

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2026-1-71-86>
УДК 631.459(476)+631.4

Поступила в редакцию 26.02.2026
Received 26.02.2026

ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ ОЦЕНКА УЯЗВИМОСТИ ПОЧВ К ВОДНОЙ ЭРОЗИИ НА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЗЕМЛЯХ НОВОГРУДСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ

Д. А. Кислицын¹, А. М. Небышинец¹, Н. В. Клебанович²

¹Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь;

²ОО «Белорусское географическое общество», Минск, Беларусь

Аннотация. В статье приведены результаты геоинформационной оценки уязвимости почв к водной эрозии на сельскохозяйственных землях Новогрудской возвышенности. На основе комплексного учета рельефа, почвенного покрова, климата и растительности выделены территории с различной степенью эрозионной опасности. По цифровой модели рельефа (ЦМР) FABDEM Copernicus GLO в ArcGIS 10.7 и SAGA GIS 7.8.2 рассчитаны уклон, вертикальное расчленение, LS-фактор и топографический индекс увлажнения (TWI). Почвенные условия учтены через коэффициент фильтрации и коэффициент Водогрецкого; климатические показатели – через эрозионный индекс дождевых осадков (R-фактор) и средние из максимальных запасов воды в снеге перед снеготаянием за 2015–2025 гг. Фактор растительного покрова (C) рассчитан по минимальным значениям вегетационного индекса NDVI на основе космических снимков Sentinel-2. Интеграция показателей в растровой модели позволила получить карту относительных рисков и классифицировать почвы на слабо-, средне- и сильноэродированные с применением порогов по LS-фактору, вертикальному расчленению рельефа и индексу TWI. Показано, что зоны повышенной эрозионной опасности приурочены к центральной части возвышенности и ее восточным склонам. Общая площадь почв, подверженных плоскостному смыву, составила 20 847,6 га, а максимум отмечен в Новогрудском районе (9630,0 га).

Ключевые слова: геоинформационный анализ; водная эрозия; почвенный покров; LS-фактор; климат.

Для цитирования. Кислицын Д. А., Небышинец А. М., Клебанович Н. В. Геоинформационная оценка уязвимости почв к водной эрозии на сельскохозяйственных землях Новогрудской возвышенности // Природопользование. – 2026. – № 1. – С. 71–86.

GEOINFORMATION ASSESSMENT OF SOIL VULNERABILITY TO WATER EROSION ON AGRICULTURAL LANDS OF THE NOVOGRUDOK UPLAND

D. A. Kislitsyn¹, A. M. Nebyshynets¹, N. V. Klebanovich²

¹Belarusian State University, Minsk, Belarus;

²Belarusian Geographical Society, Minsk, Belarus

Abstract. The article presents the results of a geoinformation assessment of soil vulnerability to water erosion on agricultural lands of the Novogrudok Upland. Based on a comprehensive consideration of relief, soil cover, climate and vegetation, areas with varying degrees of erosion risk were identified. The slope, vertical dissection, LS-factor and topographic wetness index (TWI) were calculated using the FABDEM Copernicus GLO digital elevation model (DEM) in ArcGIS 10.7 and SAGA GIS 7.8.2. Soil conditions were taken into account through the filtration coefficient and Vodogretsky coefficient; climatic indicators were taken into account through the rainfall erosion index (R-factor) and average of the maximum water reserves in snow before snowmelt for 2015–2025. The vegetation cover factor (C) is calculated based on the minimum values of the NDVI vegetation index based on Sentinel-2 space images. The integration of indicators in a raster model made it possible to obtain a map of relative risks and classify soils as weakly, moderately, and strongly eroded using thresholds for LS-factor, vertical dissection of relief and index TWI. It was shown that areas of increased erosion risk are confined to the central part of the uplands and its eastern slopes. The total area of soils subject to water erosion was 20,847.6 ha, with the maximum recorded in the Novogrudok district (9,630.0 ha).

Keywords: geoinformation analysis; water erosion; soil cover; LS-factor; climate.

For citation. Kislitsyn D. A., Nebyshynets A. M., Klebanovich N. V. Geoinformation assessment of soil vulnerability to water erosion on agricultural lands of the Novogrudok upland. *Nature Management*, 2026, no. 1, pp. 71–86.

Введение. Водная эрозия остаётся одной из ключевых причин деградации почв сельскохозяйственных земель: она снижает плодородие, усиливает вынос мелкозёма и питательных веществ, повышает заиливание водотоков и ведёт к экономическим потерям землепользования. Для районов с выработанным холмисто-увалистым рельефом риск эрозионных процессов особенно высок из-за сочетания повышенной крутизны склонов, особенностей стока и землепользования. Для Новогрудской возвышенности проблема особенно значима из-за сочетания расчленённого рельефа и интенсивного сельскохозяйственного использования, что формирует пространственно неоднородные зоны повышенного риска плоскостного смыва. В этих условиях геоинформационный подход позволяет оперативно и объективно оценить уязвимость почв на больших территориях за счёт интеграции данных о рельефе (морфометрические показатели), свойствах почв, климатических факторах и состоянии растительного покрова (в том числе по спутниковым данным), а результаты могут быть напрямую использованы для планирования экологически устойчивого землепользования и проведения природоохранных мероприятий.

В Беларуси для определения ареалов распространения водной эрозии в основном использовались почвенно-эрозионные обследования, тогда как геоинформационные технологии и данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) применялись реже. При этом проводились исследования по адаптации универсального уравнения потери почвы (RUSLE) к условиям страны [1], а также по высокодетальному моделированию LS-фактора по аэрофотосъёмке для небольших территорий [2] и картографированию плоскостной эрозии в QGIS с разделением по классам уклонов рельефа [3]. Также продемонстрированы возможности ГИС-технологий при анализе активности эрозии и денудации по разновременным топографическим картам [4] и при прикладном картографировании деградации почв сельскохозяйственных земель [5], включая автоматизированное дешифрирование космических снимков QuickBird и использование индекса оксида железа для создания почвенно-эрозионных карт [6].

Идентификация линейных форм эрозии по одному лишь автоматизированному дешифрированию космических снимков по спектральной яркости затруднена: светлые тона характерны не только для эродированных почв, но и для полей со всходами озимых. При этом плоскостной смыв меняет окраску пахотного слоя, что позволяет оценивать степень эродированности по данным ДЗЗ с учётом типа почв [7]. Для диагностики деградации почв также используют динамику вегетационных индексов и факторы окружающей среды (земельный покров, осадки, рельеф): показаны подходы на основе индекса EVI, рассчитанного по снимкам MODIS, в сочетании с информацией об осадках и землепользовании [8]; интеграции цифровой модели рельефа (ЦМР), снимков, почвенных и метеоданных для оценки водной эрозии на водосборах [9], а также совместного учёта водной и ветровой эрозии через уравнения RUSLE и RWEQ с использованием NDVI и данных о земельном покрове [10].

Морфометрический ГИС-анализ ЦМР (уклоны, экспозиция, кривизна, превышения, густота речной сети) даёт основу для расчёта производных показателей, включая индекс TWI и LS-фактор, и объяснения пространственной дифференциации эрозионной опасности [11]. ГИС-технологии применяются как для расчёта потенциальных потерь почвы на пашне, так и для выделения и картографирования зон повышенной эрозионной опасности на региональном уровне [12], а обзор моделей смыва и возможностей применения ГИС и данных ДЗЗ для идентификации и картографирования эродированных почв систематизирован в монографии [13].

В целом в литературе широко представлены модификации универсальных уравнений потери почв (USLE/RUSLE), а топографический фактор LS чаще всего описывают через длину и крутизну склонов; при этом учёт вертикального расчленения рельефа рассматривается как путь повышения точности при картографировании эродированных почв пахотных земель и участков овражно-балочной сети [14]. Актуальность оценки уязвимости усиливается климатическими трендами: для Беларуси отмечены риски для сельского хозяйства и необходимость адаптационных мер [15], зафиксирован рост климатической уязвимости (23–30 %) с ключевым вкладом интенсификации экстремальных осадков [16], предложены подходы к оценке уязвимости почв сельскохозяйственных земель к климатическим изменениям [17] и проведены локальные оценки рисков для секторов экономики, включая сельское хозяйство [18].

Цель – выполнить геоинформационную оценку уязвимости почв к водной эрозии на сельскохозяйственных землях Новогрудской возвышенности и выделить территории с различной степенью эрозионной опасности на основе комплексного учёта факторов рельефа, почв, климата и растительного покрова.

Основные задачи исследования:

- 1) проанализировать ключевые факторы, влияющие на проявление водной эрозии (рельеф, почвенный покров, климат, растительность), и сформировать набор оценочных показателей;
- 2) выполнить относительную оценку рисков проявления водной эрозии на сельскохозяйственных землях Новогрудской возвышенности;
- 3) определить структуру эродированных почв по степени проявления плоскостного смыва по сельсоветам.

Материалы и методы исследований. В качестве исследуемой территории выбраны три района на юго-востоке Гродненской области (Дятловский, Новогрудский и Кореличский), которые составляют основную часть Новогрудской возвышенности (общая площадь – 419 604 га). Репрезентативность данной территории для изучения степени проявления водной эрозии обусловлена дифференциацией почв вследствие особенностей рельефа, а также высоким уровнем сельскохозяйственной освоенности. Почвообразующие породы Новогрудской возвышенности достаточно разнообразны по генезису, гранулометрическому составу и представлены лёссовидными суглинками, моренными супесями и суглинками, водно-ледниковыми супесями и песками, отложениями речного аллювия, торфа (в понижениях рельефа) и овражно-балочного делювия [19].

Среди основных типов рельефа преобладают грядово-холмистые и холмистые ледниковые образования, а также пологохолмистые и холмистые моренные равнины. К более низким гипсометрическим уровням приурочены участки водно-ледниковых равнин и речных долин [20]. Особенности рельефа оказывают влияние на основные климатические показатели: годовое количество осадков на 50–100 мм выше, чем в близлежащих Лиде и Ивье, а зимние температуры на 1–1,5° ниже, что увеличивает запасы воды в снеге по сравнению с соседними физико-географическими районами [19]. На юго-востоке исследуемой территории, а также в окрестностях Любчи и Кореличей пахотные земли занимают обширные площади, что связано с высоким уровнем почвенного плодородия. К долинам рек Сервечь и Неман (на востоке Новогрудской возвышенности) приурочены крупные участки луговых земель, которые также сконцентрированы к западу от речной долины Уши в пределах понижения рельефа.

Основные методы исследования, которые применялись для выявления эродированных почв и пространственного анализа их распределения, – геоинформационный, картографический, сравнительный и статистический. Геоинформационный анализ особенностей рельефа выполнен путём обработки цифровой модели FABDEM Copernicus GLO [21] с пространственным разрешением 24 м, которая имеет высокий уровень точности. Уклон и вертикальное расчленение рельефа рассчитаны в среде ArcGIS 10.7, а фактор длины и крутизны склонов (LS) и топографический индекс увлажнённости (TWI) получены на основе анализа ЦМР в ГИС SAGA 7.8.2.

Для проведения относительной оценки рисков проявления водной эрозии на сельскохозяйственных землях учтена информация о таких ключевых факторах, как рельеф, почвенный покров, климат и растительность, а расчёт итогового результата выполнен путём применения инструмента «Калькулятор раstra» в ArcGIS 10.7 по формуле (1):

$$A = \frac{LS \cdot k_{\text{Водогрецкого}} \cdot (R + h) \cdot C}{k_{\text{фильтрации}} \cdot TWI}, \quad (1)$$

где A – относительная оценка рисков проявления водной эрозии; LS – фактор длины и крутизны склонов; $k_{\text{Водогрецкого}}$ – коэффициент Водогрецкого; R – эрозионный индекс дождей осадков; h – средние из максимальных запасов воды в снеге перед снеготаянием, мм; C – фактор растительного покрова; $k_{\text{фильтрации}}$ – коэффициент фильтрации, м/сут; TWI (Topographic Wetness Index) – топографический индекс увлажнённости.

Цифровая обработка и тематическая интерпретация космических снимков Sentinel-2 проводилась для расчёта фактора растительного покрова, который основан на минимальных значениях индекса NDVI за период вегетации, а также для определения пространственного расположения сельскохозяйственных земель в пределах Новогрудской возвышенности путём контролируемой классификации методом максимального правдоподобия в ArcGIS 10.7. Высокое пространственное разрешение снимков Sentinel-2 (10 м для четырёх спектральных каналов в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах) и дополнительное использование информации об индексе NDVI позволяют определить расположение пахотных и луговых земель [22]. В процессе автоматизированного дешифрирования космического снимка Sentinel-2 также были выделены следующие виды земель: лесные, под древесно-кустарниковой растительностью, под болотами, под водными объектами, под застройкой и общего пользования. Векторные слои границ районов и сельсоветов получены на основе открытых данных из OpenStreetMap [23].

Результаты и их обсуждение. Комплексный учёт уклона рельефа и длины склонов осуществляется на основе расчёта LS -фактора, который используется для относительной оценки эрозионного потенциала рельефа. Применение инструмента «LS-factor, field based», который представлен в ГИС SAGA, позволяет рассчитать LS -фактор на основе глобальной ЦМР FABDEM. Полученный растр фактора длины и крутизны склонов отличается достаточно высоким контрастом значений, поэтому для улучшения его визуализации и дальнейшей интерпретации выполнен экспорт растрового изображения

в ГИС ArcGIS, где проведён расчёт средневзвешенных значений по сельсоветам исследуемой территории. Следует отметить, что при расчёте относительной оценки рисков проявления водной эрозии использованы непрерывные значения LS-фактора, рассчитанные для территории Новогрудской возвышенности. Наименьшие средние значения LS-фактора (менее 0,3) характерны для Щорсовского и Еремичского сельсоветов, что обусловлено доминированием равнинных форм рельефа в пределах речной долины Немана и её окрестностей. Значения эрозионного потенциала рельефа в пределах Дятловского района увеличиваются при переходе от западной к восточной части, что обусловлено более высокой крутизной склонов в верхней части бассейна реки Молчадь.

В центральной части Новогрудской возвышенности, для которой характерны более высокие значения уклона рельефа, значения LS-фактора превышают 0,9, а для четырёх сельсоветов, расположенных к северу и востоку от Новогрудка, а также к юго-западу от Кореличей, данный показатель в среднем составляет более 1,2. Центральная часть Кореличского района имеет невысокие значения LS-фактора, что обусловлено более высоким удельным весом понижений рельефа по сравнению с верховьями речных бассейнов Невды, Ятранки и Валовки (рис. 1).

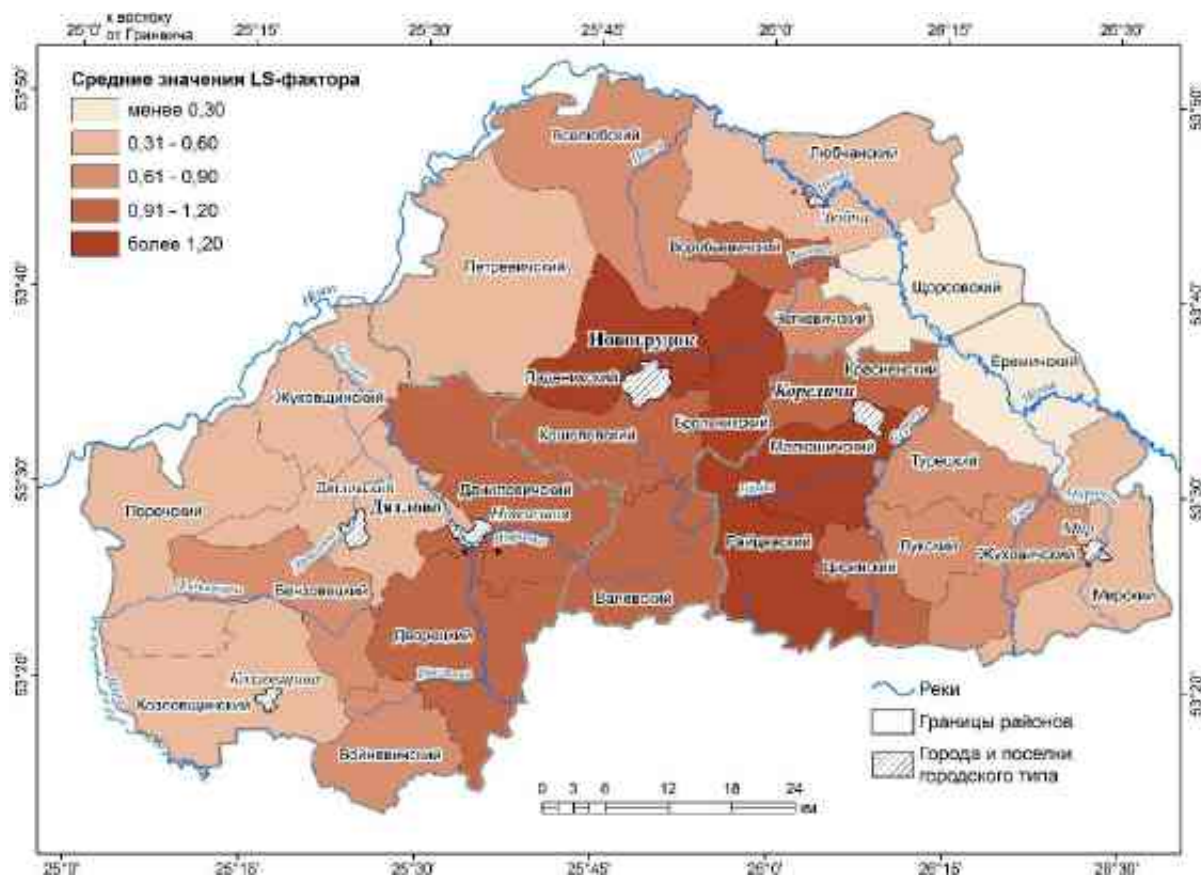


Рис. 1. Средние значения фактора длины и крутизны склонов (LS) по сельсоветам исследуемой территории

Fig. 1. Average values of the slope length and steepness factor (LS) for selsoviets in the study area

Для выполнения оценки степени подверженности почв процессам водной эрозии также применяется информация о генезисе и гранулометрическом состав почвенного покрова. Высокая степень устойчивости почв к плоскостному смыву определяется на основе более высоких значений коэффициента фильтрации почв. В пределах Новогрудской возвышенности наименьшие значения коэффициента фильтрации (0,14 м/сут) характерны для лёссовидных суглинков и глин, а наибольшие – для моренных песков (3,62 м/сут). Высокая устойчивость к процессам водной эрозии отмечена для водно-ледниковых и моренных песков, а очень низкая – для лёссовидных суглинков и глин [24]. В среде ArcGIS в векторный класс пространственных объектов, содержащий информацию о почвенном покрове сельскохозяйственных земель в крупном масштабе, внесены значения коэффициента фильтрации почв на основе атрибутивных полей, которые характеризуют генезис и гранулометрический состав (Kod 2 и Kod 3 соответственно). Коэффициент фильтрации не рассчитывался для сельскохозяйственных земель на переувлажнённых почвах, которые не подвержены водной эрозии. Информация

о почвенном покрове в масштабе 1 : 10 000 представлена в основном для территории сельскохозяйственных земель, удельный вес которых значительно различается по сельсоветам трёх административных районов, поэтому картографирование данного коэффициента выполнено без обобщения средневзвешенных значений по сельсоветам. В окрестностях Кореличей, к юго-западу и югу от Любчи, а также северо-восточнее Новогрудка значения коэффициента фильтрации почв имеют низкие значения (менее 0,25 м/сут). В западной части Дятловского района значения данного показателя превышают 0,45 м/сут, а к северо-востоку от Новоельни достигают 0,36–0,45 м/сут, что обусловлено более высоким удельным весом водно-ледниковых песков и супесей (рис. 2).

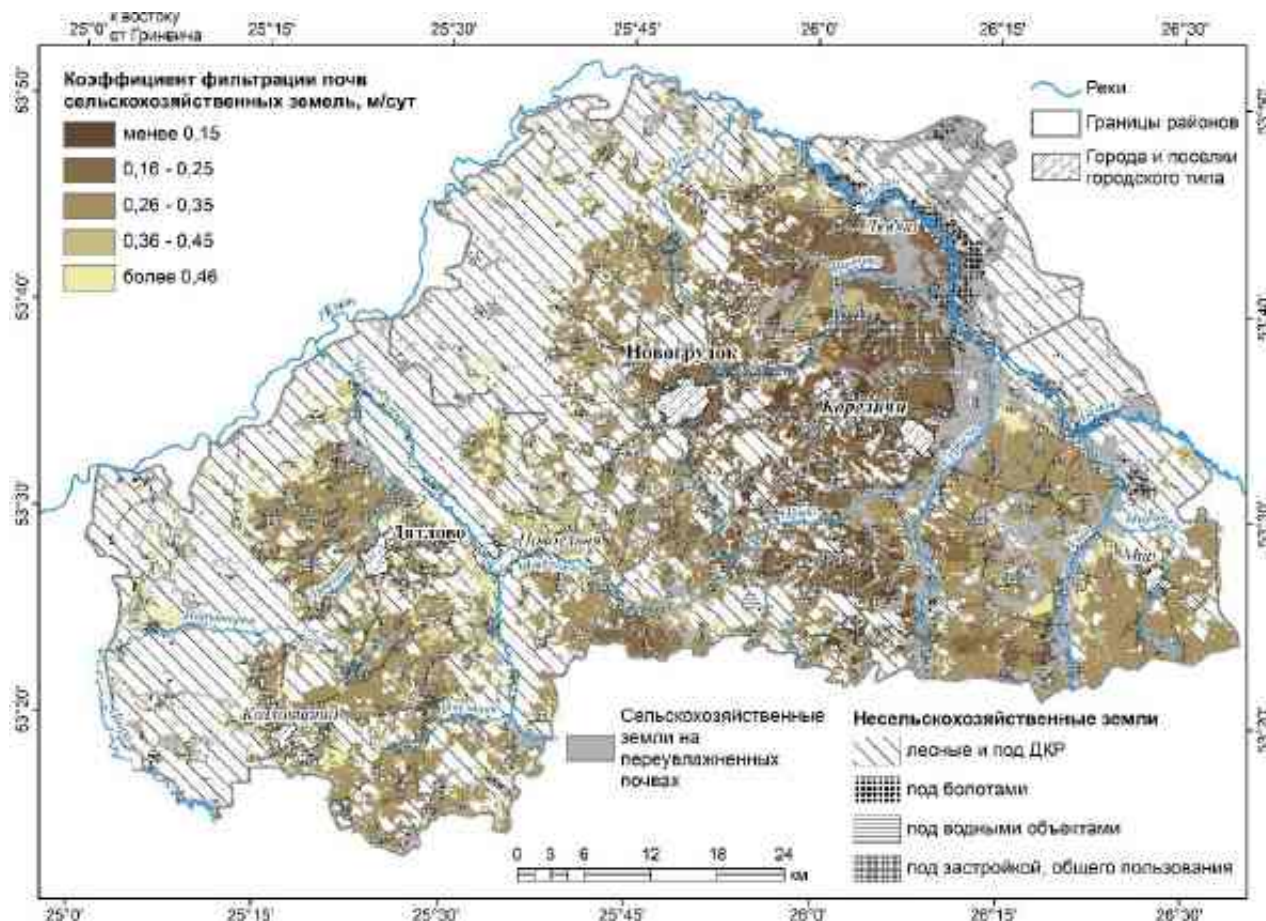


Рис. 2. Коэффициент фильтрации (м/сут) почв сельскохозяйственных земель Новогрудской возвышенности

Fig. 2. Filtration coefficient (m/day) of agricultural soils of the Novogrudok Upland

Оценка интенсивности склонового стока на зяби при одинаковых запасах воды в снеге за период снеготаяния осуществляется на основе коэффициента Водогрецкого, учитывающего данные об уклоне рельефа (в %) и гранулометрическом составе почв. При одинаковых значениях крутизны склонов более высокие значения коэффициента Водогрецкого характерны для суглинистых и глинистых почв по сравнению с супесчаными.

Для контуров почв рассчитаны средние значения уклона рельефа (в %), а также выделены две группы по гранулометрическому составу, что позволило определить коэффициент Водогрецкого с высоким уровнем детальности для сельскохозяйственных земель Новогрудской возвышенности. Следует отметить, что для песчаных и переувлажнённых почв (за исключением дерново-подзолистых глееватых почв, которые могут быть намытыми) данный коэффициент не рассчитывались, так как водная эрозия в их пределах отсутствует или проявляется на минимальном уровне. Достаточно высокие значения коэффициента Водогрецкого (более 0,30) характерны для дерново-подзолистых почв на лёссовидных суглинках (реже супесях), расположенных на склонах с высокими значениями уклона рельефа (к западу от Кореличей, северо-восточнее Новогрудка). Для территорий, где доминируют супесчаные почвы на пологих склонах (центральная часть Дятловского района, окрестности Любчи), значения коэффициента Водогрецкого составляют менее 0,10–0,15 (рис. 3).

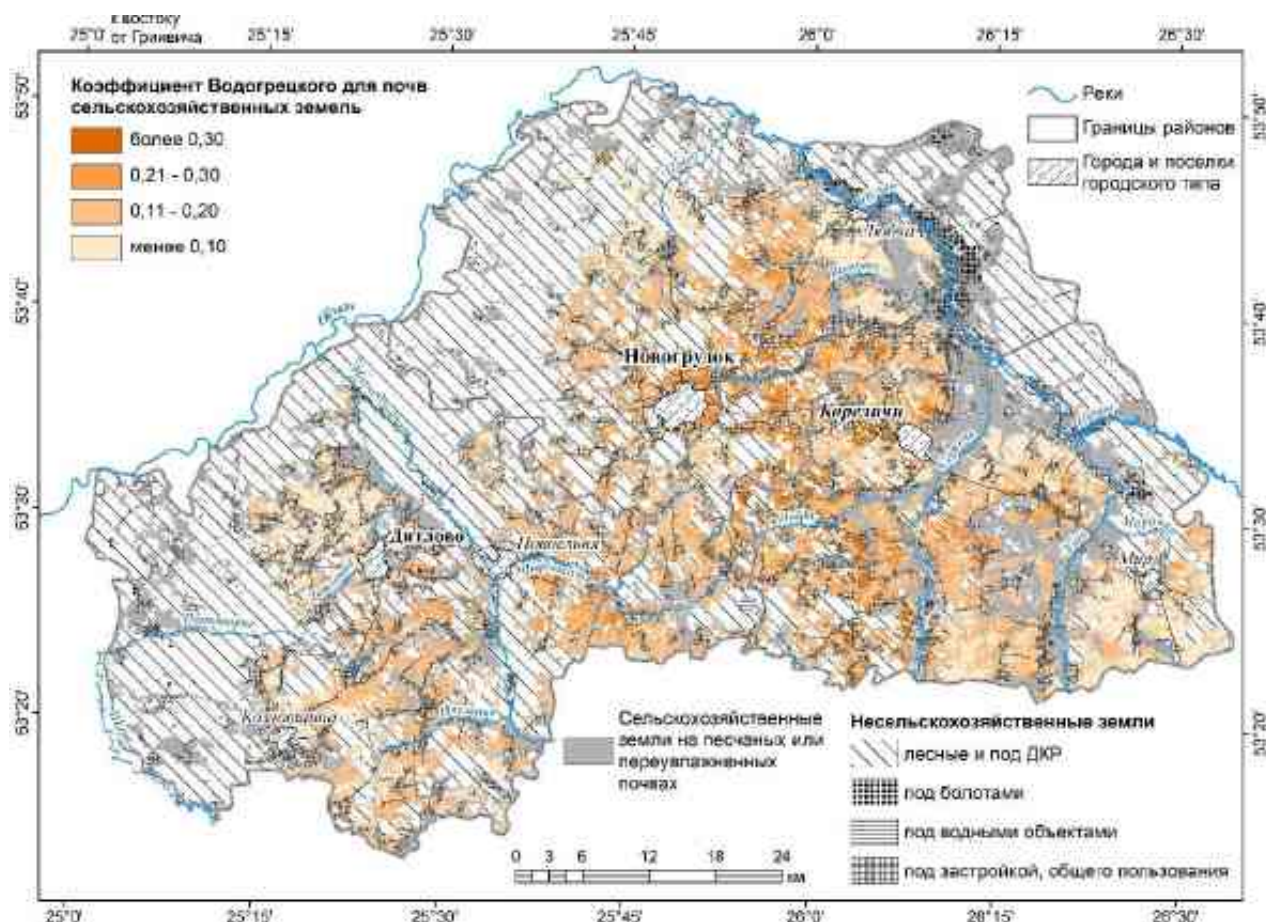


Рис. 3. Дифференциация значений коэффициента Водогрецкого для почв сельскохозяйственных земель Новогрудской возвышенности

Fig. 3. Differentiation of the values of the coefficient Vodogreetskogo for agricultural soils of the Novogrudok Upland

Максимальные запасы воды в снеге перед снеготаянием рассматривались как климатический показатель, характеризующий потенциальный вклад снеготаяния в формирование поверхностного стока. Оценка средних из максимальных значений запасов воды в снеге перед снеготаянием была выполнена на основе данных с конца февраля – начала марта за период 2015–2025 гг. В качестве источников использовались наблюдения метеостанции Новогрудок, а также ближайших к ней метеостанций. Период 2015–2025 гг. для оценки максимальных запасов воды в снеге перед снеготаянием выбран в связи с необходимостью обеспечить достаточный объём сопоставимых данных наблюдений и минимизировать влияние пропусков в отдельных годах. Использование более длительного ряда также позволяет сгладить межгодовую изменчивость снеготаяния и получить более устойчивую характеристику снегового фактора для исследуемой территории.

Анализ пространственного распределения показывает выраженную центральную область повышенных значений и постепенное снижение значений к периферии, особенно в юго-западном и восточном направлениях. Максимальные запасы воды в снеге (более 21,0 мм) наблюдаются в центральной части территории, вблизи Новогрудка и ближайших к нему участков. Эта область характеризуется наиболее интенсивным накоплением твёрдых осадков, что, вероятно, связано с повышенной абсолютной высотой и особенностями локального рельефа. К востоку (Кореличи и Любча) значения постепенно снижаются до 19,6–21,0 мм, формируя переходную зону. Далее, в районах Мира, Новоельни и Дятлово, фиксируются средние запасы (в пределах 16,6–19,5 мм). Минимальные значения (менее 15,0 – 16,5 мм) отмечаются в юго-западной части территории, вблизи Козловщины и частично на западных окраинах Дятловского района. Эта отражает сравнительно низкое водное содержание снега, вероятно, обусловленное меньшим количеством осадков и более частыми оттепелями (рис. 4).

Оценка эрозионного индекса дождевых осадков (R-фактор) выполнена на основе глобальных моделей ежемесячного распределения данного показателя, представленных в исследовании P. Panagos

с соавторами [25]. Для анализа R-фактора сделано сложение значений за период с мая по сентябрь, так как ливневые осадки в другие месяцы практически не наблюдаются. Полученные данные имели низкое пространственное разрешение (около 1 км), поэтому для более корректного перехода к размеру ячейки раstra, равному 24 м, выполнено создание произвольно расположенных точек, для которых извлекались значения R-фактора и на их основе проводилась интерполяция методом Сплайн в ArcGIS 10.7.

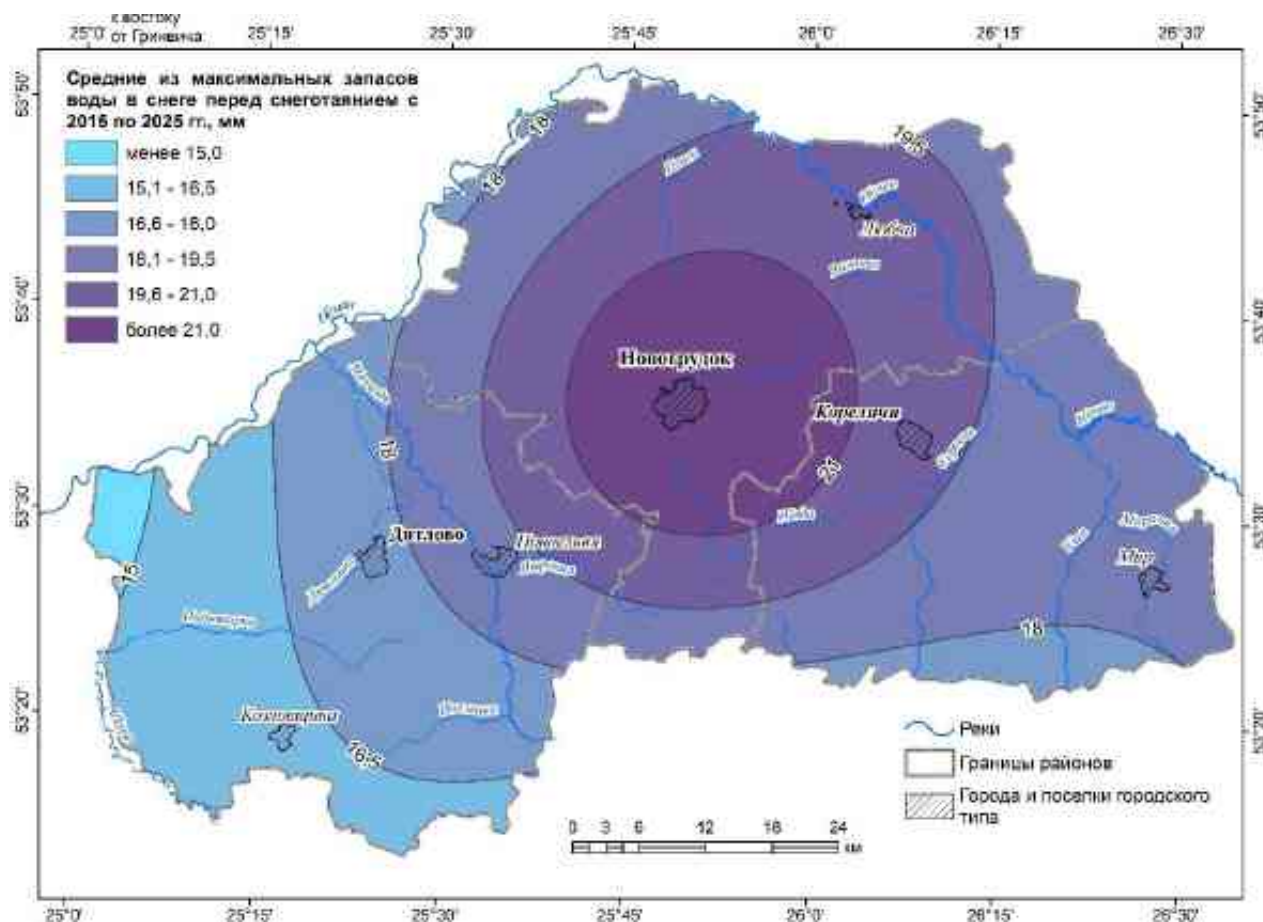


Рис. 4. Пространственная дифференциация средних из максимальных запасов воды в снеге перед снеготаянием, 2015–2025 гг., мм

Fig. 4. Spatial differentiation of average maximum water reserves in snow before snowmelt, 2015–2025, mm

Распределение R-фактора носит мозаичный характер с выраженными ареалами повышенных значений в центральной зоне и доминированием низких, умеренных значений на восточной и юго-восточной периферии, при общей неоднородности показателя на всей территории. Наиболее высокие значения (521–540 и более 540) приурочены преимущественно к центральной части территории, где компактный очаг максимума выделяется в районе Новогрудка. Зоны повышенных значений (501–520) формируют вытянутую полосу в центрально-западной части территории и представлены отдельными локальными участками в окрестностях Дятлово и Новоелини. Это может свидетельствовать о влиянии климатического фактора в формировании потенциальной опасности водной эрозии. В направлении к востоку и юго-востоку (вблизи Кореличей, Мира, в окрестностях Любчи) преобладают пониженные значения R-фактора (менее 460 и 461–480). Юго-западная часть (в окрестностях Козловщины) характеризуется преимущественно низкими – умеренными значениями (преимущественно 461–500), с отдельными более высокими значениями (рис. 5).

Расчет фактора растительного покрова (С-фактор) выполнен на основе значений вегетационного индекса NDVI, преобразованного по формуле (2) [26]:

$$C = 0,1 \cdot \left(\frac{-NDVI + 1}{2} \right). \quad (2)$$

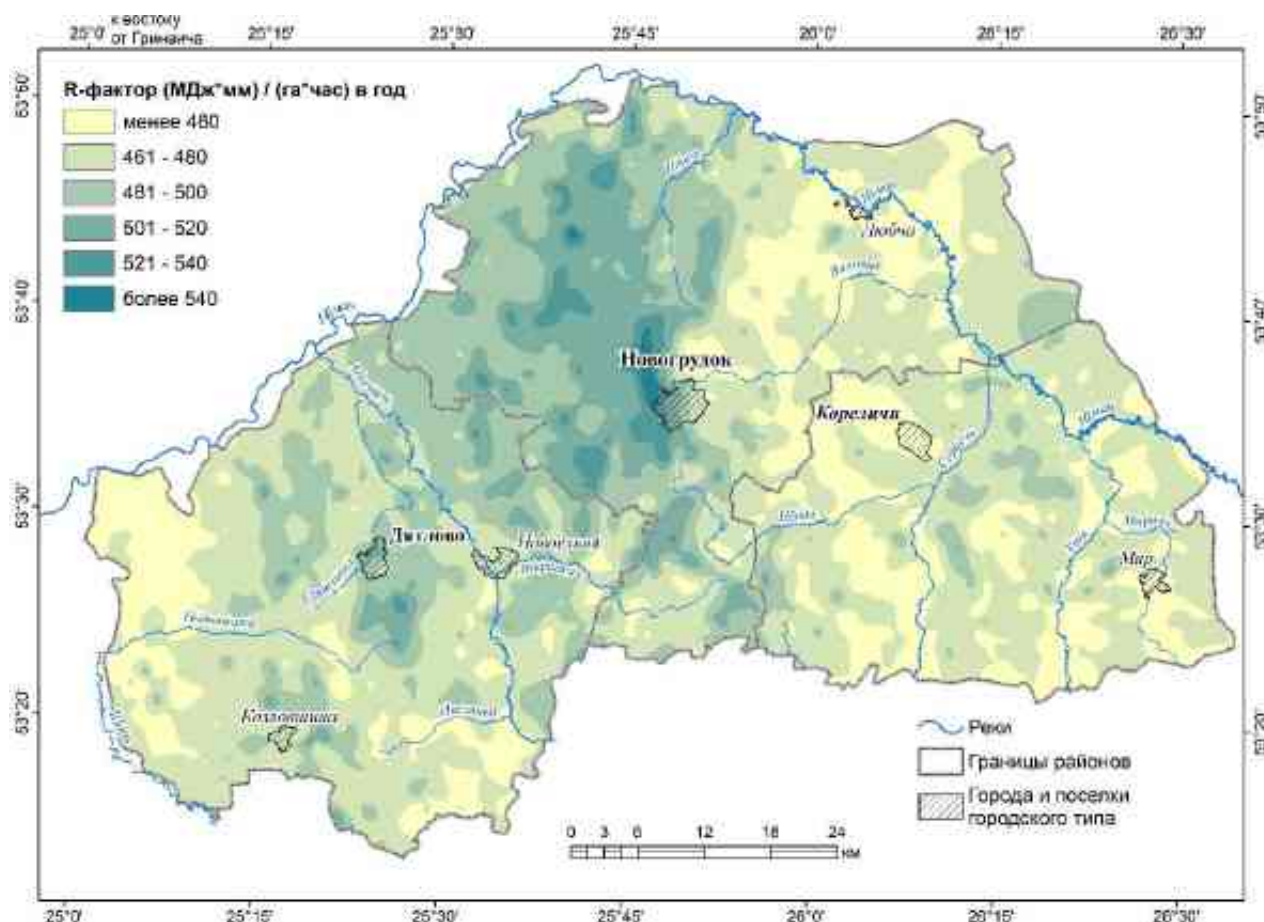


Рис. 5. Пространственное распределение эрозионного индекса дождевых осадков (R-фактор) с начала мая по конец сентября (составлено по данным [25])

Fig. 5. Spatial distribution of the rainfall erosion index (R-factor) from the beginning of May to the end of September (compiled according to [25])

Минимальные значения индекса NDVI за вегетационный период рассчитаны на основе цифровой обработки трёх космических снимков Sentinel-2 (даты съёмки: 11 мая 2021 г., 1 мая 2023 г. и 28 сентября 2023 г.) с помощью инструментов «Калькулятор раstra» и «Статистика по ячейкам» в ArcGIS, что позволило определить в каждом пикселе наименьшие значения индекса NDVI за период вегетации в 2021–2023 гг. Среди сельскохозяйственных земель более высокие значения C-фактора (0,04–0,05) характерны для пахотных земель, которые в начале вегетационного периода или после уборки урожая не покрыты растительностью. Для луговых и лесных земель преобладают значения C-фактора в диапазоне от 0,026 до 0,035, что обусловлено более высоким уровнем вегетации растительного покрова, поэтому луговые земли в меньшей степени подвержены водной эрозии по сравнению с пахотными (рис. 6).

ЦМР FABDEM использована для расчёта топографического индекса увлажнённости (Topographic Wetness Index – TWI) в ГИС SAGA. Высокие значения данного индекса (11,0 и более) характерны для речных долин и плоских понижений рельефа, которые выделяются высокой влажностью почв. Индекс TWI имеет более высокие значения на водоразделах по сравнению с участками склонов, где проявляется плоскостной смыв почв. Сильносмытые и среднесмытые почвы в центральной части Новогрудского района имеют средние значения индекса TWI 7,4 и 7,9 соответственно, в то время как слабосмытые и намывные почвы – 8,6 (рис. 7).

На основе количественного анализа факторов, учитывающих информацию о рельефе, почвенном покрове, климате и растительности, выполнена относительная оценка рисков проявления водной эрозии почв на сельскохозяйственных землях. Песчаные почвы преобладают на западе Новогрудской возвышенности и на северо-западе Новогрудского района, а переувлажнённые почвы доминируют в пределах речных долин Немана, Сервечи, Уши, Молчади и к юго-востоку и северо-востоку от Любчи и для них оценка степени проявления водной эрозии не выполнялась из-за её отсутствия или минимального уровня.

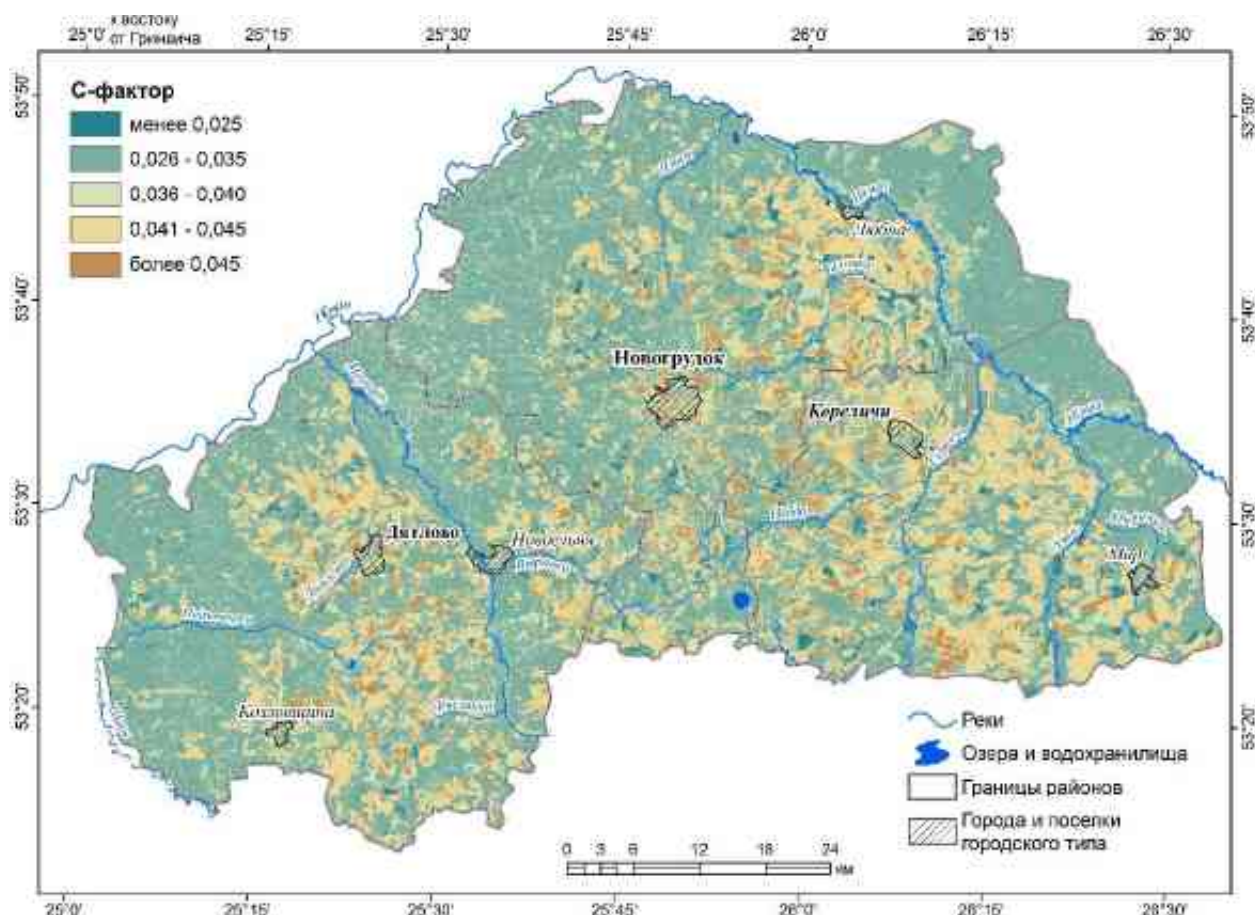


Рис. 6. Дифференциация значений фактора растительного покрова (С-фактор) для исследуемой территории

Fig. 6. Differentiation of the values of the vegetation cover factor (C-factor) for the study area

Для территорий со сглаженным рельефом (юго-восток Кореличского района, северная часть Новогрудского района, запад Новогрудской возвышенности) характерны низкие и минимальные значения (менее 2,0) оценки рисков проявления водной эрозии. В центральной части Новогрудской возвышенности и на её восточных склонах представлены контуры почв с повышенной и высокой степенью риска (более 5,0) к процессам водной эрозии, что обусловлено высокими значениями уклона рельефа, а также концентрацией долин небольших рек и овражно-балочных форм рельефа. На основе геоинформационного анализа крупномасштабной почвенной карты центральной части Новогрудского района установлено, что относительная оценка рисков проявления водной эрозии превышает 2,0 для эродированных почв (рис. 8).

Для выделения сильноэродированных почв были использованы не только значения относительной оценки рисков проявления водной эрозии, превышающие 10,0, но и высокие значения LS-фактора (более 3,0) и вертикального расчленения рельефа (более 39 м/км²), а также топографический индекс увлажнённости, который при высокой степени эродированности не превышает 7,7. Следует отметить, что для выбора значений, соответствующих критерию по оценке уязвимости почв к процессам водной эрозии, применялись такие инструменты, как «Калькулятор раstra» и «Извлечь по атрибутам». Крупномасштабные почвенные карты содержат информацию для территорий сельскохозяйственных организаций, в пределах которых расположены не только пахотные и луговые земли, преобладающие в их структуре, но и земли под застройкой и общего пользования, а также под древесно-кустарниковой растительностью. Пространственная информация о расположении сельскохозяйственных земель для исследуемой территории получена на основе автоматизированного дешифрирования космического снимка Sentinel-2 за 1 мая 2023 г. Для конвертации векторного слоя сельскохозяйственных земель в растровый формат использован инструмент «Полигон в растр», а для выборки контуров почв, уязвимых к водной эрозии, в пределах сельскохозяйственных земель применен инструмент «Булев оператор And». Затем полученный слой конвертирован в векторный формат, что является необходимым этапом для проведения геометрической генерализации, в результате которой происходит удаление контуров с площадью

до 0,2 га, а также выполняется заполнение небольших пробелов внутри участков эродированных почв и сглаживание контуров.

Для идентификации среднесмытых почв использованы значения оценки рисков проявления водной эрозии от 4,5 до 10,0, а в случае, когда данный показатель превышает 10,0, проводится выборка только тех участков, где вертикальное расчленение рельефа составляет менее 39 м/км², LS-фактор – менее 3,0, а индекс TWI – более 7,7. Слабосмытые почвы отличаются преобладанием значений относительной оценки уязвимости к водной эрозии в пределах от 2,0 до 4,5. Векторные слои слабо-, средне- и сильносмытых почв объединены в один класс пространственных объектов, содержащий в себе три подкласса по степени эродированности.

Пространственное пересечение векторных слоев эродированных почв, сельскохозяйственных земель и административно-территориальных единиц (районов, сельсоветов), а также геоинформационный анализ атрибутивных таблиц позволяет проанализировать внутрирегиональную дифференциацию почв по степени уязвимости к водной эрозии.

В результате применения данной методики определена общая площадь почв, подверженных плоскостному смыву, которая составила 20 847,6 га для исследуемой территории. В пределах Новогрудской возвышенности площадь эродированных почв изменяется от 3403,4 до 9630,0 га для Дятловского и Новогрудского районов соответственно. Сильносмытые почвы имеют очень низкий удельный вес (1,3 %) в структуре эродированных почв Дятловского района, в то время как для Новогрудского и Кореличского районов – около 9,0 %. Среди эродированных почв Дятловского района преобладают слабосмытые (73,6 %), что обусловлено не только более низкими значениями морфометрических показателей рельефа по сравнению с Новогрудским и Кореличским районами, но и различиями в гранулометрическом составе и генезисе почвообразующих пород (см. таблицу).

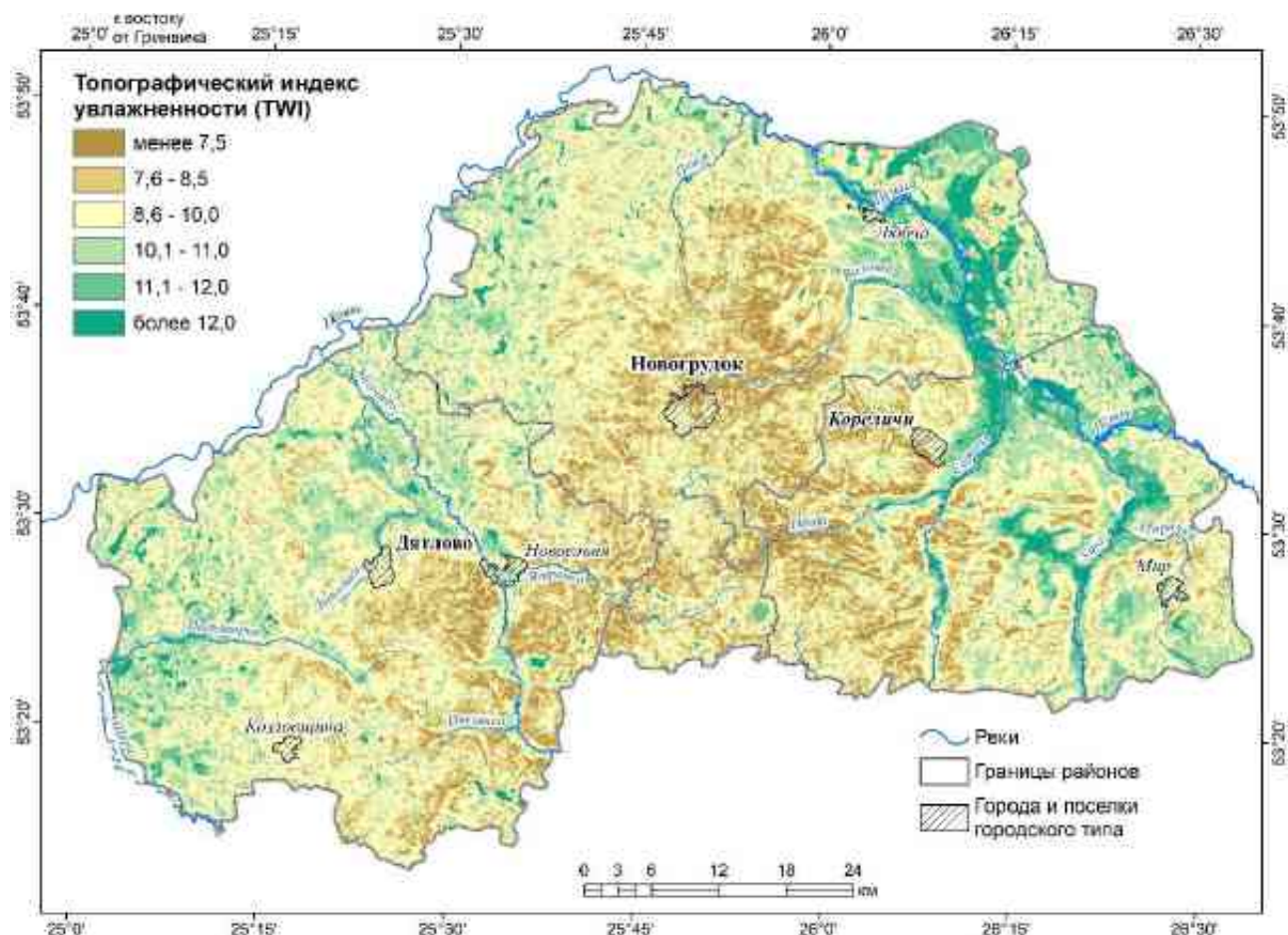


Рис. 7. Пространственное распределение топографического индекса увлажненности (TWI) на территории Новогрудской возвышенности

Fig. 7. Spatial distribution of topographic wetness index (TWI) on the territory of the Novogrudok upland

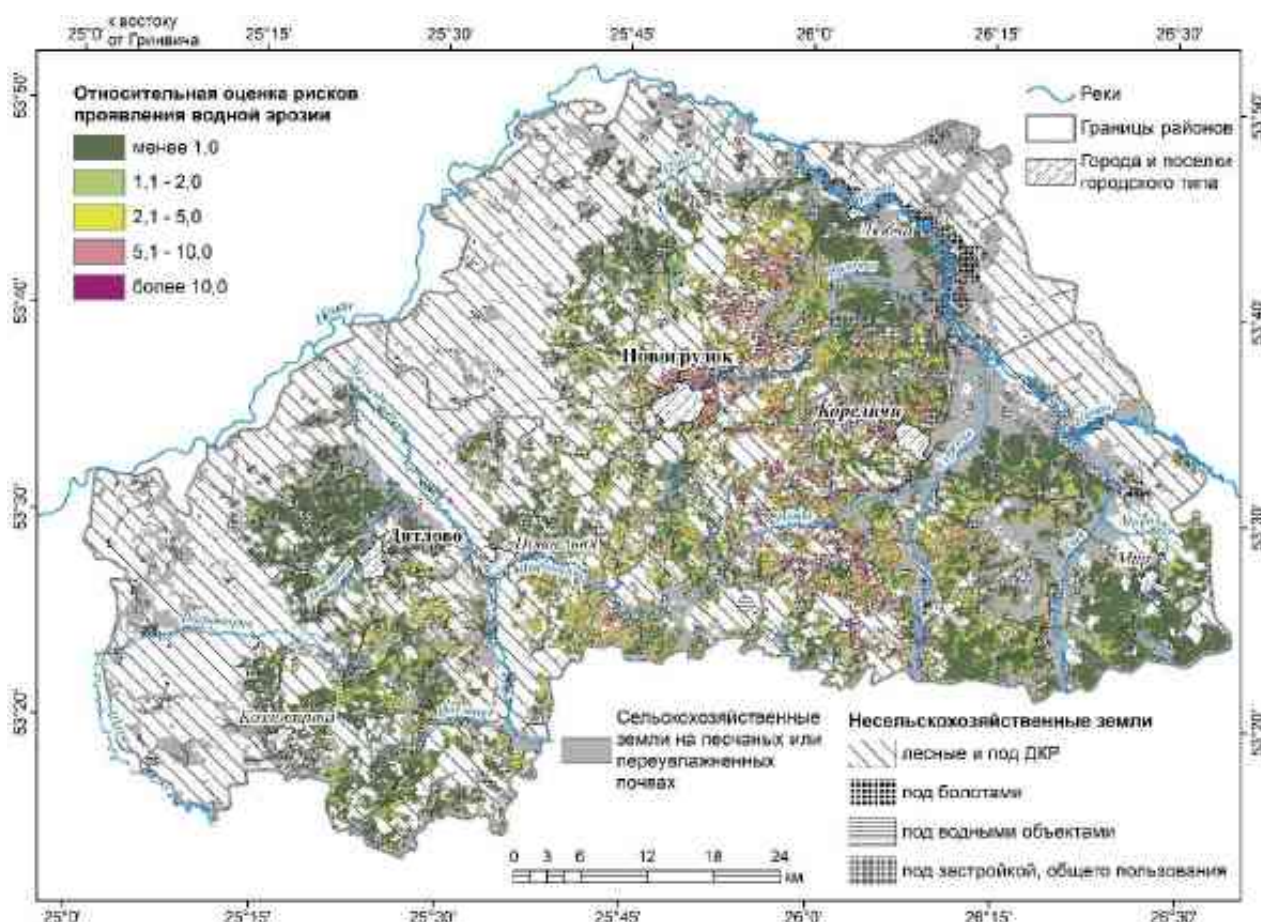


Рис. 8. Пространственное распределение относительной оценки рисков проявления водной эрозии почв сельскохозяйственных земель

Fig. 8. Spatial distribution of the relative risk assessment of water erosion of agricultural soils

Площади почв, подверженных водной эрозии, по основным районам Новогрудской возвышенности, га

Areas of soils subject to water erosion in the main districts of the Novogrudok Upland, ha

Район	Почвы, подверженные водной эрозии (плоскостному смыву)			
	всего	в том числе по степени проявления		
		слабосмытые	среднесмытые	сильносмытые
Новогрудский	9630,0	4608,1	4137,4	884,5
Кореличский	7814,2	3523,9	3586,0	704,3
Дятловский	3403,4	2506,7	852,7	44,0

По полученным данным была проанализирована дифференциация сельсоветов по удельному весу эродированных почв в составе сельскохозяйственных земель. Следует отметить, что в пределах исследуемой территории наблюдается выраженная неравномерность распределения показателя: наиболее высокие значения сосредоточены в направлении востока – северо-востока от Новогрудка и в западной части Кореличского района, где преобладают значения 15,1–25,0 % и более 25,0 %, формируя зону повышенной эродированности. Напротив, периферийные зоны (прежде всего северо-запад и запад, а также отдельные участки северо-восточной окраины) характеризуются пониженными значениями – чаще всего менее 2,0 % и 2,1–5,0 %, что указывает на более благоприятные условия сохранности почвенного покрова и меньшую выраженность факторов водной эрозии на этих участках. Экстремальные значения показателя подчёркивают контраст территории: максимальный удельный вес эродированных почв отмечен в Броднянском сельсовете (32,8 %), к группе очень высоких также относятся Ладеницкий (27,2 %) и Воробьевичский (24,0 %) сельсоветы; минимум зафиксирован

в Жуковщинском сельсовете (0,3 %), близкие к нему низкие значения также сосредоточены в Поречском (1,0 %) и Еремичском (1,0 %) сельсоветах.

Дополнительная информация представлена круговыми диаграммами, размещёнными в границах сельсоветов, которые показывают структуру эродированных почв по степени смытости (слабо-, средне- и сильносмытые). Анализ круговых диаграмм свидетельствует, что в большинстве сельсоветов ведущую долю в составе эродированных почв составляют слабосмытые, однако для территорий с повышенной общей эродированностью заметно увеличивается вклад среднесмытых и сильносмытых разновидностей, что указывает на более интенсивное развитие эрозионных процессов и потенциально более высокий риск деградации земель.

Можно отметить, что распределение эродированных почв по сельсоветам характеризуется наличием центрально-восточной зоны повышенной эродированности и постепенным переходом к более низким значениям на периферии, что важно учитывать при оценке степени эрозионной опасности и приоритетности противозерозионных мероприятий на сельскохозяйственных землях (рис. 9).

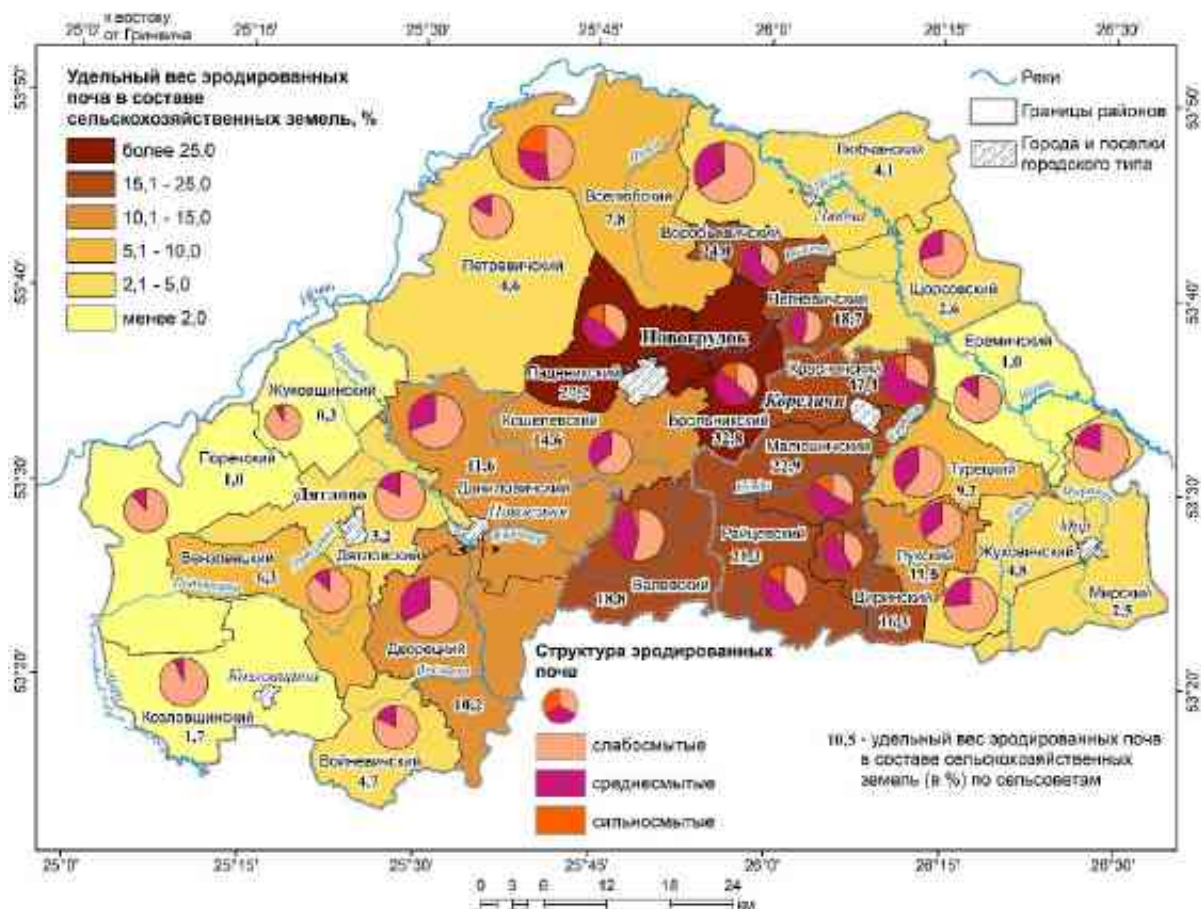


Рис. 9. Дифференциация сельсоветов по удельному весу эродированных почв в составе сельскохозяйственных земель

Fig. 9. Differentiation of selsoviets by the proportion of eroded soils in agricultural lands

Для количественной оценки точности выполнено сопоставление результатов, полученных на основе изложенной методики, и статистических данных о площади почв, подверженных плоскостному смыву, из практического пособия [27]. Следует отметить, что расхождения по площади дифференцируются от +3,7 % для Новогрудского района до +26,7 и –29,9 % для Дятловского и Кореличского районов соответственно, так как за период с 2001 по 2021–2023 гг. произошло изменение площади эродированных почв в связи с переводом контуров почв, подверженных сильному плоскостному смыву, в состав земель, занятых лесной и древесно-кустарниковой растительностью. В Дятловском районе увеличение площади эродированных почв может быть связано с переводом наиболее плодородных участков улучшенных луговых земель в состав пахотных, а уменьшение площади почв сельскохозяйственных земель, подверженных плоскостному смыву, в Кореличском районе обусловлено ростом земель под древесно-кустарниковой растительностью на крутых склонах.

Заключение. В работе выполнена геоинформационная оценка уязвимости почв к водной эрозии на сельскохозяйственных землях Новогрудской возвышенности на основе комплексного учета рельефа, почвенного покрова, климатических параметров и растительности. Для этого использованы морфометрические показатели по ЦМР FABDEM (включая LS-фактор и индекс TWI), характеристики почв (коэффициент фильтрации и коэффициент Водогребного), климатические индикаторы (эрозионный индекс дождей осадков R и запасы воды в снеге перед снеготаянием), а также C-фактор, рассчитанный по космическим снимкам Sentinel-2 через минимальные значения спектрального индекса NDVI. Интеграция факторов в единую расчётную схему позволила получить пространственно детализированную карту относительных рисков проявления водной эрозии и на её основе выполнить выделение слабо-, средне- и сильноэродированных почв с применением пороговых значений (в том числе по LS-фактору, вертикальному расчленению рельефа и индексу TWI) и последующей генерализацией контуров.

Установлено, что минимальные риски характерны для сглаженных поверхностей и участков с песчаными и переувлажнёнными почвами, тогда как зоны повышенной эрозионной опасности приурочены к центральной части возвышенности и восточным склонам с более расчленённым рельефом. Общая площадь почв, подверженных плоскостному смыву, составила 20 847,6 га; наибольшие значения отмечены в Новогрудском (9630,0 га) и Кореличском (7814,2 га) районах, наименьшие – в Дятловском (3403,4 га). Слабоэродированные почвы преобладают в структуре эродированных почв Дятловского района (73,6 %), а доля сильноэродированных почв минимальна (1,3 %); в Новогрудском и Кореличском доля сильноэродированных почв достигает около 9,0 %.

Таким образом, полученные результаты могут применяться для планирования противоэрозионных мероприятий и мониторинга состояния сельскохозяйственных земель.

Список использованных источников

1. Горбачёва, Е. Н. Применение универсального уравнения потерь почвы от эрозии (RUSLE) при оценке интенсивности водно-эрозионных процессов на основе ГИС / Е. Н. Горбачёва // Почвоведение и агрохимия. – 2011. – № 2 (47). – С. 42–51.
2. Лазовик, Г. С. Оценка эрозионной опасности почв и её картографирование с использованием ГИС-технологий / Г. С. Лазовик, А. А. Топаз // Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология. – 2021. – № 2. – С. 18–31. – DOI: 10.33581/2521-6740-2021-2-18-31.
3. Кухарик, Е. А. Особенности проявления современных водно-эрозионных процессов на территории Центральной Беларуси / Е. А. Кухарик, А. В. Матвеев // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2022. – Т. 66, № 6. – С. 622–630. – DOI: 10.29235/1561-8323-2022-66-6-622-630.
4. Козлов, Е. А. Использование ГИС-технологий для оценки активности эрозии и денудации рельефа в пределах учебной географической станции БГУ «Западная Березина» / Е. А. Козлов, В. А. Генин, Д. М. Курлович // Земля Беларуси. – 2015. – № 4. – С. 41–44.
5. Червань, А. Н. Эрозионные агроландшафты Беларуси: борьба с эрозией почв и территориальное планирование землепользования / А. Н. Червань, А. Ф. Черныш // Эрозионные и русловые процессы : сб. науч. тр. – М. : МГУ, 2020. – Вып. 7. – С. 338–356.
6. Горбачёва, Е. Н. Автоматизированное дешифрирование почв, подверженных водно-эрозионным процессам / Е. Н. Горбачёва // Почвоведение и агрохимия. – 2011. – № 1 (46). – С. 46–55.
7. Кравцова, В. И. Космические методы исследования почв : учеб. пособие для студентов вузов / В. И. Кравцова. – М. : Аспект Пресс, 2005. – 190 с.
8. Abdel-Kader, F. H. Assessment and monitoring of land degradation in the northwest coast region, Egypt using Earth observations data / F. H. Abdel-Kader // Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science. – 2019. – Vol. 22. – P. 165–173.
9. Sujatha, E. R. Spatial prediction of erosion risk of a small mountainous watershed using RUSLE: A case-study of the Palar Sub-Watershed in Kodaikanal, South India / E. R. Sujatha, V. Sridhar // Water. – 2018. – Vol. 10, № 1608. – P. 1–17.
10. Wang, S. Spatial and temporal variability of soil erosion in Northeast China from 2000 to 2020 / S. Wang, X. Xu, L. Huang // Remote Sensing. – 2023. – Vol. 15, № 225. – P. 1–21.
11. Безгодова, О. В. Морфометрический анализ территории верховья р. Иркут / О. В. Безгодова // Региональные геосистемы. – 2023. – Т. 47, № 2. – С. 282–295. – DOI: 10.52575/2712-7443-2023-47-2-282-295.
12. Буряк, Ж. А. Эрозионная опасность пахотных земель Белгородской области / Ж. А. Буряк, А. Г. Нарожная, О. А. Маринина // Региональные геосистемы. – 2023. – Т. 47, № 1. – С. 101–115. – DOI: 10.52575/2712-7443-2023-47-1-101-115.
13. Лисецкий, Ф. Н. Современные проблемы эрозиоведения / Ф. Н. Лисецкий, А. А. Светличный, С. Г. Черный. – Белгород : Константа, 2012. – 455 с.
14. Кислицын, Д. А. Геоинформационный анализ динамики и структуры классов земельного покрытия Новогрудской возвышенности / Д. А. Кислицын, Н. В. Клебанович // Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология. – 2024. – № 1. – С. 126–140.

15. Национальный доклад: Уязвимость и адаптация к изменению климата в Беларуси. – Мн. : Форум восточных стран по климату, 2014. – 45 с.
16. Данилович, И. С. Оценка климатической уязвимости территории Беларуси на основе безразмерных климатических индексов / И. С. Данилович // Актуальные вопросы устойчивого природопользования: научно-методическое обеспечение и практическое решение : материалы Междунар. науч.-практич. конференции, посвящ. 60-летию науч.-исслед. лаборатории экологии ландшафтов факультета географии и геоинформатики Бел. гос. ун-та, Минск, 9–11 нояб. 2022 г. / Бел. гос. ун-т, фак. географии и геоинформатики ; [редкол.: Д. С. Воробьев (отв. ред.) и др.]. – Мн., 2022. – С. 29–32.
17. Яцухно, В. М. Система критериев и индикаторов для оценки уязвимости почв агроландшафтов к климатическим изменениям / В. М. Яцухно, С. С. Бачила // Фундаментальные и прикладные исследования в гидрометеорологии : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 50-летию каф. общего землеведения и гидрометеорологии Бел. гос. ун-та, Минск, 11–13 окт. 2023 г. / Бел. гос. ун-т ; редкол.: П. С. Лопух (гл. ред.), Ю. А. Гледко, Е. В. Логинова. – Мн., 2023. – С. 482–488.
18. Оценка рисков и уязвимости к изменениям климата на локальном уровне – Туямунский гидроузел – Узбекистан/Туркменистан / Г. Петерсен, Р. Бош, Д. Дядин [и др.]. – Алматы, 2021. – 118 с.
19. Лепешев, А. А. Овражная эрозия Новогрудской возвышенности / А. А. Лепешев. – Мн : БГПУ, 2004. – 118 с.
20. Нацыянальны атлас Беларусі. – Мн. : Белкартаграфія, 2024. – 348 с.
21. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed / L. Hawker, P. Uhe, L. Paulo [et al.] // Environmental Research Letters. – 2022. – Vol. 17, № 024016. – P. 1–11. – DOI: 10.1088/1748-9326/ac4d4f.
22. Червань, А. Н. Опыт изучения динамики землепользования на основе геосистемного подхода на примере Новогрудской возвышенности Беларуси / А. Н. Червань, Д. А. Кислицын // Региональные геосистемы. – 2025. – Т. 49, № 3. – С. 434–449. – DOI: 10.52575/2712-7443-2025-49-3-434-449.
23. OpenStreetMap. 2025. – URL: <http://download.geofabrik.de/europe/belarus.html> (date of access: 22.11.2025).
24. Червань, А. Н. Геоинформационная формализация и геостатистический анализ почвенного покрова Беларуси : учеб.-метод. пособие / А. Н. Червань. – Мн. : БГУ, 2025. – 175 с.
25. Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records / P. Panagos, P. Borrelli, K. Meusburger [et al.] // Scientific Reports. – 2017. – Vol. 7. – Art. 4175. – P. 1–13.
26. Моделирование водной эрозии с использованием уравнения RUSLE в масштабе землепользования / А. С. Кузнецова, К. В. Краснощек, А. В. Дергунов [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2024. – Т. 21, № 3. – С. 145–154.
27. Почвы сельскохозяйственных земель Республики Беларусь : [практическое пособие] / Комитет по земельным ресурсам, геодезии и картографии при Совете Министров Республики Беларусь. – Мн. : Оргстрой, 2001. – 428 с.

References

1. Gorbacheva E. N. *Primeneniye universal'nogo uravneniya poter' pochvy ot erozii (RUSLE) pri otsenke intensivnosti vodno-erozionnykh protsessov na osnove GIS* [RUSLE Model implementation for estimation intensivity of water erosion processes on Belarusian soil cover]. *Pochvovedeniye i agrokhimiya = Soil Science and Agrochemistry*, 2011, vol. 2, no. 47, pp. 42–51. (in Russian)
2. Lazovik H. S., Topaz A. A. *Otsenka erozionnoy opasnosti pochv i yeye kartografirovaniye s ispol'zovaniyem GIS-tekhnologiy* [Assessment of soil erosion hazard and its mapping using GIS technologies]. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Geografiya. Geologiya = Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology*, 2021, vol. 2, pp. 18–31, DOI: 10.33581/2521-6740-2021-2-18-31. (in Russian)
3. Kukharik E. A., Matveyev A. V. *Osobennosti proyavleniya sovremennykh vodno-erozionnykh protsessov na territorii Tsentral'noy Belarusi* [Features of manifestation of modern water-erosion processes in the Central Belarus territory]. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2022, vol. 66, no. 6, pp. 622–630, DOI: 10.29235/1561-8323-2022-66-6-622-630. (in Russian)
4. Kazlou Ya. A., Genin U. A., Kurlovich D. M. *Ispol'zovaniye GIS-tekhnologiy dlya otsenki aktivnosti erozii i denudatsii rel'yefa v predelakh uchebnoy geograficheskoy stantsii BGU "Zapadnaya Berezina"* [Using of GIS-technologies for assessment of activity of erosion and denudation of landforms within the Western Berezina educational geographical station of the Belarusian State University]. *Zemlya Belarusi = Land of Belarus*, 2015, no. 4, pp. 41–44. (in Russian)
5. Chervan A. N., Chernysh A. A. *Erozionnyye agrolandshafty Belarusi: bor'ba s eroziyey pochv i territorial'noye planirovaniye zemlepol'zovaniya* [Erosion agrolandscapes of Belarus: soil erosion control and land use territorial planning]. *Erozionnyye i ruslovyye protsessy. Sbornik nauchnykh trudov = Erosion and channel processes. Collection of scientific papers*, 2020, vol. 7, pp. 338–356. (in Russian)
6. Gorbacheva E. N. *Avtomatizirovannoye deshifirovaniye pochv, podverzhennykh vodno-erozionnym protsessam* [Automated interpretation of soils subject to water-erosion processes]. *Pochvovedeniye i agrokhimiya = Soil science and agrochemistry*, 2011, vol. 1, no. 46, pp. 46–55. (in Russian)
7. Kravtsova V. I. *Kosmicheskiye metody issledovaniya pochv: uchebnoye posobiye dlya studentov vuzov* [Space methods of soil research: a textbook for university students]. Moscow, Aspect Press Publ., 2005, 190 p. (in Russian)
8. Abdel-Kader F. H. Assessment and monitoring of land degradation in the northwest coast region, Egypt using Earth observations data. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 2019, vol. 22, pp. 165–173.

9. Sujatha E. R., Sridhar V. Spatial prediction of erosion risk of a small mountainous watershed using RUSLE: A case-study of the Palar Sub-Watershed in Kodaikanal, South India. *Water*, 2018, vol. 10, no. 1608, pp. 1–17.
10. Wang S., Xu X., Huang L. Spatial and temporal variability of soil erosion in Northeast China from 2000 to 2020. *Remote Sensing*, 2023, vol. 15, no. 225, pp. 1–21.
11. Bezgodova O. V. *Morfometricheskii analiz territorii verkhov'ya reki Irkut* [Morphometric analysis of the Upper Irkut river territory]. *Regional'nyye geosistemy = Regional Geosystems*, 2023, vol. 47, no. 2, pp. 282–295, DOI: 10.52575/2712-7443-2023-47-2-282-295. (in Russian)
12. Buryak Zh. A., Narozhnyaya A. G., Marinina O. A. *Erozionnaya opasnost' pakhotnykh zemel' Belgorodskoy oblasti* [Erosion risk of arable land in the Belgorod Oblast]. *Regional'nyye geosistemy = Regional Geosystems*, 2023, vol. 47, no. 1, pp. 101–115, DOI: 10.52575/2712-7443-2023-47-1-101-115. (in Russian)
13. Lisetsky F. N., Svetlichny A. A., Cherny S. G. *Sovremennyye problemy erozirovedeniya* [Modern problems of erosion studies]. Belgorod, Constanta Publ., 2012, 455 p. (in Russian)
14. Kislitsyn D. A., Klebanovich N. V. *Geoinformatsionnyy analiz dinamiki i struktury klassov zemel'nogo pokrytiya Novogrudskoy vozvyshehnosti* [Geoinformation analysis of the dynamics and structure of land cover classes of the Novogrudok Upland]. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Geografiya. Geologiya. = Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology*, 2024, vol. 1, pp. 126–140. (in Russian)
15. *Natsional'nyy doklad: Uyazvimost' i adaptatsiya k izmeneniyu klimata v Belarusi* [National Report: Vulnerability and adaptation to climate change in Belarus]. Minsk, Eastern Climate Forum Publ., 2014, 45 p. (in Russian)
16. Danilovich I. S. *Otsenka klimaticheskoy uyazvimosti territorii Belarusi na osnove bezrazmernykh klimaticheskikh indeksov* [Assessment of climate vulnerability of the territory of Belarus based on dimensionless climate indices]. *Aktual'nyye voprosy ustoychivogo prirodopol'zovaniya: nauchno-metodicheskoye obespecheniye i prakticheskoye resheniye: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 60-letiyu nauchno-issledovatel'skoy laboratorii ekologii landshaftov fakul'teta geografii i geoinformatiki Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta* [Current issues of sustainable nature management: scientific and methodological support and practical solutions: Proceedings of the international scientific and practical conference dedicated to the 60th anniversary of the Research Laboratory of Landscape Ecology of the Faculty of Geography and Geoinformatics of the Belarusian State University]. Minsk, 2022, pp. 29–32. (in Russian)
17. Yatsuhno V. M., Bachila S. S. *Sistema kriteriyev i indikatorov dlya otsenki uyazvimosti pochv agrolandshaftov k klimaticheskim izmeneniyam* [System of criteria and indicators for assessing the vulnerability of agricultural landscape soils to climate change]. *Fundamental'nyye i prikladnyye issledovaniya v gidrometeorologii: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchayashchennoy 50-letiyu kafedry obshchego zemlevedeniya i gidrometeorologii Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta* [Fundamental and applied research in hydrometeorology: Proceedings of the international scientific and practical conference dedicated to the 50th anniversary of the Department of General Geoscience and Hydrometeorology of the Belarusian State University]. Minsk, 2023, pp. 482–488. (in Russian)
18. Petersen G., Bosh R., Dyadin D., Kattarossi A., Konstantin K. *Otsenka riskov i uyazvimosti k izmeneniyam klimata na lokal'nom urovne – Tuyamuyunskiy gidrouzel – Uzbekistan/Turkmenistan* [Local-scale risk and vulnerability assessment to climate change – Tuyamuyun hydroelectric complex – Uzbekistan/Turkmenistan]. Almaty, 2021, 118 p. (in Russian)
19. Lepeshev A. A. *Ovrazhnaya eroziya Novogrudskoy vozvyshehnosti* [Gully erosion of the Novogrudok Upland]. Minsk, BSPU, 2004, 118 p. (in Russian)
20. *Natsional'nyi atlas Belarusi = National Atlas of Belarus*. Minsk, Belkatografiya Publ., 2024, 348 p. (in Belarussian).
21. Hawker L., Uhe P., Paulo L., Sosa J., Savage J., Sampson C., Neal J. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. *Environmental Research Letters*, 2022, vol. 17, № 024016, pp. 1–11, DOI: 10.1088/1748-9326/ac4d4f.
22. Chervan A. N., Kislitsyn D. A. *Opyt izucheniya dinamiki zemlepol'zovaniya na osnove geosistemnogo podkhoda na primere Novogrudskoy vozvyshehnosti Belarusi* [Studying land use dynamics under the geosystem approach on the example of the Belarus Novogrudok Upland]. *Regional'nyye geosistemy = Regional Geosystems*, 2025, vol. 49, no. 3, pp. 434–449. – DOI: 10.52575/2712-7443-2025-49-3-434-449. (in Russian)
23. OpenStreetMap (2025). URL: <http://download.geofabrik.de/europe/belarus.html> (accessed November 22, 2025).
24. Chervan A. N. *Geoinformatsionnaya formalizatsiya i geostatisticheskii analiz pochvennogo pokrova Belarusi* [Geoinformation formalization and geostatistical analysis of the soil cover of Belarus]. Minsk, BSU Publ., 2025, 175 p. (in Russian)
25. Panagos P., Borelli P., Meusburger K., et al. Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records. *Scientific Reports*, 2017, vol. 7, art. 4175, pp. 1–13.
26. Kuznetsova A. S., Krasnoshchekov K. V., Dergunov A. V., Erunova M. G., Makarov D. S., Kharlamov D. V., Yakubailik O. E. *Modelirovaniye vodnoy erozii s ispol'zovaniyem uravneniya RUSLE v masshtabe zemlepol'zovaniya* [Modeling water erosion using the RUSLE equation at the land use scale]. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Modern problems of remote sensing of the Earth from Space*, 2024, vol. 21, no. 3, pp. 145–154. (in Russian)
27. *Pochvy sel'skokhozyaystvennykh zemel' Respubliki Belarus': [prakticheskoye posobiye]* [Soils of agricultural lands of the Republic of Belarus: [practical guide]]. *Komitet po zemel'nym resursam, geodezii i kartografii pri Sovete Ministrov Respubliki Belarus'* [Committee on Land Resources, Geodesy and Cartography under the Council of Ministers of the Republic of Belarus]. Minsk, Orgstroy Publ., 2001, 428 p. (in Russian)

Информация об авторах

Кислицын Дмитрий Андреевич – аспирант кафедры почвоведения и геоинформационных систем, преподаватель, Белорусский государственный университет (ул. Ленинградская, 16, 220030, г. Минск, Беларусь). E-mail: dimas_13082000@mail.ru

Небышинец Арина Михайловна – аспирант кафедры общего землеведения и гидрометеорологии, преподаватель, Белорусский государственный университет (ул. Ленинградская, 16, 220030, г. Минск, Беларусь). E-mail: arinanebyshinec@gmail.com

Клебанович Николай Васильевич – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, ООО «Белорусское географическое общество» (ул. Курчатова, 7, 220064, г. Минск, Беларусь). E-mail: n_klebanovich@inbox.ru

Information about the authors

Dmitry A. Kislitsyn – Postgraduate student of department of Soil Science and Geographic Information systems, lecturer, Belarusian State University (16, Leningradskaya St., 220030, Minsk, Belarus). E-mail: dimas_13082000@mail.ru

Arina M. Nebyshynets – Postgraduate student of department of General Geography and Hydrometeorology, lecturer, Belarusian State University (16, Leningradskaya St., 220030, Minsk, Belarus). E-mail: arinanebyshinec@gmail.com

Nikolay V. Klebanovich – D. Sc. (Agriculture), Full Professor, Belarusian Geographical Society (7, Kurchatov St., 220064, Minsk, Belarus). E-mail: n_klebanovich@inbox.ru