

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИКИ И СТРУКТУРЫ КЛАССОВ ЗЕМЕЛЬНОГО ПОКРЫТИЯ НОВОГРУДСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ

Д. А. КИСЛИЦЫН¹⁾, Н. В. КЛЕБАНОВИЧ¹⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Аннотация. С использованием авторской методики автоматизированного дешифрирования структуры классов земельного покрытия в программных комплексах *ENVI* (версия 5.3), *ArcGIS* (версия 10.7) для космических снимков «Landsat-5», «Landsat-7» и «Sentinel-2» рассчитаны площади классов земельного покрытия трех административных районов Новогрудской возвышенности (Кореличского, Новогрудского и Дятловского районов Гродненской области). Проанализированы ключевые особенности структуры классов земельного покрытия за период с 1986 по 2019 г., которая заметно различается внутри исследуемого региона. Данный факт вызван природными условиями, спецификой рельефа, а также уровнем плодородия почв, что отразилось на степени сельскохозяйственной освоенности административных районов. Показана возможность применения сведений о рельефе и вегетационном индексе NDVI в геоинформационной системе *ArcGIS* (версия 10.7) для повышения общей точности результатов автоматизированного дешифрирования в векторном формате. С использованием морфометрических показателей рельефа (уклона и вертикального расчленения) и вегетационного индекса NDVI выявлены ареалы почв, подверженных водной эрозии, и основные участки овражно-балочной сети на территории Новогрудской возвышенности на базе автоматизированного дешифрирования космического снимка «Sentinel-2» за 2019 г. Установлены особенности пространственного расположения пахотных земель на эродированных почвах, которые заметно чаще встречаются на восточных склонах Новогрудской возвышенности, чем на западных, что связано с различиями в значениях морфометрических показателей рельефа, спецификой генезиса почвообразующих пород и гранулометрического состава почв. Выполнена оценка точности итогового результата автоматизированного дешифрирования на основе матрицы ошибок, которая составила 80,4 %, при этом наибольшие значения пользовательской точности (более 90 %) характерны для водных объектов, а также для лесных земель и земель под древесно-кустарниковой растительностью на автоморфных и полугидроморфных почвах.

Ключевые слова: автоматизированное дешифрирование; рельеф; вегетационный индекс; NDVI; земельное покрытие; эрозия почв; Новогрудская возвышенность.

Образец цитирования:

Кислицын ДА, Клебанович НВ. Геоинформационный анализ динамики и структуры классов земельного покрытия Новогрудской возвышенности. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология.* 2024;1:126–140.
EDN: ZHVZB

For citation:

Kislitsyn DA, Klebanovich NV. Geoinformation analysis of the dynamics and structure of land cover classes of the Novogradok Upland. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology.* 2024;1:126–140. Russian.
EDN: ZHVZB

Авторы:

Дмитрий Андреевич Кислицын – преподаватель-стажер кафедры почвоведения и геоинформационных систем факультета географии и геоинформатики.

Николай Васильевич Клебанович – доктор сельскохозяйственных наук, профессор; профессор кафедры почвоведения и геоинформационных систем факультета географии и геоинформатики.

Authors:

Dmitry A. Kislitsyn, trainee lecturer at the department of soil science and geographic information systems, faculty of geography and geoinformatics.

dimas_13082000@mail.ru

Nikolay V. Klebanovich, doctor of science (agricultural sciences), full professor; professor at the department of soil science and geographic information systems, faculty of geography and geoinformatics.

n_klebanovich@inbox.ru

GEOINFORMATION ANALYSIS OF THE DYNAMICS AND STRUCTURE OF LAND COVER CLASSES OF THE NOVOGRUDOK UPLAND

D. A. KISLITSYN^a, N. V. KLEBANOVICH^a

^aBelarusian State University, 4 Niezaliezhnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

Corresponding author: D. A. Kislitsyn (dimas_13082000@mail.ru)

Abstract. Using the author's method of automated interpretation of the land cover classes based on the software packages *ENVI* (version 5.3), *ArcGIS* (version 10.7) for «Landsat-5», «Landsat-7», and «Sentinel-2» satellite images, the areas of various land cover classes were calculated for three administrative districts of Novogrudok Upland (Korelichy, Novogrudok and Dyatlov districts of the Grodno Region). The main features of the structure of land cover classes for the period from 1986 to 2019 are analysed, which differ markedly within the region under study, due to natural conditions, relief features, as well as the level of soil fertility, which affected the degree of agricultural development of administrative districts. The possibility of using information about the relief and the normalised difference vegetation index (NDVI) to increase the overall accuracy of the results of automated interpretation in vector format in the geographic information system *ArcGIS* (version 10.7) is shown. Based on the use of morphometric indicators of the relief (slope and vertical dissection) and the NDVI, areas of soils susceptible to water erosion and the main areas of the gully network for the territory of the Novogrudok Upland were identified based on automated interpretation of the «Sentinel-2» satellite image for 2019. Features of the spatial location were identified arable land on eroded soils, which are noticeably more common on the eastern slopes of the Novogrudok Upland than on the western ones, which is associated with differences in the values of morphometric relief parameters, as well as with the peculiarities of the genesis of soil-forming rocks and the granulometric composition of soils. The accuracy of the final result of automated interpretation was assessed based on the error matrix, which amounted to 80.4 %, while the highest values of user accuracy (more than 90 %) are typical for water bodies, as well as forest lands and lands under trees and shrubs on automorphic and semi-hydromorphic soils.

Keywords: automated interpretation; relief; normalised difference vegetation index; NDVI; land cover; soil erosion; Novogrudok Upland.

Введение

Актуальность темы исследования в значительной степени обусловлена тем, что почвы и растительный покров являются одними из ключевых компонентов природно-ресурсного потенциала любой территории. Оперативно получить представление о данных объектах и их динамике можно только с помощью современных цифровых технологий. Для комплексного изучения структуры классов земельного покрытия необходимо использовать новейшие методики с применением геоинформационных систем (ГИС) и данных дистанционного зондирования Земли, что позволит своевременно выявлять процессы деградации почвенного покрова с их последующим картографированием. На основе результатов автоматизированного дешифрирования космических снимков можно установить тренды изменения классов земельного покрытия с учетом их пространственного распределения, а также оценить структуру землепользования на различных уровнях (в рамках районов, сельсоветов). ГИС-технологии позволяют увеличить скорость обработки пространственной информации путем автоматизации некоторых этапов при картографировании классов земельного покрытия и осуществить вычисление статистических значений для изучения динамики земельного покрытия.

Достаточно известными мировыми проектами в сфере комплексного использования данных дистанционного зондирования Земли для составления и обновления карт структуры земель и изучения динамики изменений классов земельного покрытия являются базы данных «CORINE Land Cover» [1], «National Land Cover Database» [2]. Оценка ежемесячных и сезонных темпов потери почвы (в т/га) из-за влияния водной эрозии на о. Крит (Греция) за два контрастных по степени увлажнения года (2016, 2019) на основе универсального уравнения потерь почвы от эрозии (*revised universal soil loss equation*, RUSLE) представлена в исследовании [3]. Для измерения масштабов водной эрозии на территории небольшого водораздела в южной Индии использована цифровая модель рельефа, полученная на базе глобальной цифровой модели рельефа *Aster*, метеорологической карты, космического снимка «Landsat-8», топографической карты и материалов обследований почв [4]. В статье [5] дан достаточно детальный аналитический обзор использования космических снимков «Sentinel-2» для изучения земельного и почвенно-растительного покрова, а также выполнено сопоставление общего уровня точности при применении различных методов автоматизированного дешифрирования спутниковых данных «Sentinel-2».

Ряд зарубежных публикаций посвящены геоинформационному картографированию структуры земельного покрытия на основе космических снимков «Sentinel-2» [6–8]. Теоретико-методологические аспекты применения космических снимков «Landsat» для анализа динамики земельного покрытия и подробная история развития методов автоматизированного дешифрирования спутниковых данных «Landsat» приведены в зарубежных обзорах [9; 10].

Статья А. А. Яновского [11] посвящена анализу эффективности использования снимков спектрорадиометра «Aster» для дистанционного разделения торфяных и дегроторфяных почв на основе парных отношений спектральных каналов в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах и нормализованных индексов (NDVI, NDWI). Детальная характеристика методов дистанционной диагностики нарушенных торфяных месторождений и стадий их восстановления с применением технологий визуального и автоматизированного дешифрирования космических снимков («Ikonos», «Aster» и «Landsat») в программном комплексе *ERDAS Imagine* представлена в работе [12].

В статье С. Г. Мышлякова [13] проанализированы возможности использования космических снимков «Landsat TM» и «Landsat ETM+» для осуществления контроля за сельскохозяйственным землепользованием в разрезе отдельно взятого хозяйства, а также для изучения структуры посевов сельскохозяйственных культур и их групп. Результаты автоматизированного дешифрирования космических снимков «Landsat» (за период с 1975 по 2014 г.) применены для оценки пространственной структуры природно-антропогенных ландшафтов Белорусской возвышенной провинции и проведения районирования природно-антропогенных ландшафтов по степени антропогенной преобразованности [14]. Исследование процессов автоматизации контролируемой классификации космических снимков на основе использования модели геообработки в среде *ArcGIS* (версия 10.7), созданной в программных комплексах *ModelBuilder* и *ERDAS Imagine*, и измерение точности различных методов классификации (гиперпараллелепипедного метода, а также методов минимального расстояния и максимального правдоподобия) представлены в работе [15]. В статье Е. Н. Горбачёвой [16] приведены результаты использования RUSLE для изучения территории тестового полигона в Минском районе. В качестве индикатора состояния ландшафтов и растительного покрова может применяться вегетационный индекс NDVI, который имеет высокую степень корреляции с объемом зеленой фитомассы и уровнем продуктивности экосистем [17; 18]. Анализ динамики значений этого индекса для исследования ландшафтов на территории Брестского и Гомельского Полесья приведен в работах белорусских ученых [19; 20].

Таким образом, использование технологий геоинформационного анализа материалов дистанционного зондирования Земли позволяет оперативно обработать большие объемы данных, но наличие информационного шума не дает возможности полной и однозначной идентификации объектов, поэтому можно выделить только их достаточно обобщенные классы.

Цель исследования – выявление ключевых особенностей классов земельного покрытия Новогрудской возвышенности в рамках трех административных районов с помощью геоинформационного анализа материалов космической съемки различного пространственного разрешения («Landsat-5», «Landsat-7» и «Sentinel-2»). Поставленная цель решалась путем использования ГИС-технологий и данных дистанционной съемки для автоматизированного дешифрирования классов земельного покрытия через применение цифровой модели рельефа и вегетационного индекса NDVI для повышения общей точности полученных результатов.

Материалы и методы исследования

Для проведения исследования выбрана территория Новогрудского, Кореличского и Дятловского районов Гродненской области, которые практически полностью входят в границы Новогрудской возвышенности.

Применялись мультиспектральные космические снимки из архивов съемочных систем «Landsat» (уровень обработки collection-2, level-2) и «Sentinel» (уровень обработки L2A), находящиеся в открытом доступе в интернет-каталогах Геологической службы США¹ и портала *Copernicus*² соответственно. Для изучения динамики трансформации классов земельного покрытия использовались три разновременных изображения серии «Landsat» (за 4 мая 1986 г., 2 мая 2000 г., 3 мая 2009 г.) с пространственным разрешением 30 м, обработанные в программном комплексе *ENVI* (версия 5.3), в котором методом максимального правдоподобия проводилось их автоматизированное дешифрирование. Для более точного выделения пахотных и луговых земель были задействованы также три снимка, необходимые для расчета значений вегетационного индекса NDVI в сентябре (реже в конце августа). Изображения «Sentinel-2» (пространственное разрешение 10 м для синего, зеленого, красного и ближнего инфракрасного каналов) использованы только за 17 апреля 2019 г., так как существенно более ранние снимки отсутствуют.

¹EarthExplorer [Electronic resource] // United States Geological Survey. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (date of access: 25.06.2023).

²Copernicus [Electronic resource]. URL: <https://scihub.copernicus.eu/> (date of access: 26.06.2023).

В данном исследовании применялись методы цифровой обработки космических снимков и геоинформационного анализа. Из четырех основных известных групп методов автоматизированного дешифрирования (контролируемая (с обучением), неконтролируемая, экспертная и объектно ориентированная классификации³) была использована прежде всего первая группа методов.

Для выполнения контролируемой классификации в программном комплексе *ENVI* (версия 5.3) был выбран метод максимального правдоподобия. Постклассификационная обработка классифицированных растров осуществлялась в среде *ArcGIS* (версия 10.7) на основе использования модели геообработки в программном комплексе *ModelBuilder*, основные принципы функционирования которой изложены в работе [21]. Цифровая модель рельефа Новогрудской возвышенности создана на базе метода интерполяции топо в растр в среде *ArcGIS* (версия 10.7), уклон рельефа определен на основе соответствующей опции из группы инструментов *spatial analyst*, а вертикальное расчленение рельефа установлено согласно методике, изложенной в статье Д. М. Курловича [22]. Использование данных о морфометрических показателях рельефа и растительности (вегетационном индексе NDVI) позволяет повысить точность итоговых изображений контуров классов земельного покрытия [23].

Результаты и их обсуждение

При анализе космических снимков серии «Landsat» были выделены восемь классов объектов с учетом видов и групп видов земель, а также групп почв по степени гидроморфизма: 1) водные объекты; 2) земли под болотами; 3) лесные земли и земли под древесно-кустарниковой растительностью на автоморфных и полугидроморфных почвах; 4) лесные земли и земли под древесно-кустарниковой растительностью на гидроморфных почвах; 5) луговые земли на автоморфных и полугидроморфных почвах; 6) населенные пункты, коммуникации, дороги; 7) пахотные земли на автоморфных и полугидроморфных почвах; 8) сельскохозяйственные земли на гидроморфных почвах. При автоматизированной обработке космического снимка «Sentinel-2» с более высоким разрешением были выявлены десять классов объектов. К восьми классам объектов, названия которых идентичны названиям классов, определенных для космических снимков «Landsat», были добавлены два класса объектов: 1) лесные земли и земли под древесно-кустарниковой растительностью на овражно-балочной сети; 2) пахотные земли на эродированных почвах. Более детальное распознавание технологически трудноосуществимо, поэтому в рамках этой классификации проводилось автоматизированное дешифрирование классов земельного покрытия, обобщенных до уровня видов и групп видов земель, а также групп почв по степени гидроморфизма. Выделение автоморфных и полугидроморфных почв по отдельности в рамках пахотных земель не выполнялось, так как с учетом различных типов севооборотов (полевых, кормовых, почвозащитных и т. д.) на исследуемой территории дешифровочные признаки этих почв проблематично формализовать при автоматизированном дешифрировании. Внутри классов земельного покрытия могут быть заметны спектральные различия, что в наибольшей степени свойственно лесным землям и землям под древесно-кустарниковой растительностью на автоморфных и полугидроморфных почвах, пахотным землям на автоморфных и полугидроморфных почвах. При формировании обучающей выборки необходимо создавать большее количество классов эталонов по сравнению с числом классов земельного покрытия.

Минимальные значения вертикального расчленения рельефа ($0-4 \text{ м/км}^2$) характерны в основном для северо-восточной части Новогрудского и Кореличского районов в окрестностях долины р. Неман и нижнего течения р. Сервечи, а максимальные значения ($50,1-68,5 \text{ м/км}^2$) – для небольших участков к западу от р. Сервечи на восточных склонах Новогрудской возвышенности (в южной части Кореличского района и к западу от г. Кореличи) и северо-восточнее г. Новогрудка (рис. 1).

При кластеризации изображений космических снимков для выделения классов земельного покрытия учитывался не только тон изображения, но и косвенные дешифровочные признаки (информация о рельефе и вегетационном индексе NDVI), что позволило лучше отграничить классы объектов на гидроморфных почвах от других классов почв по степени увлажнения. Для выявления участков под пахотными землями были математически формализованы величины вегетационного индекса NDVI за май и сентябрь, а затем с помощью инструмента статистика по ячейкам рассчитано его общее минимальное значение для космических снимков «Landsat» и «Sentinel-2». Эти минимальные значения использовались для уточнения и других классов объектов. Инструмент зональная статистика в таблицу применялся для вычисления средних, минимальных и максимальных величин вегетационного индекса NDVI, уклона и вертикального расчленения рельефа для каждого контура векторных результатов классификации космических снимков. Вертикальное расчленение рельефа лесных земель и земель под древесно-кустарниковой растительностью на гидроморфных почвах в основном не превышает $4-8 \text{ м/км}^2$,

³Лурье И. К. Геоинформационное картографирование: методы геоинформатики и цифровой обработки космических снимков : учебник. М. : КДУ, 2008. 424 с.

поэтому при значении данного показателя более этой величины их можно определить как лесные земли и земли под древесно-кустарниковой растительностью на автоморфных и полугидроморфных почвах. Обычно значения вегетационного индекса NDVI за май и сентябрь для пахотных земель составляют преимущественно менее 0,32–0,35, а при более высоких величинах этого показателя контуры могут быть отнесены к луговым землям на автоморфных и полугидроморфных почвах. Земли под болотами идентифицируются по усредненным значениям уклона до $0,6^\circ$, тогда как сходные по морфометрии контуры с более высокими значениями уклона определяются как луговые земли.

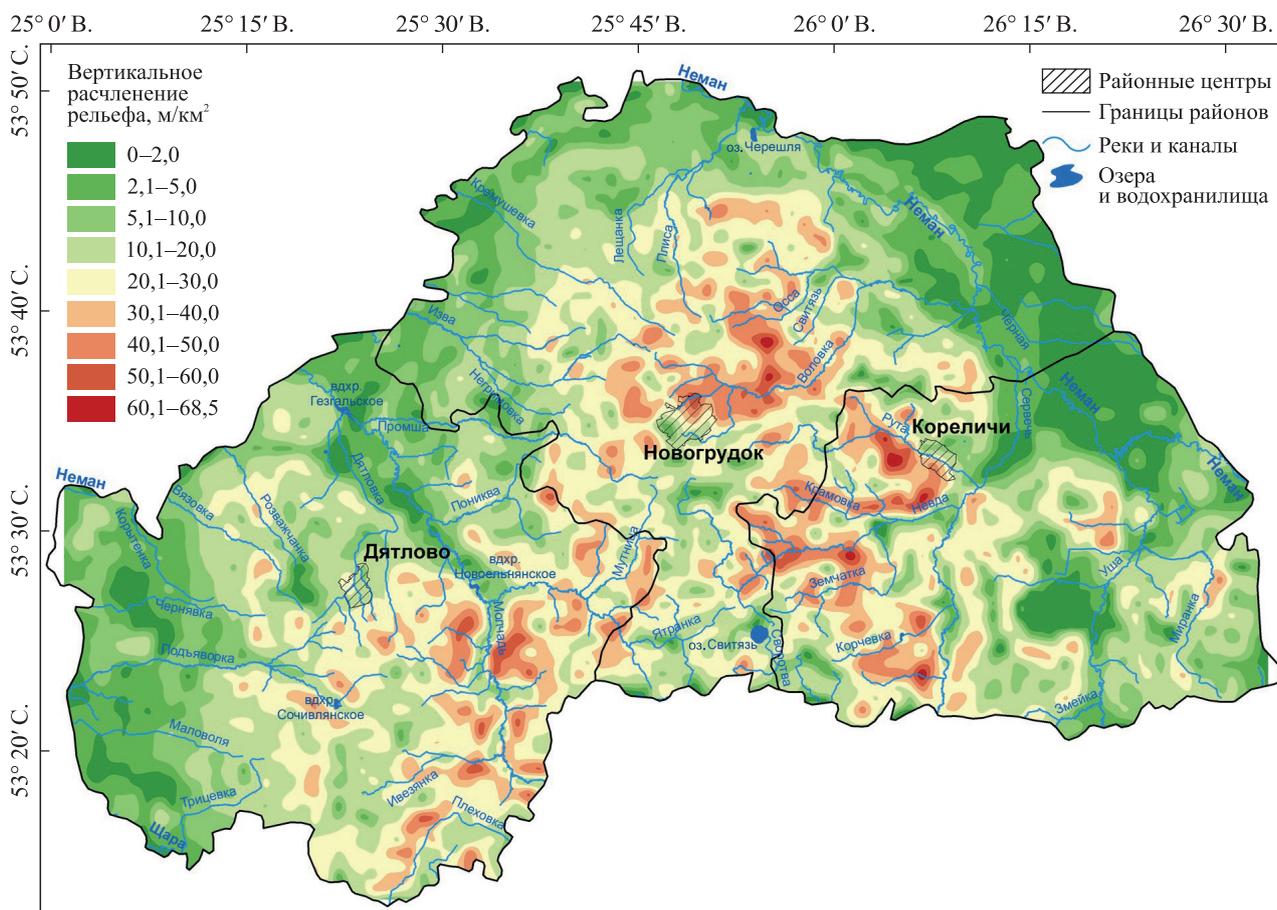


Рис. 1. Картограмма вертикального расчленения рельефа Новогрудской возвышенности

Fig. 1. Map-scheme of the vertical dissection of the relief of the Novogrudok Upland

Сельскохозяйственные земли на гидроморфных почвах при уклоне более $0,4–0,5^\circ$ классифицированы как луговые. Луговые земли при уклоне менее $0,07^\circ$ и вертикальном расчленении рельефа менее 2 м/км^2 отнесены к сельскохозяйственным землям на гидроморфных почвах, земли под болотами с вертикальным расчленением рельефа более 7 м/км^2 и средним значением вегетационного индекса NDVI свыше 0,35 – к луговым землям на автоморфных и полугидроморфных почвах. Луговые земли на автоморфных и полугидроморфных почвах при уклоне более $1,0–1,5^\circ$ и значении вегетационного индекса NDVI менее 0,24–0,26 (по данным космических снимков «Landsat») с большой долей вероятности могут быть идентифицированы как пахотные земли.

Новогрудский и Дятловский районы имеют более высокий удельный вес лесных земель на автоморфных и полугидроморфных почвах по сравнению с пахотными землями на автоморфных и полугидроморфных почвах, а для Кореличского района характерно преобладание пахотных земель. Изучаемая территория отличается низкой долей водных объектов, которые занимают лишь 0,42–0,49 % от общей площади возвышенности, и самыми значимыми из них являются озера Свитязь, Черешля, водохранилища Новоельнянское и Гезгалское. Данные карт *OpenStreetMap* дополнительно использовались для выделения сельских населенных пунктов. С 1986 по 2009 г. площадь населенных пунктов немного уменьшилась (с 8,2 до 7,5 %), а к 2019 г. сокращение площади этой группы земель почти прекратилось, что обусловлено расширением застройки в таких городах, как Новогрудок, Кореличи и Дятлово (рис. 2).

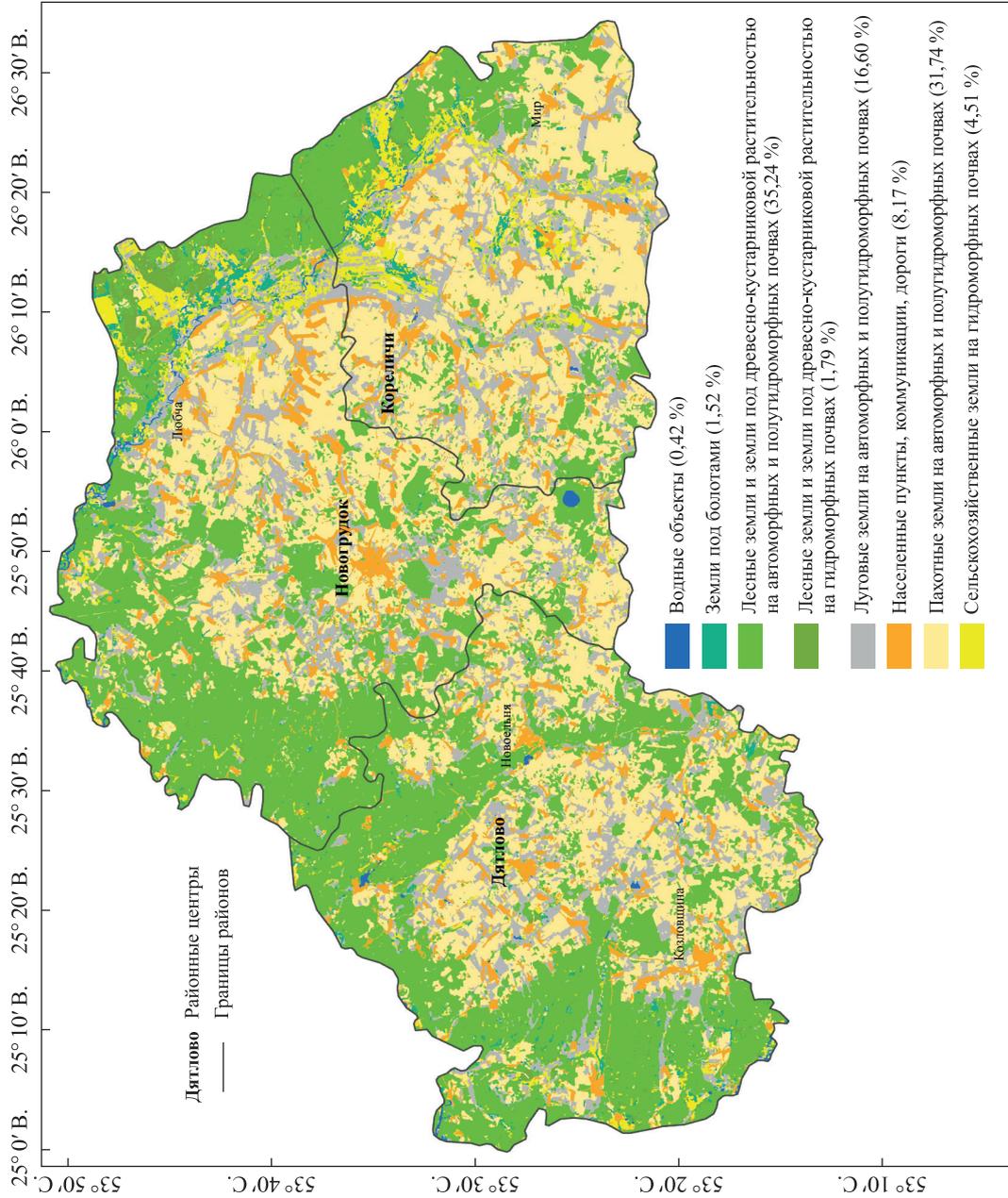


Рис. 2. Структура земельного покрытия Новоградской возвышенности в 1986 г. на основе космического снимка «Landsat-5». В скобках указана доля земельного покрытия от общей площади Новоградской возвышенности

Fig. 2. The structure of the land cover of the Novogradok Upland in 1986 based on «Landsat-5» satellite image. The share of land cover class from the total area of the Novogradok Upland is indicated in brackets

Количество пахотных земель на автоморфных и полугидроморфных почвах увеличилось с 31,7 % в 1986 г. до 32,9 % в 2000 г. (табл. 1), но к 2009 г. произошло сокращение площади пахотных земель, что определяется преимущественно переводом низкопродуктивных, по результатам кадастровой оценки, пахотных земель в состав луговых. К 2019 г. площадь пахотных земель снова выросла (с 30,8 % в 2009 г. до 32,9 % в 2019 г.), вероятно, за счет отнесения при классификации части улучшенных луговых земель, которые подверглись в этот период перезалужению, к пахотным.

Таблица 1

Площадь классов земельного покрытия административных районов в 1986 и 2000 гг. на основе космических снимков «Landsat-5» и «Landsat-7» соответственно, га

Table 1

Area of land cover classes for key districts in 1986 and 2000 based on «Landsat-5» and «Landsat-7» satellite images, respectively, ha

Класс земельного покрытия	Дятловский район		Кореличский район		Новогрудский район	
	1986 г.	2000 г.	1986 г.	2000 г.	1986 г.	2000 г.
Водные объекты	495,03	522,80	289,77	371,17	972,81	952,40
Земли под болотами	1795,98	2284,44	1887,57	3046,52	2770,31	3789,85
Лесные земли и земли под древесно-кустарниковой растительностью на автоморфных и полугидроморфных почвах	66 839,08	63 745,06	20 441,72	20 494,50	62 021,20	60 618,67
Лесные земли и земли под древесно-кустарниковой растительностью на гидроморфных почвах	1675,55	2702,85	1193,08	635,79	4730,42	4048,93
Луговые земли на автоморфных и полугидроморфных почвах	23 038,35	22 066,17	21 089,32	22 540,42	26 200,66	24 325,04
Населенные пункты, коммуникации, дороги	11 805,46	11 409,54	9245,26	9258,89	13 593,51	13 251,68
Пахотные земли на автоморфных и полугидроморфных почвах	43 733,16	46 773,36	44 280,42	42 809,79	46 489,14	49 711,40
Сельскохозяйственные земли на гидроморфных почвах	3091,60	2963,63	8033,70	7296,58	7975,08	8046,73

Земли под пашней и улучшенными лугами на гидроморфных почвах сконцентрированы преимущественно в северной и западной перифериях возвышенности, а также в нижнем течении р. Сервечи, и удельный вес данного класса объектов сократился с 4,5 % в 1986 г. до 3,3 % в 2019 г., что обусловлено снижением эффективности использования в сельском хозяйстве осушенных торфяно-болотных почв из-за уменьшения мощности торфяного горизонта (рис. 3).

В северной части возвышенности (Новогрудский район) зафиксировано большинство площадей луговых земель на автоморфных и полугидроморфных почвах, они приурочены к речной долине р. Неман. В ее юго-западной части (Дятловский район) выявлена устойчивая тенденция уменьшения площади луговых земель (с 23,0 тыс. га в 1986 г. до 17,9 тыс. га в 2019 г.), так как часть улучшенных луговых земель с более высоким баллом кадастровой оценки были переведены в состав пахотных, а также произошло зарастание малопродуктивных небольших участков естественных луговых земель древесно-кустарниковой растительностью. Около 1,5–2,1 % возвышенности занимают земли под болотами, что обусловлено довольно высоким гипсометрическим уровнем территории, в основном они представлены небольшими участками в поймах рек (см. рис. 3).

Лесные земли и земли под древесно-кустарниковой растительностью на автоморфных и полугидроморфных почвах широко распространены на территории Новогрудской возвышенности, но при этом заметна дифференциация между районами: в Кореличском районе они занимают около 21,6 % от общей площади, а в Дятловском районе – 47,5 % (рис. 4). В течение всего исследуемого периода этот класс объектов имел тенденцию к росту (табл. 2).

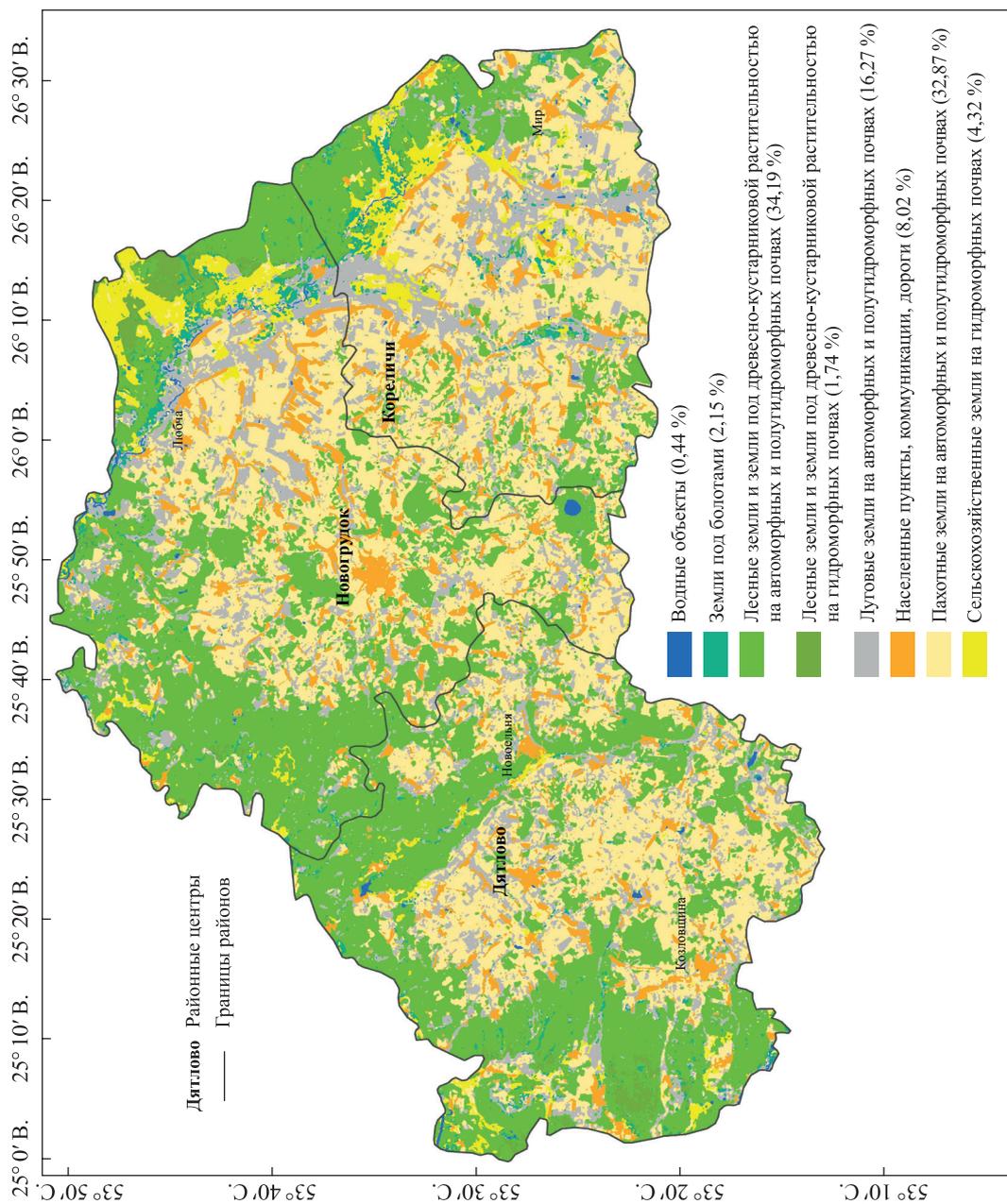


Рис. 3. Структура земельного покрытия Новогрудской возвышенности в 2000 г. на основе космического снимка «Landsat-7».

В скобках указана доля класса земельного покрытия от общей площади Новогрудской возвышенности

Fig. 3. The structure of the land cover of the Novogrudok Upland in 2000 based on «Landsat-7» satellite image.

The share of land cover class from the total area of the Novogrudok Upland is indicated in brackets

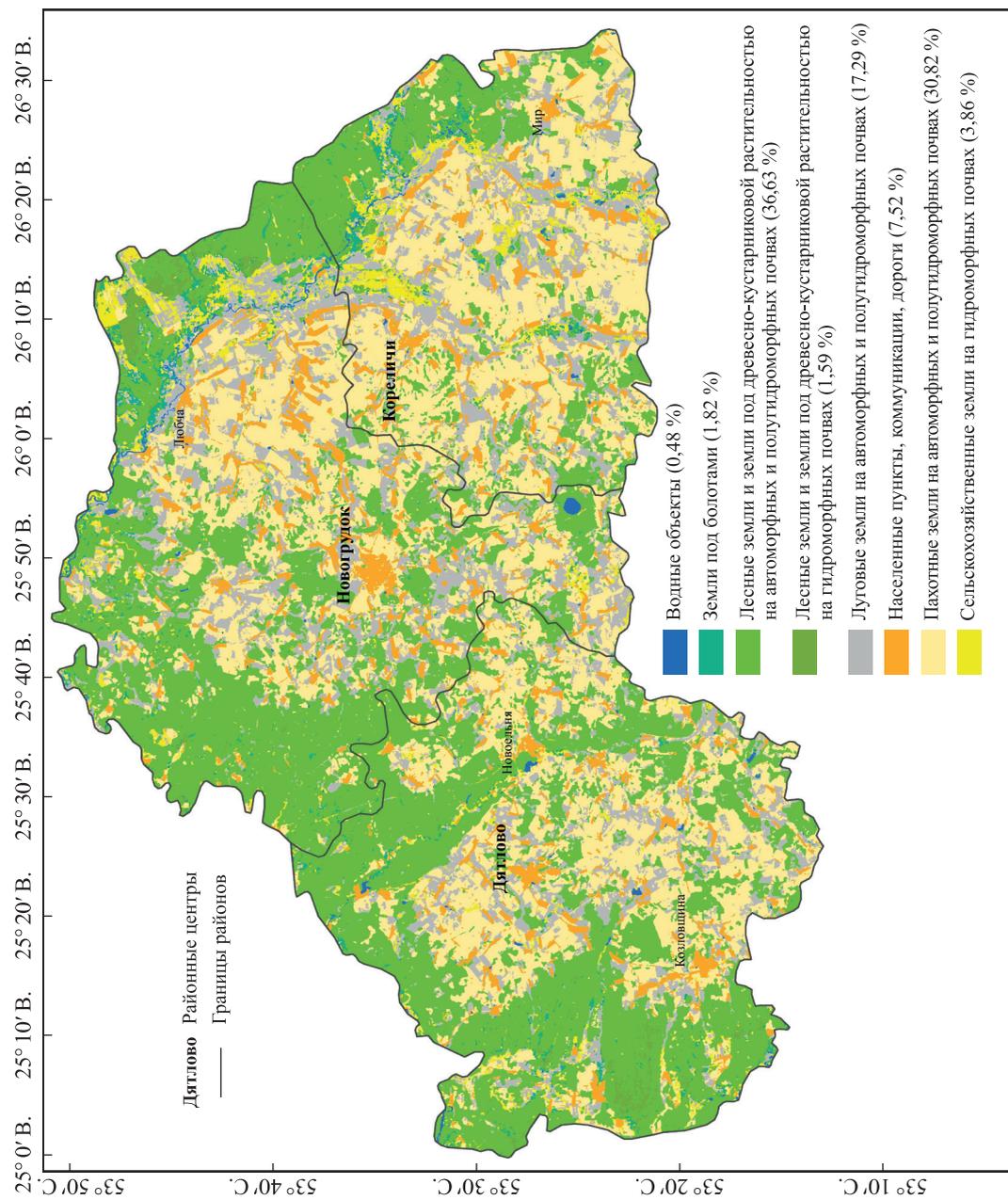


Рис. 4. Структура земельного покрытия Новоградской возвышенности в 2009 г. на основе космического снимка «Landsat-5».

В скобках указана доля земельного покрытия от общей площади Новоградской возвышенности

Fig. 4. The structure of the land cover of the Novogradok Upland in 2009 based on «Landsat-5» satellite image.

The share of land cover class from the total area of the Novogradok Upland is indicated in brackets

Таблица 2

Площадь классов земельного покрытия административных районов в 2009 и 2019 гг.
на основе космических снимков «Landsat-5» и «Sentinel-2» соответственно, га

Table 2

Area of land cover classes for key districts in 2009 and 2019
based on «Landsat-5» and «Sentinel-2» satellite images, respectively, ha

Класс земельного покрытия	Дятловский район		Кореличский район		Новогрудский район	
	2009 г.	2019 г.	2009 г.	2019 г.	2009 г.	2019 г.
Водные объекты	544,61	326,71	451,34	164,34	1016,10	715,08
Земли под болотами	1769,77	1215,44	2272,14	1436,04	3659,05	2478,29
Лесные земли и земли под древесно-кустарниковой растительностью на автоморфных и полугидроморфных почвах	69 789,23	72 494,73	21 849,26	22 946,68	63 546,49	66 133,29
Лесные земли и земли под древесно-кустарниковой растительностью на гидроморфных почвах	2287,50	3118,84	722,94	1483,91	3716,63	4693,62
Лесные земли и земли под древесно-кустарниковой растительностью на овражно-балочной сети*	–	198,85	–	1001,56	–	642,95
Луговые земли на автоморфных и полугидроморфных почвах	20 203,84	17 876,01	21 688,25	17 652,68	31 371,40	24 270,14
Населенные пункты, коммуникации, дороги	10 126,55	9261,90	9144,97	9096,94	12 585,76	13 209,84
Пахотные земли на автоморфных и полугидроморфных почвах*	44 368,25	40 123,73	44 176,85	42 011,65	42 033,72	40 491,42
Пахотные земли на эродированных почвах	–	4493,06	–	5541,71	–	6579,03
Сельскохозяйственные земли на гидроморфных почвах	3387,32	3395,43	6156,93	5142,09	6824,44	5565,62

Примечание. Знаком * отмечены классы земельного покрытия, выделенные только на основе космического снимка «Sentinel-2».

При выполнении автоматизированного дешифрирования мозаики космических снимков «Sentinel-2» с применением данных о морфометрии рельефа и вегетационного индекса NDVI дополнительно были определены два класса объектов. Так, пахотные земли на эродированных почвах отличаются заметным уклоном (обычно более 2°), существенным вертикальным расчленением рельефа (более 25 м/км²) и значением вегетационного индекса NDVI менее 0,6. Данный класс объектов составляет около 3,9 % от общей площади Новогрудской возвышенности и заметно реже встречается на ее западных склонах, чем на восточных. Еще большими значениями вертикального расчленения рельефа (более 33 м/км²) и среднего уклона (более 2,7°) характеризуются лесные земли и земли под древесно-кустарниковой растительностью на овражно-балочной сети (рис. 5).

Для оценки точности следует конвертировать отредактированные векторные результаты дешифрирования в растровый формат. Матрица ошибок рассчитана в среде ArcGIS (версия 10.7) с использованием инструмента вычислить матрицу несоответствий. Оценка точности результата автоматизированного дешифрирования данных дистанционного зондирования Земли за 2019 г. проведена на основе 225 произвольно выбранных пунктов с применением сведений геопортала земельно-информационной системы⁴ и базы данных «Торфяники Беларуси»⁵, а также районных почвенных карт (см. рис. 5).

Общая точность составила 80,4 %, а к-коэффициент Коэна – 0,756. Наибольшие значения пользовательской и производственной точности (80 % и более) характерны для водных объектов, лесных земель и земель под древесно-кустарниковой растительностью на автоморфных и полугидроморфных почвах, пахотных земель на автоморфных и полугидроморфных почвах, а также для населенных пунктов, коммуникаций и дорог (табл. 3).

⁴Открытые данные [Электронный ресурс] // Геопортал земельно-информационной системы. URL: <https://gismap.by/next/> (дата обращения: 28.06.2023).

⁵База данных «Торфяники Беларуси» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.peatlands.by/> (дата обращения: 29.06.2023).

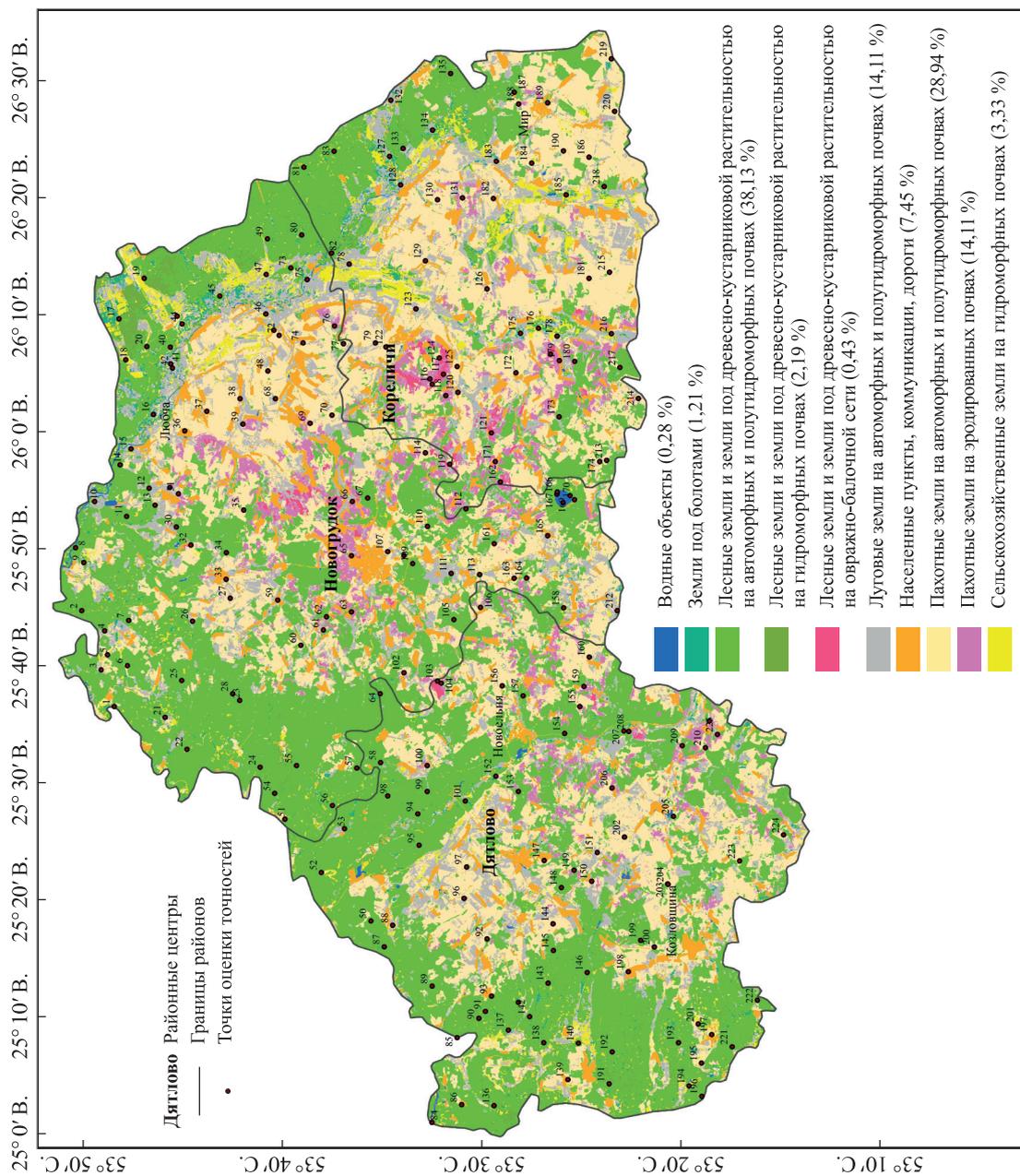


Рис. 5. Структура земельного покрытия Новоградской возвышенности в 2019 г. на основе мозаики космических снимков «Sentinel-2». В скобках указана доля класса земельного покрытия от общей площади Новоградской возвышенности

Fig. 5. The structure of the land cover of the Novogradok Upland in 2019 based on a mosaic of «Sentinel-2» satellite images. The share of land cover class from the total area of the Novogradok Upland is indicated in brackets

Таблица 3

Матрица ошибок результата автоматизированного дешифрирования мозаики космических снимков «Sentinel-2» в 2019 г.

Table 3

Error matrix of the result of automated interpretation of a mosaic of «Sentinel-2» satellite images in 2019

Показатели	Показатели												
	Класс 1	Класс 2	Класс 3	Класс 4	Класс 5	Класс 6	Класс 7	Класс 8	Класс 9	Класс 10	Суммарное значение	Пользовательская точность	к-Коэффициент Коэна
Класс 1	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	1	0
Класс 2	0	5	1	1	0	0	0	0	0	2	9	0,556	0
Класс 3	0	1	67	2	1	0	0	0	0	1	72	0,931	0
Класс 4	0	1	3	6	0	0	0	0	0	0	10	0,600	0
Класс 5	0	0	3	0	6	0	0	0	0	0	9	0,667	0
Класс 6	0	0	2	1	0	16	0	6	1	1	27	0,593	0
Класс 7	0	0	1	0	0	0	12	1	0	0	14	0,857	0
Класс 8	0	0	1	0	0	6	0	44	2	1	54	0,815	0
Класс 9	0	0	0	0	0	0	0	3	7	0	10	0,700	0
Класс 10	0	0	2	0	0	0	0	0	0	8	10	0,800	0
Суммарное значение	10	7	80	10	7	22	12	54	10	13	225	0	0
Производственная точность	1	0,714	0,838	0,600	0,857	0,727	1	0,815	0,700	0,615	0	0,804	0
к-Коэффициент Коэна	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,756

Примечание. Класс 1 – водные объекты; класс 2 – земли под болотами; класс 3 – лесные земли и земли под древесно-кустарниковой растительностью на автоморфных и полугидроморфных почвах; класс 4 – лесные земли и земли под древесно-кустарниковой растительностью на гидроморфных почвах; класс 5 – лесные земли и земли под древесно-кустарниковой растительностью на овражно-балочной сети; класс 6 – луговые земли на автоморфных и полугидроморфных почвах; класс 7 – населенные пункты, коммуникации, дороги; класс 8 – пахотные земли на автоморфных и полугидроморфных почвах; класс 9 – пахотные земли на эродированных почвах; класс 10 – сельскохозяйственные земли на гидроморфных почвах.

Следует отметить, что структура классов земельного покрытия заметно отличается в рамках сельсоветов. Достаточно высокий удельный вес населенных пунктов, коммуникаций и дорог характерен для Новоельнянского (42,1 %) и Негневичского (24,5 %) сельсоветов, что в первом случае обусловлено расположением г. п. Новоельня в пределах небольшого по площади сельсовета, а во втором случае – высокой плотностью сельского населения.

Сельскохозяйственная освоенность имеет широкий диапазон значений (от 20,9 % в Петревичском сельсовете до 83,2 % в Турецком сельсовете), что связано с заметными различиями в уровне плодородия почв. Для трех сельсоветов, расположенных в северо-западной части Новогрудской возвышенности, характерен высокий (более 62 %) удельный вес лесных земель и земель под древесно-кустарниковой растительностью. Пахотные земли на автоморфных и полугидроморфных почвах, в том числе эродированных, составляют более 50 % от площади шести сельсоветов (в Воробьевичском сельсовете значение данного показателя достигает 65,6 %). Луговые земли на автоморфных и полугидроморфных почвах в основном занимают порядка 10–20 % от площади сельсоветов, а более высокие значения данного показателя характерны для Щорсовского сельсовета, в пределах которого расположен крупный участок речной долины р. Неман, и четырех сельсоветов Кореличского района с очень высокой сельскохозяйственной освоенностью территории (более 75 %) (рис. 6).

Любчанский сельсовет выделяется наибольшим удельным весом лесных земель и земель под древесно-кустарниковой растительностью на гидроморфных почвах и земель под болотами (9,7 и 4,9 % соответственно) по сравнению с другими сельсоветами, что обусловлено особенностями рельефа. Сельскохозяйственные земли на гидроморфных почвах представлены в основном вдоль речных долин рек Сервечи и Неман, они характеризуются достаточно низким удельным весом (для большей части сельсоветов доля таких земель составляет менее 3 %), и только для четырех сельсоветов данный показатель равняется 8,6–9,4 %.

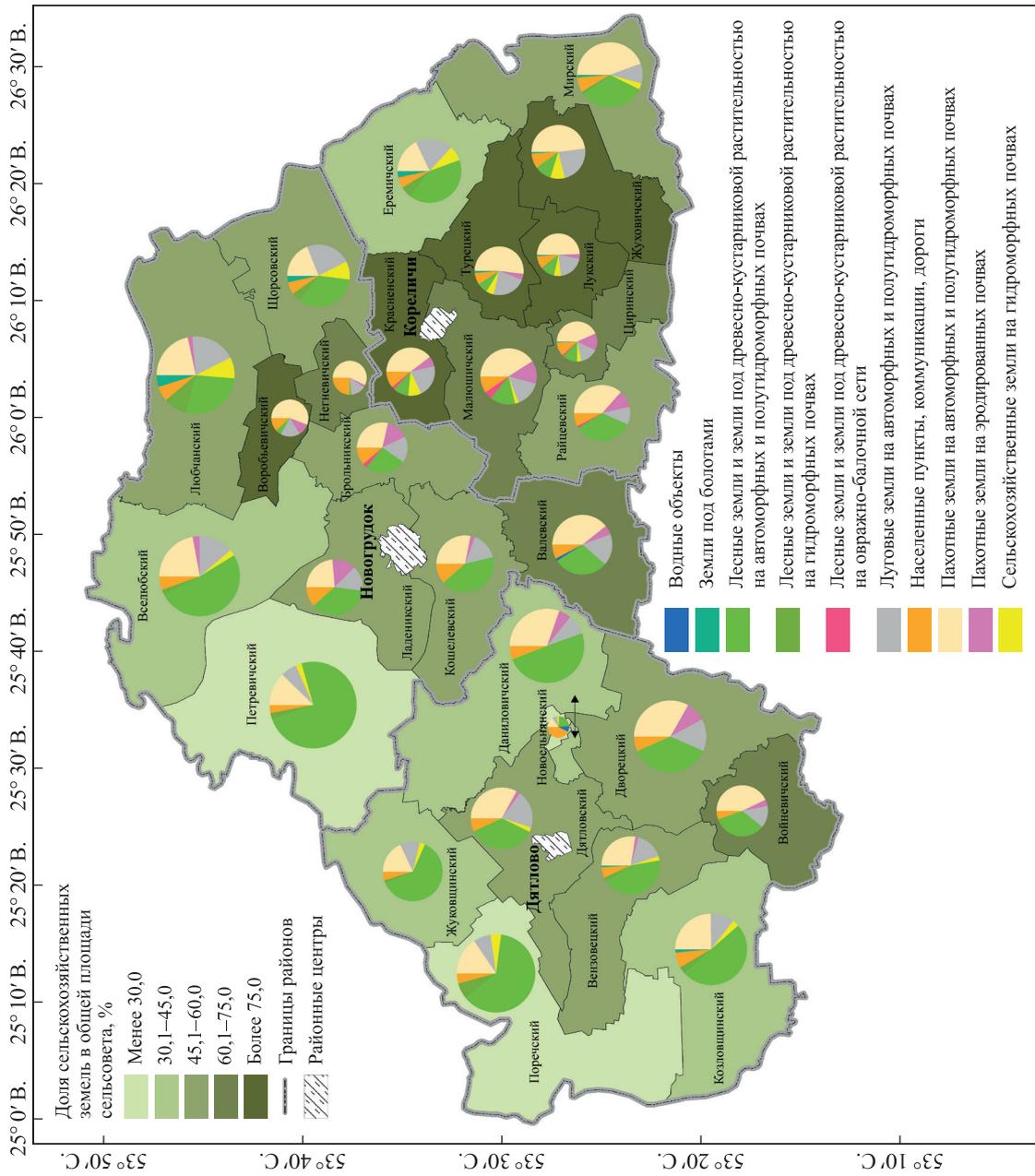


Рис. 6. Картодиаграмма структуры классов земельного покрытия Новогрудкой возвышенности по сельсоветам в 2019 г. на основе космического снимка «Sentinel-2»

Fig. 6. Map-diagram of the land of the selsoviets of the Novogrudok Upland in 2019 based on «Sentinel-2» satellite image

Заключение

Анализ особенностей структуры классов земельного покрытия трех административных районов Новогрудской возвышенности проведен на основе автоматизированного дешифрирования космических снимков в программном комплексе *ENVI* (версия 5.3), применения авторской модели геообработки в программном пакете *ModelBuilder* и различных инструментов в среде *ArcGIS* (версия 10.7). Информация о морфометрических показателях рельефа и вегетационном индексе NDVI может использоваться для повышения общей точности результатов автоматизированного дешифрирования в векторном формате. Показано, что между отдельными административными районами имеются различия, особенно по доле лесных земель и земель под древесно-кустарниковой растительностью. Применение ГИС-технологий заметно ускоряет выполнение расчетов, полученных на основе итоговых результатов дешифрирования в векторном формате. Именно применение указанных технологий позволило выявить и математически формализовать тренды изменений земельного покрытия, например рост доли лесных земель и земель под древесно-кустарниковой растительностью, уменьшение удельного веса сельскохозяйственных земель на гидроморфных почвах, снижение доли луговых земель с 2009 по 2019 г. Использование мозаики космических снимков «Sentinel-2», которая имеет более высокое пространственное разрешение по сравнению с космическими снимками «Landsat» (10 и 30 м соответственно), позволило выделить не только восемь классов земельного покрытия, но и определить участки овражно-балочной сети, а также контуры пахотных земель, подверженных водной эрозии, что имеет важное значение для изучения структуры земельного покрытия с учетом влияния на него рельефа.

Библиографические ссылки

1. Feranec J, Jaffrain G, Soukup T, Hazeu G. Determining changes and flows in European landscapes 1990–2000 using CORINE Land Cover data. *Applied Geography*. 2010;30(1):19–35. DOI: 10.1016/j.apgeog.2009.07.003.
2. Homer C, Dewitz JA, Limin Yang L, Danielson P, Xian G, Coulston JW, et al. Completion of the 2011 National Land Cover Database for the conterminous United States – representing a decade of land cover change information. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 2015;81(5):345–354. DOI: 10.14358/PERS.81.5.345.
3. Polykretis C, Alexakis DD, Grillakis MG, Manoudakis S. Assessment of intra-annual and inter-annual variabilities of soil erosion in Crete Island (Greece) by incorporating the dynamic «Nature» of R- and C-factors in RUSLE modeling. *Remote Sensing*. 2020;12(15):2439. DOI: 10.3390/rs12152439.
4. Sujatha ER, 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;10(11):1608. DOI: 10.3390/w10111608.
5. Phiri D, Simwanda M, Salekin S, Nyirenda VR, Murayama Y, Ranagalage M. Sentinel-2 data for land cover/use mapping: a review. *Remote Sensing*. 2020;12(14):2291. DOI: 10.3390/rs12142291.
6. Rujoiu-Mare M-R, Olariu B, Mihai B-A, Nistor C, Savulescu I. Land cover classification in Romanian Carpathians and Subcarpathians using multi-date Sentinel-2 remote sensing imagery. *European Journal of Remote Sensing*. 2017;50(1):496–508. DOI: 10.1080/22797254.2017.1365570.
7. Hongrui Zheng, Peijun Du, Jike Chen, Junshi Xia, Erzhu Li, Zhigang Xu, et al. Performance evaluation of downscaling Sentinel-2 imagery for land use and land cover classification by spectral-spatial features. *Remote Sensing*. 2017;9(12):1274. DOI: 10.3390/rs9121274.
8. Phan Thanh Noi, Kappas M. Comparison of random forest, k-nearest neighbor, and support vector machine classifiers for land cover classification using Sentinel-2 imagery. *Sensors*. 2018;18(1):18. DOI: 10.3390/s18010018.
9. Phiri D, Morgenroth J. Developments in Landsat land cover classification methods: a review. *Remote Sensing*. 2017;9(9):967. DOI: 10.3390/rs9090967.
10. Hansen MC, Loveland TR. A review of large area monitoring of land cover change using Landsat data. *Remote Sensing of Environment*. 2012;122:66–74. DOI: 10.1016/j.rse.2011.08.024.
11. Яновский АА. Дистанционное разделение осушенных торфяных и деградированных торфяных почв Полесья пороговой обработкой спектральных данных. *Природопользование*. 2017;31:105–112.
12. Ничипорович ЗА, Ракович ВА, Каждан ЕН. Дистанционная диагностика состояния и динамики повторно заболочиваемых выработанных торфяных месторождений. *Природопользование*. 2013;23:94–99.
13. Мышлякоў СГ. Картаграфаванне пасаваў сельскагаспадарчых культур па касмічных здымках для ўнутрыгаспадарчага землеўпарадкавання і аўтарскага нагляду. *Земля Беларусі*. 2012;1:52–56. EDN: WCBUDV.
14. Скачкова АС, Курлович ДМ. Природно-антропогенные ландшафты Белорусской возвышенной провинции: классификация, пространственная структура, районирование. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология*. 2017;1:3–13. EDN: XYRAGD.
15. Ольшевский АВ. Разработка геоинформационной модели автоматизированной классификации многозональных космических снимков. *Земля Беларусі*. 2013;1:36–39. EDN: TRKVHP.
16. 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. EDN: XYMPBV.
17. Phillips LB, Hansen AJ, Flather CH. Evaluating the species energy relationship with the newest measures of ecosystem energy: NDVI versus MODIS primary production. *Remote Sensing of Environment*. 2008;112(12):4381–4392. DOI: 10.1016/j.rse.2008.08.001.
18. Yengoh GT, Dent D, Olsson L, Tengberg AE, Tucker III CJ. *Use of the normalized difference vegetation index (NDVI) to assess land degradation at multiple scales: current status, future trends, and practical considerations*. Cham: Springer; 2015. 80 p. (Springer briefs in environmental science series). DOI: 10.1007/978-3-319-24112-8.

19. Мороз ВА. Оценка эффективности землепользования на основе анализа вегетационных индексов (на примере модельных полигонов Брестского Полесья). *Природные ресурсы*. 2018;2:5–13.
20. Гусев АП. Изменения NDVI как индикатор динамики экологического состояния ландшафтов (на примере восточной части Полесской провинции). *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология*. 2020; 1:101–107. DOI: 10.17308/geo.2020.1/2667.
21. Кислицын ДА. Особенности генерализации результатов автоматизированного дешифрирования в ArcGIS и ENVI. В: Домась АС, Шкуратова НВ, Левковская МВ, редакторы. *Мониторинг и охрана окружающей среды. Материалы Республиканской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов; 22 марта 2023 г.; Брест, Беларусь*. Брест: Брестский государственный университет имени А. С. Пушкина; 2023. с. 78–80.
22. Курлович ДМ. Морфометрический ГИС-анализ рельефа Беларуси. *Земля Беларуси*. 2013;4:42–48. EDN: WCBUNV.
23. Клебанович НВ, Кислицын ДА. Анализ особенностей почвенно-растительного покрова на основе данных дистанционного зондирования (на примере ключевых районов Брестского Полесья). *Вестник Брэсцкага ўніверсітэта. Серыя 5, Біялогія. Навукі аб Зямлі*. 2022;1:59–66.

References

1. Feranec J, Jaffrain G, Soukup T, Hazeu G. Determining changes and flows in European landscapes 1990–2000 using CORINE Land Cover data. *Applied Geography*. 2010;30(1):19–35. DOI: 10.1016/j.apgeog.2009.07.003.
2. Homer C, Dewitz JA, Limin Yang L, Danielson P, Xian G, Coulston JW, et al. Completion of the 2011 National Land Cover Database for the conterminous United States – representing a decade of land cover change information. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 2015;81(5):345–354. DOI: 10.14358/PERS.81.5.345.
3. Polykretis C, Alexakis DD, Grillakis MG, Manoudakis S. Assessment of intra-annual and inter-annual variabilities of soil erosion in Crete Island (Greece) by incorporating the dynamic «Nature» of R- and C-factors in RUSLE modeling. *Remote Sensing*. 2020;12(15):2439. DOI: 10.3390/rs12152439.
4. Sujatha ER, 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;10(11):1608. DOI: 10.3390/w10111608.
5. Phiri D, Simwanda M, Salekin S, Nyirenda VR, Murayama Y, Ranagalage M. Sentinel-2 data for land cover/use mapping: a review. *Remote Sensing*. 2020;12(14):2291. DOI: 10.3390/rs12142291.
6. Rujoiu-Mare M-R, Olariu B, Mihai B-A, Nistor C, Savulescu I. Land cover classification in Romanian Carpathians and Subcarpathians using multi-date Sentinel-2 remote sensing imagery. *European Journal of Remote Sensing*. 2017;50(1):496–508. DOI: 10.1080/22797254.2017.1365570.
7. Hongrui Zheng, Peijun Du, Jike Chen, Junshi Xia, Erzhu Li, Zhigang Xu, et al. Performance evaluation of downscaling Sentinel-2 imagery for land use and land cover classification by spectral-spatial features. *Remote Sensing*. 2017;9(12):1274. DOI: 10.3390/rs9121274.
8. Phan Thanh Noi, Kappas M. Comparison of random forest, k-nearest neighbor, and support vector machine classifiers for land cover classification using Sentinel-2 imagery. *Sensors*. 2018;18(1):18. DOI: 10.3390/s18010018.
9. Phiri D, Morgenroth J. Developments in Landsat land cover classification methods: a review. *Remote Sensing*. 2017;9(9):967. DOI: 10.3390/rs9090967.
10. Hansen MC, Loveland TR. A review of large area monitoring of land cover change using Landsat data. *Remote Sensing of Environment*. 2012;122:66–74. DOI: 10.1016/j.rse.2011.08.024.
11. Yanovskiy AA. The remote separation of drained peat and the degraded peat soils of Polesia by spectral reflectance thresholding. *Prirodopol'zovanie*. 2017;31:105–112. Russian.
12. Nichiporovich ZA, Rakovich VA, Kazhdan EN. Remote diagnostics of a condition and dynamics of rebogged cutover peat deposits. *Prirodopol'zovanie*. 2013;23:94–99. Russian.
13. Myshliakov SG. Mapping of crops using satellite images for land management and designer's supervision. *Zemlya Belarusi*. 2012;1:52–56. Belarusian. EDN: WCBUDV.
14. Skachkova AS, Kurlovich DM. Natural-anthropogenic landscapes of Belarusian elevated province: classification, spatial structure, zoning. *Journal of Belarusian State University. Geography. Geology*. 2017;1:3–13. Russian. EDN: XYPAGD.
15. Olshevsky AV. GIS model of the automated classification of multispectral satellite images. *Zemlya Belarusi*. 2013;1:36–39. Russian. EDN: TRKVHP.
16. 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. EDN: XYMPBB.
17. Phillips LB, Hansen AJ, Flather CH. Evaluating the species energy relationship with the newest measures of ecosystem energy: NDVI versus MODIS primary production. *Remote Sensing of Environment*. 2008;112(12):4381–4392. DOI: 10.1016/j.rse.2008.08.001.
18. Yengoh GT, Dent D, Olsson L, Tengberg AE, Tucker III CJ. *Use of the normalized difference vegetation index (NDVI) to assess land degradation at multiple scales: current status, future trends, and practical considerations*. Cham: Springer; 2015. 80 p. (Springer briefs in environmental science series). DOI: 10.1007/978-3-319-24112-8.
19. Maroz VA. Valuation of the effectiveness of land use based on the analysis of vegetation indices (on the example of Brest Polesye's model polygons). *Natural Resources*. 2018;2:5–13. Russian.
20. Gusev AP. NDVI changes as an indicator of the dynamics of the ecological state of landscapes (on the example of the Eastern Part of the Polesie Province). *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology*. 2020;1:101–107. Russian. DOI: 10.17308/geo.2020.1/2667.
21. Kislitsyn DA. [Features of generalization of results of automated interpretation in ArcGIS and ENVI]. In: Domas' AS, Shkuratova NV, Levkovskaya MV, editors. *Monitoring i okhrana okruzhayushchei sredy. Materialy Respublikanskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov, magistrantov, aspirantov; 22 marta 2023 g.; Brest, Belarus* [Monitoring and environmental protection. Proceedings of the Republican scientific and practical conference of students, undergraduates, postgraduate students; 2023 March 22; Brest, Belarus]. Brest: Brest State A. S. Pushkin University; 2023. p. 78–80. Russian.
22. Kurlovich DM. Morphometric GIS-analysis of landforms of Belarus. *Zemlya Belarusi*. 2013;4:42–48. Russian. EDN: WCBUNV.
23. Klebanovich NV, Kislitsyn DA. Analysis of soil and vegetation cover features on the remote sensing data (by the example of the Brest Polesye's key districts). *Vesnik of Brest University. Series 5, Biology. Sciences about Earth*. 2022;1:59–66. Russian.