эрозионной опасности с представлением, полученным в ходе визуального анализа ортофотоплана. В общем виде разработанную методику можно отобразить блок-схемой, включающей ряд последовательных процедур (рис. 1).

Для исследования была выбрана территория, расположенная в Новогрудском районе Гродненской области к северо-востоку от Новогрудка. Общая площадь территории составляет 60 км<sup>2</sup>. Она вытянута на 10 км с севера на юг и на 6 км с запада на восток.

Аэрофотоснимки для изучения процессов водной эрозии предоставлены Белорусским предприятием сельскохозяйственных аэрофотогеодезических изысканий (БелПСХАГИ). Для их получения 21 мая 2016 г. была проведена аэрофотосъемка с использованием полноформатного цифрового сенсора ADS100. При высоте полета 1250 м расстояние между точками на местности, соответствующими центрам двух соседних пикселей, составляет 10 см, что позволяет поддерживать сверхвысокое пространственное разрешение. Цифровой сенсор принимает световое излучение в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах.

Данные, полученные в результате аэрофотосъемки, представлены в виде блока изображений. Выделена область интереса с преобладанием холмистого рельефа и, соответственно, активным развитием процессов водной эрозии. С помощью программы *Leica XPro* сгенерировано облако точек (DSM), которое использовалось в качестве исходных данных для построения ЦМР. Поскольку изначальные данные являлись моделью поверхности, а не рельефа, точки прошли процедуру фильтрации, таким образом, были сохранены только те точки, которые соответствуют рельефу. Далее следовал процесс построения ЦМР в виде базы данных, доступной для демонстрации и геоинформационного анализа в ArcGIS. Обе операции были выполнены в программе *Trimble Inpho UASMaster*.

Создание ортофотоплана проводилось аналогично построению облака точек также в программе *Leica XPro*. Пространственное разрешение полученного ортофотоплана составило менее 1 м, что от-





носит его к материалам ДЗЗ со сверхвысоким пространственным разрешением и делает пригодным для использования в целях изучения эрозионных процессов (рис. 2).

К обработанным данным ДЗЗ был применен геоинформационный анализ, который включал расчет фактора уязвимости почв эрозии и топографического фактора.

Для *оценки уязвимости почв эрозии* использовалась таблица коэффициентов водно-эрозионной устойчивости почв (табл. 1), предложенная Н. И. Афанасьевым [8], где в качестве количественного показателя уязвимости почв эрозии выступают значения, определенные методом «песок (пыль + глина)».

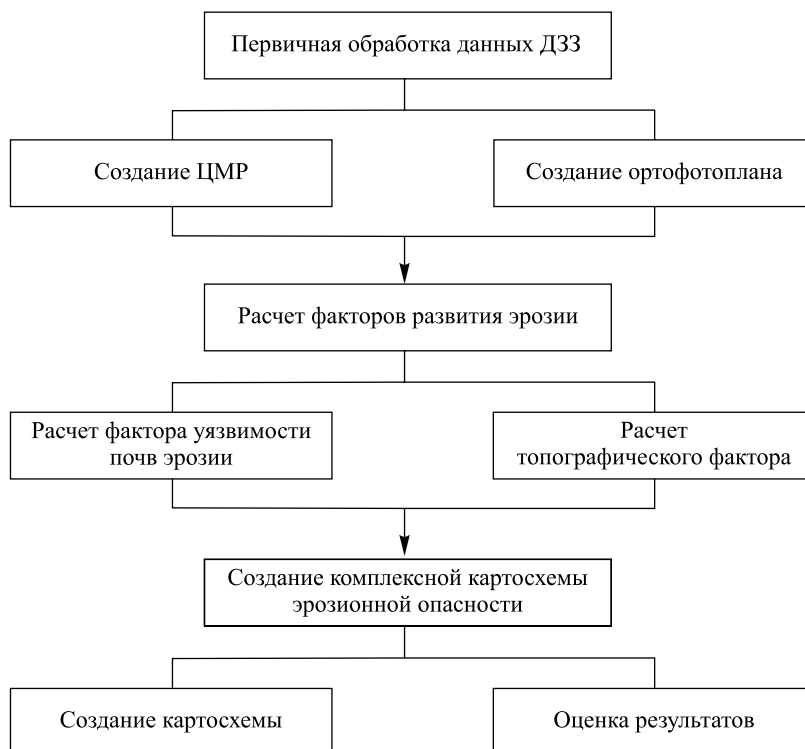


Рис. 1. Блок-схема основных этапов исследования

Fig. 1. Block diagram of the main stages of the study



Рис. 2. Фрагмент ортофотоплана

Fig. 2. Orthomosaic fragment

Таблица 1

## Коэффициенты водно-эрозионной устойчивости почв

Table 1

## Coefficients of soil water erosion resilience

№ п/п	Почва	Метод определения	
		песок (пыль + глина)	SiO <sub>2</sub> R <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
1	Дерново-карбонатная выщелоченная легкосуглинистая	0,36	10,40
2	Бурая лесная	2,27	14,40
3	Дерново-подзолистая, развивающаяся на тяжелом суглинке	0,21	6,38
4	Дерново-палево-подзолистая, развивающаяся на мощном лёссовидном суглинке	0,54	8,90
5	Дерново-подзолистая, развивающаяся на песчанисто-пылеватом суглинке, подстилаемом моренным суглинком	0,44	10,50
6	Дерново-подзолистая вторично оподзоленная, развивающаяся на мощном лёссовом суглинке	0,13	10,00
7	Дерново-подзолистая, развивающаяся на мощном моренном суглинке	0,84	8,60
8	Дерново-подзолистая, развивающаяся на озерно-ледниковой супеси	1,06	–
9	Дерново-подзолистая, развивающаяся на водно-ледниковой супеси, подстилаемой моренным суглинком	2,50	18,50
10	Дерново-подзолистая, развивающаяся на водно-ледниковых песках	5,80	19,00

В качестве исходных данных использовалась почвенная карта масштаба 1 : 10 000, составленная в рамках последнего тура почвенных обследований Гродненской области. Из-за несоответствия легенды почвенной карты таблице коэффициентов на территории, занятой дерново-глееватыми, дерново-глеевыми, торфяно-глеевыми, торфяными, дегроторфяными, а также антропогенными почвами, подсчет фактора уязвимости этих почв эрозии проведен не был. Это же касается территорий, не относящихся к агроландшафтам: информация о почвах для них отсутствовала. Значения коэффициентов эрозионной устойчивости для дерново-карбонатных и дерново-подзолистых почв были приняты равными аналогичным показателям наиболее схожих им почв из табл. 1. При оценке схожести почв учитывались их тип, подтип, гранулометрический состав и генезис почвообразующих пород (приоритетность факторов соответствует порядку их перечисления).

В результате по коэффициенту водно-эрозионной устойчивости почвы были разбиты на шесть групп, которые соответствуют почвам № 1, 5, 6, 7, 9 и 10 в табл. 1. Часть почв остались нераспределенными (рис. 3).

Таким образом, уязвимость почв водной эрозии на большей части территории была приравнена к уязвимости дерново-подзолистой почвы, развивающейся на водно-ледниковой супеси, подстилаемой моренным суглинком, на основании гранулометрического состава и генезиса почвообразующих пород. Для дальнейшей обработки результат распределения почв был переведен в растр с использованием инструмента «полигоны в растр».

Что касается **топографического фактора**, то следует отметить, что расчет фактора крутизны склона не представляет проблем при геоинформационном анализе, тогда как вычисление фактора длины склона сопряжено с рядом трудностей. Большинство существующих подходов оперируют понятием мощности потока, заменяя расчет длины склона расчетом суммарного потока. Как правило, эти подходы объединяют факторы длины склона  $L$  и крутизны склона  $S$  в топографический фактор  $LS$ . В наших исследованиях для расчета топографического фактора была использована формула, описанная в работе американского ученого Д. К. Маккула с соавторами [20].



$$LS = \left( \frac{A \cdot D}{22,1} \right)^m \left( \frac{\sin \alpha}{0,0896} \right)^m, \quad (1)$$

$$m = \frac{\beta}{\beta + 1}, \quad (2)$$

$$\beta = \frac{\sin \alpha}{0,0896} \frac{1}{3,0(\sin \alpha)^{0,8} + 0,56}, \quad (3)$$

где  $LS$  – топографический фактор;  $A$  – растр слоя стока;  $\alpha$  – растр уклонов, град;  $D$  – длина ячейки ЦМР, м;  $m$  – функция от  $\alpha$ ;  $\beta$  – функция от  $\alpha$ .

Для расчета топографического фактора TIN-модель была преобразована в GRID-модель инструментом «TIN в растр» при размере ячейки 1 м. В дальнейшем полученная GRID-модель использовалась для проведения геоинформационного анализа инструментами группы «гидрология» модуля ArcGIS Spatial Analyst.

На основе растров слоя стока и уклонов создан растр топографического фактора. Для этого с использованием инструмента «калькулятор растра» были применены формулы (1)–(3). Полученный растр топографического фактора отражает объем потенциально смытой почвы в результате совместного действия плоскостной и линейной эрозии. Значения растра изменяются от 0 до 51 299, при этом значения выше 10–12 характерны для тальвегов оврагов, от 1–2 до 10–12 – для склонов с активным протеканием процессов плоскостной эрозии, ниже 1–2 – для слабо наклонных равнинных поверхностей (рис. 4).

Для **создания комплексной картосхемы** были использованы растры топографического фактора (рис. 5) и фактора уязвимости почв эрозии (рис. 6).

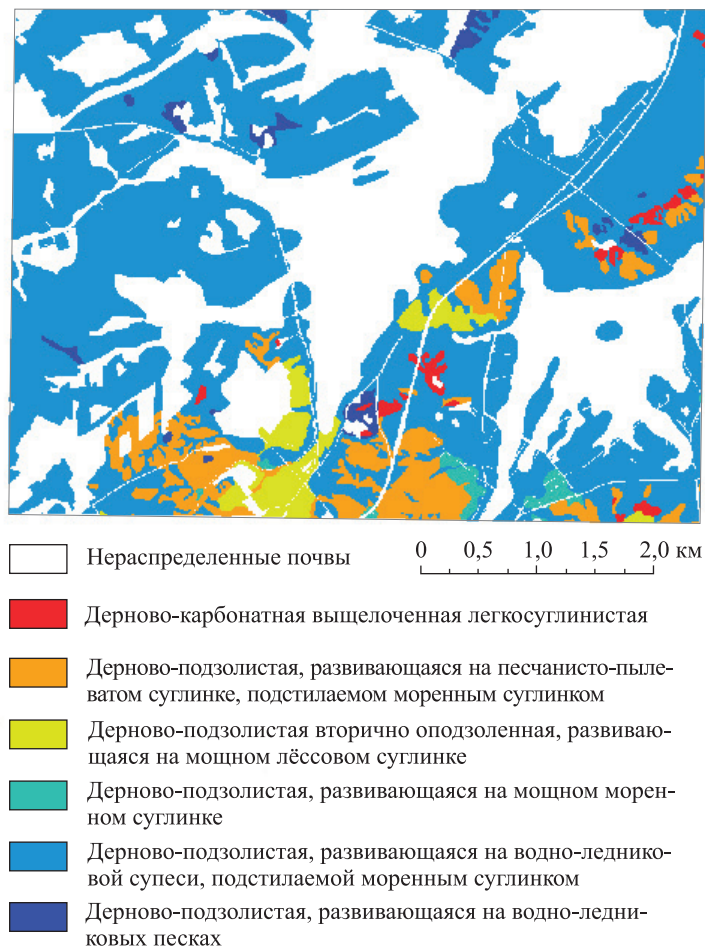


Рис. 3. Распределение почв по водно-эрозионной устойчивости (фрагмент картосхемы)

Fig. 3. Distribution of soils by water erosion resilience (fragment of the schematic map)



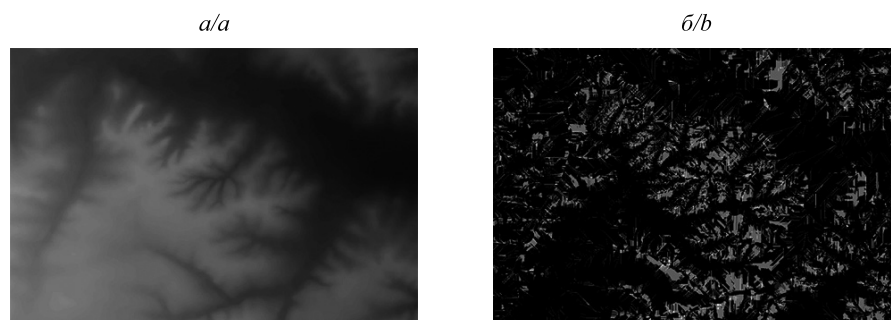


Рис. 4. Сравнение GRID-модели рельефа (а) с растром топографического фактора (б)  
Fig. 4. Comparison of the GRID model of the terrain (a) with the raster of the topographic factor (b)

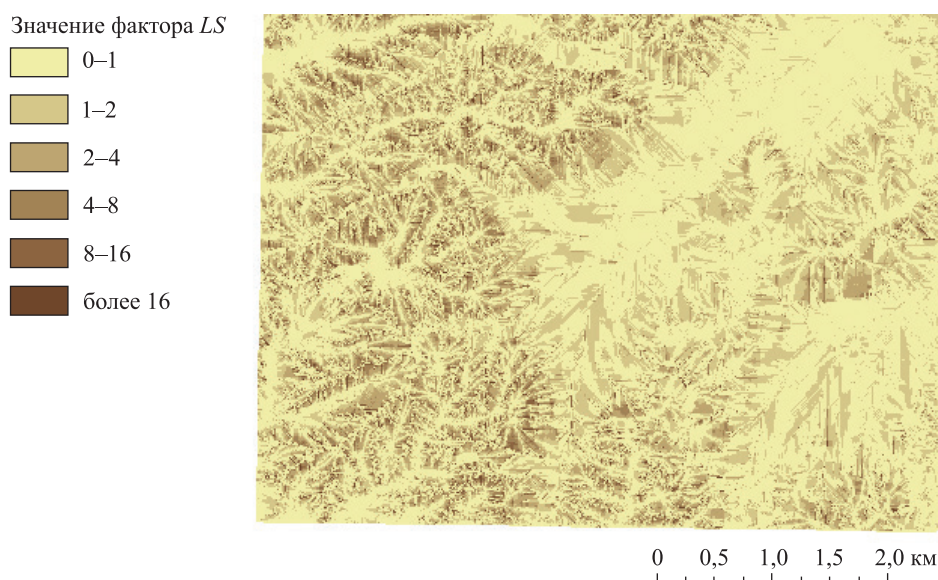


Рис. 5. Картограмма топографического фактора (фрагмент)  
Fig. 5. Schematic map of the topographic factor (fragment)

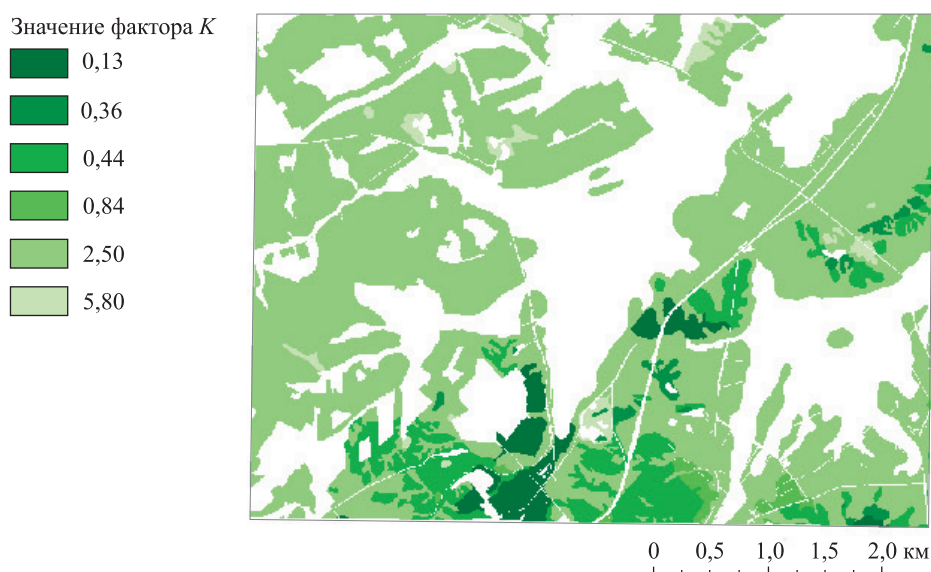


Рис. 6. Картограмма фактора уязвимости почв эрозии (фрагмент)  
Fig. 6. Schematic map of the factor of soil erodibility (fragment)





Поскольку более высокое значение топографического фактора, как правило, говорит о повышенной активности процессов водной эрозии, в то время как более высокое значение фактора уязвимости почв эрозии, напротив, свидетельствует о большей сопротивляемости почв процессам водной эрозии, для подсчета интегрального показателя водно-эрозионной опасности была использована формула

$$A = \frac{(LS)^2}{K},$$

где  $A$  – интегральный показатель водно-эрозионной опасности;  $LS$  – растр топографического фактора;  $K$  – растр фактора уязвимости почв эрозии.

Топографический фактор взят в квадрат, поскольку представляет собой совокупность двух под-факторов – длины и крутизны склона. Для проведения подсчета использован инструмент «калькулятор растра», в результате получен растр со значениями от 0 до 376 869 504 (рис. 7).

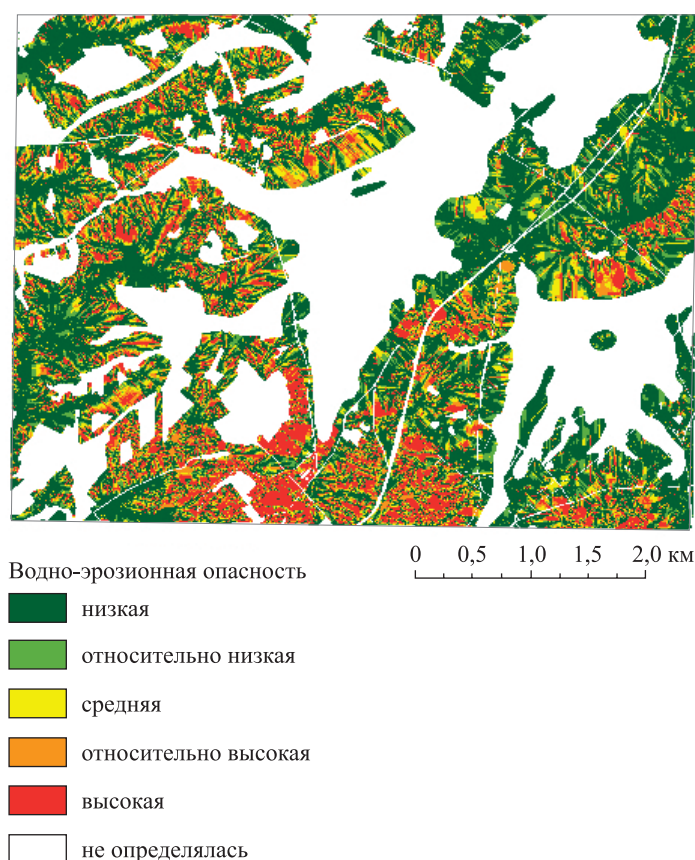


Рис. 7. Комплексная картосхема эрозионной опасности (фрагмент)

Fig. 7. Integrated schematic map of erosion hazard (fragment)

### Результаты и их обсуждение

Исходя из того, что значения топографического фактора от 1–2 до 10–12 характерны для склонов с активным протеканием процессов плоскостной эрозии, а значения фактора уязвимости почв эрозии изменяются от 0,13 до 5,80, для распределения значений по качественным оценкам была выбрана шкала, представленная в табл. 2.

Анализ полученных результатов показал, что комплексная картосхема эрозионной опасности выявляет определенные закономерности расположения районов, наиболее подверженных водной эрозии. Прежде всего картосхема отражает общую закономерность протекания процессов водной эрозии: они активнее происходят в местах распространения сильно расчлененного рельефа (пестрый рисунок картосхемы), чем на территориях с более плоской земной поверхностью (рисунок однородного зеленого цвета). Эта закономерность отчетливо заметна при визуализации картосхемы в более крупном масштабе (рис. 8).

Таблица 2

Шкала значений интегрального показателя

Table 2

Integral indicator scale of values

Водно-эрозионная опасность	Значение <i>A</i>
Низкая	0,0–0,5
Относительно низкая	0,5–1,0
Средняя	1–2
Относительно высокая	2–4
Высокая	Более 4

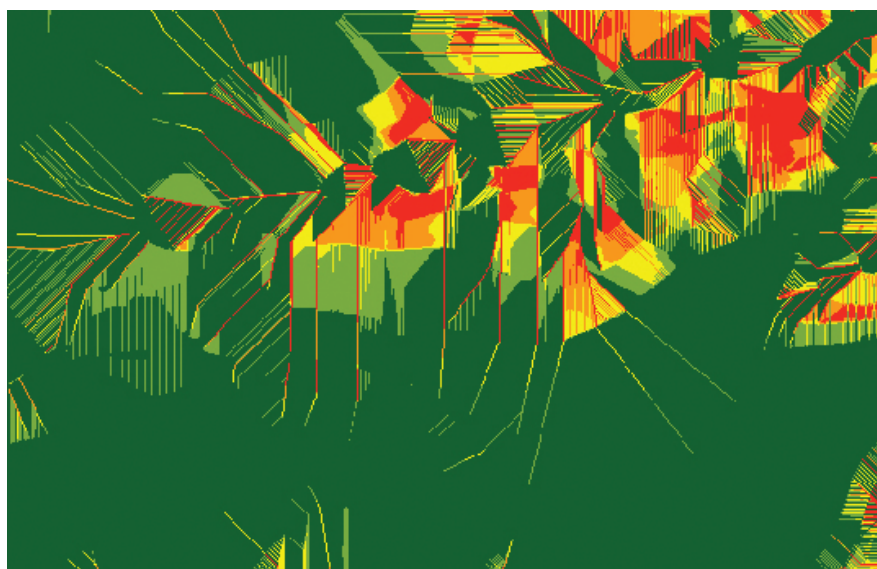


Рис. 8. Изображение сильно расчлененного (сверху) и слабо расчлененного (снизу) рельефа на итоговой картосхеме  
Fig. 8. Image of a highly dissected (top) and slightly dissected (below) terrain on the final schematic map

Территориям с сильно расчлененным рельефом, как отмечено выше, на картосхеме характерен пестрый рисунок, а земли с высокой и низкой водно-эрозионной опасностью непосредственно соседствуют друг с другом. На формирование рисунка оказывает влияние почвенный фактор: рисунок на территориях, занятых дерново-подзолистыми суглинистыми почвами, отличается от рисунка на землях, на которых распространены дерново-подзолистые супесчаные почвы. Так, в южной части исследуемой территории, где господствуют более уязвимые для водной эрозии суглинистые почвы (см. рис. 3), преобладает высокая водно-эрозионная опасность (красный цвет, значения интегрального показателя – более 4), в то время как низкая характерна для тальвегов линейных понижений в рельефе, где почва уже смыта (зеленый цвет, значения интегрального показателя – до 0,5) (рис. 9).

Так как на большей части исследуемой территории распространены более устойчивые к водной эрозии супесчаные почвы, то и рисунок там инвертирован: высокая водно-эрозионная опасность отмечена уже для линейных понижений в рельефе и прилегающих к ним склонов (красный и оранжевый цвета) (рис. 10).

Наиболее развитым линейным формам рельефа, сформированного временными водотоками, также свойственна низкая водно-эрозионная опасность в тальвегах (зеленый цвет, значения интегрального показателя – до 0,5), высокая же водно-эрозионная опасность характерна для склонов (красный цвет, значения интегрального показателя – более 4) (рис. 11).

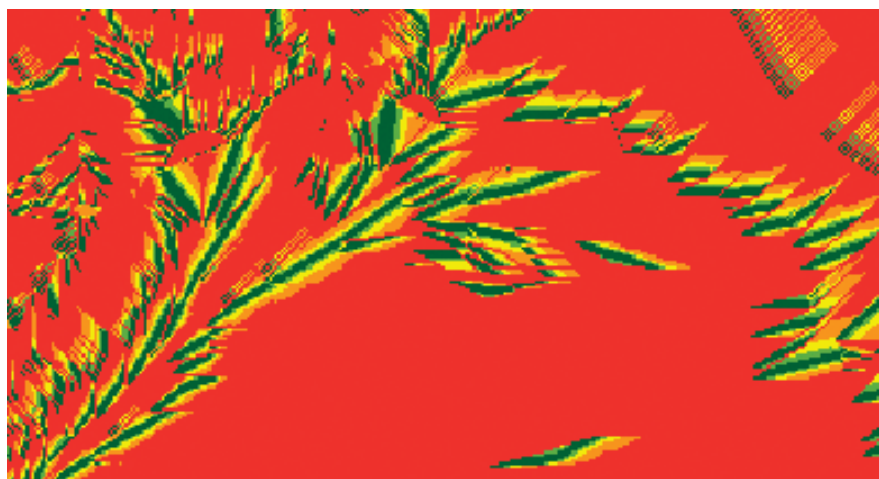


Рис. 9. Изображение участка с преобладанием суглинистых почв  
Fig. 9. Image of a site with predominance of loamy soils

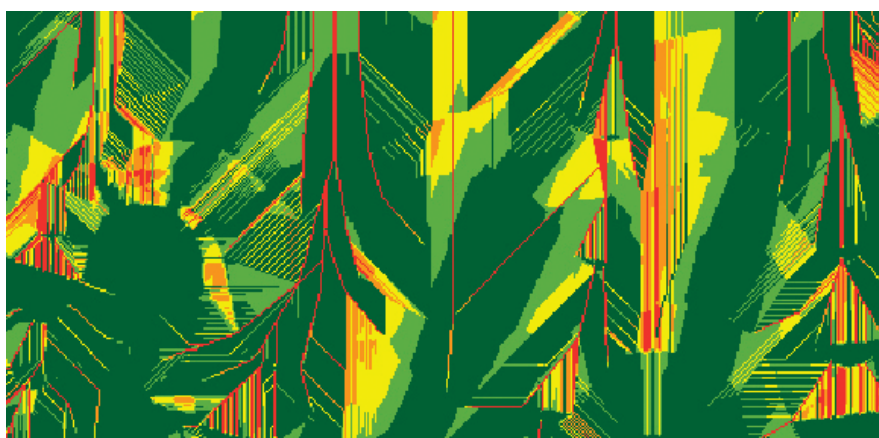


Рис. 10. Изображение участка с преобладанием супесчаных почв  
Fig. 10. Image of a site with predominance of sandy loam soils

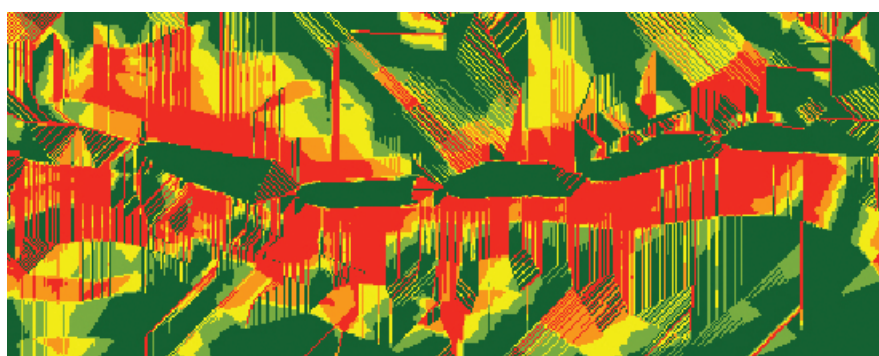


Рис. 11. Изображение развитой линейной формы рельефа,  
сформированной временными водотоками  
Fig. 11. Image of a developed linear landform created by temporary streams



Для визуальной оценки соответствия полученных результатов реальной ситуации на местности картосхема была преобразована в маску, наложенную на ортофотоплан территории исследования. При этом участки со средней, относительно высокой и высокой эрозионной опасностью были символизированы как прозрачные (так ортофотоплан виден только через эти пробелы). Участки с низкой и относительно низкой эрозионной опасностью были изображены зеленым цветом. Такой подход позволил определить, каким территориям на ортофотоплане соответствуют участки со средней, относительно высокой и высокой эрозионной опасностью (рис. 12).

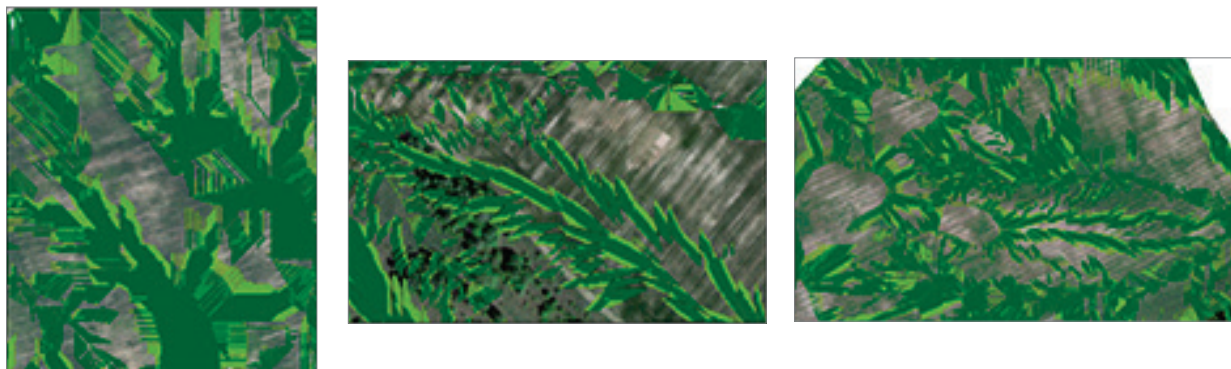


Рис. 12. Примеры территорий, верно рассчитанных как подверженные эрозионной опасности

Fig. 12. Examples of areas correctly calculated as subject to erosion hazard

Сравнительный визуальный анализ комплексной картосхемы эрозионной опасности почв исследуемой территории и изображения ортофотоплана показал, что полученные результаты расчетов не всегда полностью совпадают с реальной ситуацией, так как в ходе анализа также были выявлены участки, неверно идентифицированные как серьезно подверженные эрозионной опасности. Данный факт можно объяснить тем, что в реальности на протекание процессов водной эрозии воздействуют также факторы, не учтенные в расчетах, например распространение растительности или эффективность противоэрозионных мероприятий. Еще одной причиной расхождений полученных результатов стало несоответствие легенды почвенной карты для исследуемой территории таблице коэффициентов водно-эрозионной устойчивости почв, вызвавшее необходимость для почв, не прошедших лабораторное исследование, брать коэффициенты схожих с ними почв. Исходя из этой оценки, можно сделать вывод о том, что для дальнейшего использования предложенной методики следует учитывать большее количество факторов, а также повышать точность оценки уже существующих. В частности, более тщательное внимание должно быть уделено лабораторным исследованиям устойчивости почв к водной эрозии.

### Заключение

Таким образом, выполненные исследования по изучению процессов водной эрозии с использованием материалов ДЗЗ и ГИС-технологий показали перспективность и необходимость дальнейшей работы в данном направлении.

В качестве основных результатов исследования можно выделить следующие.

1. Разработана схема создания комплексной картосхемы эрозионной опасности.
2. Созданы облако точек, TIN-модель рельефа и ортофотоплан исследуемой территории на основе обработки материалов аэрофотосъемки.
3. Выполнен геоинформационный анализ данных ДЗЗ для изучения процессов водной эрозии: рассчитаны топографический фактор и фактор уязвимости почв эрозии, на основе которых составлена комплексная картосхема эрозионной опасности почв исследуемой территории.
4. Проведена экспертная оценка, выявившая причины расхождений расчетной оценки водно-эрозионной опасности с представлением, полученным в результате визуального анализа ортофотоплана.

Предложено для дальнейшего использования разработанной методики учитывать большее количество факторов, а также повышать точность оценки уже существующих.

### Библиографические ссылки

1. Жилко ВВ, Паярская АИ. Водная эрозия почв в БССР. В: Медведев АГ, редактор. *Эрозия почв и борьба с ней*. Минск: Урожай; 1968. с. 31–37.
2. Зайко СМ, Аношко ВС, редакторы. *Эволюция почв мелиорируемых территорий Белоруссии*. Минск: Университетское; 1990. 287 с.





3. Яцухно ВМ, Качков ЮП, Башкинцева ОФ. Ландшафтно-эрозионное районирование территории Беларуси. *Вестник Белорусского государственного университета. Серия 2. Химия. Биология. География*. 1998;3:63–68.
4. Лепешев АА, Кадацкий ВБ. Тенденция оживления эрозионной деятельности на территории Республики Беларусь. *Весті БДПУ. Серія 3. Фізика. Математика. Інфарматыка. Біялогія. Геаграфія*. 2007;1:59–62.
5. Черныш АФ, Устинова АМ, Цырибко ВБ, Червань АН, Касьяненко ИИ. Деградация почв сельскохозяйственных земель Беларуси: виды и количественная оценка. *Почвоведение и агрохимия*. 2016;2:7–18.
6. Черныш АФ, Радюк АЭ, Касьянчик СА. Оценка экологической сбалансированности структуры земельного фонда в эрозионных и заболоченных агроландшафтах центральной почвенно-экологической провинции Беларуси. *Почвоведение и агрохимия*. 2009;1:7–14.
7. Романенко ВС, Курлович ДМ. Особенности проявления опасных геоморфологических процессов на территории Беларуси. В: Пирожник ИИ, Клебанович НВ, Аношко ВС, Чертко НК, Мурашко ЛИ, Ковальчик НВ и др., редакторы. *Структура и морфогенез почвенного покрова в условиях антропогенного воздействия. Материалы Международной научно-практической конференции; 17–20 сентября 2013 г.; Минск, Беларусь*. Минск: Издательский центр БГУ; 2013. с. 138–141.
8. Афанасьев НИ, Юхновец АВ. Коэффициенты устойчивости почв Беларуси к водной эрозии. *Почвоведение и агрохимия*. 2010;2:49–54.
9. Козлов ЕА, Генин ВА, Курлович ДМ. Использование ГИС-технологий для оценки активности эрозии и денудации рельефа в пределах учебной географической станции БГУ «Западная Березина». *Земля Беларуси*. 2015;4:41–44.
10. Мунтян АН. Оценка антропогенной деградации почв под влиянием эрозионных процессов с использованием геоинформационных систем и методов дистанционного зондирования Земли (на примере левобережья Днестра). *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки*. 2016;35(11):129–138.
11. Казанцев ИВ, Ибрагимова СА. Теоретические основы оценки эрозионной опасности почв в агроландшафтах. *Самарский научный вестник*. 2013;3:48–50.
12. Буряк ЖА. Совершенствование подходов к оценке эрозионной опасности агроландшафтов с использованием ГИС-технологий. *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки*. 2014;29(23):140–146.
13. Chatterjee S, Krishna AP, Sharma AP. Geospatial assessment of soil erosion vulnerability at watershed level in some sections of the Upper Subarnarekha river basin, Jharkhand, India. *Environmental Earth Sciences*. 2014;71(1):357–374. DOI: 10.1007/s12665-013-2439-3.
14. Lu D, Li G, Valladares GS, Batistella M. Mapping soil erosion risk in Rondônia, Brazilian Amazonia: using RUSLE, remote sensing and GIS. *Land Degradation & Development*. 2004;15(5):499–512. DOI: 10.1002/ldr.634.
15. Young RA, Onstad CA, Bosch DD, Anderson WP. *AGNPS, agricultural non-point-source pollution model: a watershed analysis tool*. Washington: United States Department of Agriculture. 1987. 80 p. (Conservation research report; No. 35).
16. Foster GR, Lane LJ. *User requirements: USDA, water erosion prediction project (WEPP)*. West Lafayette: USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory; 1987. 43 p. (NSERL report; No. 1).
17. Wischmeier WH, Smith DD. *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning*. Washington: United States Department of Agriculture; 1978. 58 p. (Agriculture handbook; No. 537).
18. Renard KG, Foster GR, Weesies GA, Porter JP. RUSLE: revised universal soil loss equation. *Journal of Soil and Water Conservation*. 1991;46(1):30–33.
19. Горбачёва ЕН. Применение универсального уравнения потерь почвы от эрозии (RUSLE) при оценке интенсивности водно-эрозионных процессов на основе ГИС. *Почвоведение и агрохимия*. 2011;2:42–51.
20. McCool DK, Foster GR, Mutchler CK, Meyer LD. Revised slope length factor for the universal soil loss equation. *Transactions of the ASAE*. 1989;32(5):1571–1576. DOI: 10.13031/2013.31192.

## References

1. Zhilko VV, Payarskaite AI. [Water erosion of soil in the BSSR]. In: Medvedev AG, editor. *Eroziya pochv i bor'ba s nei* [Soil erosion and its control]. Minsk: Urozhai; 1968. p. 31–37. Russian.
2. Zaiko SM, Anoshko VS, editors. *Evolutsiya pochv melioriruemyykh territorii Belorussii* [Evolution of soils of reclaimed territories of Belarus]. Minsk: Universitetskoe; 1990. 287 p. Russian.
3. Yatsukhno VM, Kachkov YuP, Bashkintseva OF. [Landscape-erosional zoning of the territory of Belarus]. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 2. Khimiya. Biologiya. Geografiya*. 1998;3:63–68. Russian.
4. Lepeshev AA, Kadatskii VB. [The tendency of the revival of erosion activity in the territory of the Republic of Belarus]. *Vesci BDPU. Seriya 3. Fizika. Matematyka. Infarmatyka. Bijalogija. Geagrafiya*. 2007;1:59–62. Russian.
5. Chernysh AF, Ustinova AM, Tsyrybko VB, Chervan AN, Kas'yanenko II. Soil degradation of agricultural lands in Belarus: the types and quantitative assessment. *Soil Science and Agrochemistry*. 2016;2:7–18. Russian.
6. Chernysh AF, Radyuk AEh, Kas'yanchik SA. Estimation of ecological equation of structure of ground fund in erosive and swamped agrolandscapes the central soil-ecological province of Belarus. *Soil Science and Agrochemistry*. 2009;1:7–14. Russian.
7. Romanenko VS, Kurlovich DM. [Patterns characteristics of dangerous geomorphological processes on the territory of Belarus]. In: Pirozhnik II, Klebanovich NV, Anoshko VS, Chertko NK, Murashko LI, Koval'chik NV, et al., editors. *Struktura i morfogenez pochvennogo pokrova v usloviyakh antropogennogo vozdeistviya. Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii; 17–20 sentyabrya 2013 g.; Minsk, Belarus* [Structure and morphogenesis of soil cover under anthropogenic impact. Proceedings of the International scientific and practical conference; 2013 September 17–20; Minsk, Belarus]. Minsk: Publishing Center of the Belarusian State University; 2013. p. 138–141. Russian.
8. Afanas'ev NI, Yuhnovets AV. Coefficients of resistance of sod-podzolic soils of Belarus to erosion. *Soil Science and Agrochemistry*. 2010;2:49–54. Russian.
9. Kazlou YaA, Genin UA, Kurlovich DM. Using of GIS technologies for assessment of activity of erosion and denudation of land-forms within the Western Berezina educational geographical station of the Belarusian State University. *Zemlya Belarusi*. 2015;4:41–44. Russian.



10. Muntjan AN. Evaluation the anthropogenic degradation of soil under the influence of soil erosion using geoinformation technologies and remote sensing of the Earth (with reference to the left bank of river Dniester). *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki*. 2016;35(11):129–138. Russian.
11. Kazantsev IV, Ibrahimova SA. The theoretical foundations for evaluating the risk of erosion of soils of agricultural landscapes. *Samarskii nauchnyi vestnik*. 2013;3:48–50. Russian.
12. Buryak ZhA. Improvement of approaches to assessing the risk of erosion in agricultural landscapes using GIS technology. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki*. 2014;29(23):140–146. Russian.
13. Chatterjee S, Krishna AP, Sharma AP. Geospatial assessment of soil erosion vulnerability at watershed level in some sections of the Upper Subarnarekha river basin, Jharkhand, India. *Environmental Earth Sciences*. 2014;71(1):357–374. DOI: 10.1007/s12665-013-2439-3.
14. Lu D, Li G, Valladares GS, Batistella M. Mapping soil erosion risk in Rondônia, Brazilian Amazonia: using RUSLE, remote sensing and GIS. *Land Degradation & Development*. 2004;15(5):499–512. DOI: 10.1002/ldr.634.
15. Young RA, Onstad CA, Bosch DD, Anderson WP. *AGNPS, agricultural non-point-source pollution model: a watershed analysis tool*. Washington: United States Department of Agriculture; 1987. 80 p. (Conservation research report; No. 35).
16. Foster GR, Lane LJ. *User requirements: USDA, water erosion prediction project (WEPP)*. West Lafayette: USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory; 1987. 43 p. (NSERL report; No. 1).
17. Wischmeier WH, Smith DD. *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning*. Washington: United States Department of Agriculture; 1978. 58 p. (Agriculture handbook; No. 537).
18. Renard KG, Foster GR, Weesies GA, Porter JP. RUSLE: revised universal soil loss equation. *Journal of Soil and Water Conservation*. 1991;46(1):30–33.
19. Gorbacheva EN. RUSLE model implementation for estimation intensity of water erosion processes on Belarusian soil cover. *Soil Science and Agrochemistry*. 2011;2:42–51. Russian.
20. McCool DK, Foster GR, Mutchler CK, Meyer LD. Revised slope length factor for the universal soil loss equation. *Transactions of the ASAE*. 1989;32(5):1571–1576. DOI: 10.13031/2013.31192.

Получена 12.04.2021 / исправлена 02.09.2021 / принята 01.10.2021.  
Received 12.04.2021 / revised 02.09.2021 / accepted 01.10.2021.