

УДК 911.6:504.0621(1.09)

АГРОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ТИПОЛОГИЯ АГРОЛАНДШАФТОВ БЕЛАРУСИ

А. А. САЗОНОВ¹⁾

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

Аннотация. С использованием принципов геоинформационного моделирования и баз геоданных, методов компонентного и кластерного анализа проведена группировка агроландшафтов Беларуси по агроклиматическим, почвенно-эрозионным, почвенно-экологическим и почвенно-структурным условиям. Выделены по четыре кластера агроландшафтов схожего агроклиматического, почвенно-эрозионного, почвенно-структурного и агрохозяйственного состояния, шесть кластеров агроландшафтов подобного почвенно-экологического состояния и три кластера агроландшафтов одинакового почвенно-радиологического состояния. Впервые составлена фасетная схема классификации агроландшафтов Беларуси, которая позволяет охарактеризовать природно-антропогенные и антропогенно-техногенные условия их формирования и функционирования. На природно-антропогенном уровне выделены 169 типов агроландшафтов, с учетом антропогенно-техногенного уровня – 390 типов. Предложенная схема обладает рядом преимуществ, в частности гибкостью и масштабируемостью: для каждого уровня классификации можно разработать новые классы без ее перестройки, что особенно важно в условиях динамично изменяющегося климата и активного использования земель.

Ключевые слова: ГИС-технологии; классификация; агроландшафт; кластерный анализ; агроэкология; моделирование; база геоданных.

Образец цитирования:

Сазонов АА. Агроэкологическая типология агроландшафтов Беларуси. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология.* 2025;2:3–15.
EDN: SWFUAE

For citation:

Sazonov AA. Agroecological typology of Belarusian agrolandscapes. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology.* 2025;2:3–15. Russian.
EDN: SWFUAE

Автор:

Алексей Александрович Сазонов – старший преподаватель кафедры почвоведения и геоинформационных систем факультета географии и геоинформатики.

Author:

Aliaksei A. Sazonov, senior lecturer at the department of soil science and geographic information system, faculty of geography and geoinformatics.
alexey.szonov@gmail.com

AGROECOLOGICAL TYPOLOGY OF BELARUSIAN AGROLANDSCAPES

A. A. SAZONOV^a

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

Abstract. Using geoinformation modelling principles and geodatabases, as well as component and cluster analysis methods, Belarusian agrolandscapes were grouped by agroclimatic, soil-erosion, soil-ecological, and soil-structural conditions. Four clusters of agrolandscapes with similar agroclimatic, soil-erosion, soil-structural, and agroeconomic conditions were identified, along with six clusters of similar soil-ecological conditions and three clusters of similar soil-radiological conditions. A faceted classification scheme for Belarusian agrolandscapes was developed for the first time, which allows characterising the natural-anthropogenic and anthropogenic-technogenic conditions of their formation and functioning. At the natural-anthropogenic level, 169 types of agrolandscapes are distinguished, while 390 types are identified when taking into account the anthropogenic-technogenic level. The proposed scheme has a number of advantages, in particular flexibility and scalability: for each classification level, new classes can be developed without restructuring it, which is especially important in the context of a dynamically changing climate and active land use.

Keywords: GIS technologies; classification; agrolandscape; cluster analysis; agroecology; modelling; geodatabase.

Введение

Рациональное использование земельных ресурсов – актуальная и сложная проблема. Устойчивое развитие сельского хозяйства зависит от особенностей систем земледелия и качества информационного обеспечения сельскохозяйственного производства.

Сегодня в науке нет единого определения природно-антропогенных комплексов, формирующихся и изменяющихся в результате сельскохозяйственной деятельности. Комплексы, функционирование которых направлено на стабильное получение сельскохозяйственной продукции, могут толковаться как агрогеосистемы, агроландшафты и агроэкосистемы, при этом значение этих терминов остается неоднозначным и обуславливается целями и направлениями исследований [1].

Ю. Г. Саушкин рассматривал сельскохозяйственные ландшафты как часть антропогенных (культурных) ландшафтов. В особый класс антропогенных комплексов их выделил Ф. Н. Мильков [2]. Концепцию агроландшафтов предложил В. А. Николаев [3]. В географии сельского хозяйства агроландшафты представляют собой мозаику экотопов, возникшую в результате сознательной деятельности человека [4].

Такое свойство агроландшафтов, как полифункциональность [5, р. 3–21], объясняется тем, что они не только обеспечивают производство сельскохозяйственной продукции, но и оказывают экосистемные услуги, а также отражают историю и культуру сельских жителей, поскольку являются частью культурных ландшафтов.

Агроландшафты можно рассматривать как безразмерные образования. В пространственном отношении они способны занимать разные по площади территории (от отдельного поля до всех сельскохозяйственных земель административной единицы), в генетико-морфологическом плане – простираются от подурочища до ландшафта [3; 6]. В общем смысле под агроландшафтом понимается любой участок, вовлеченный в сельскохозяйственный оборот.

Структура агроландшафтов целостна, но внутренне неоднородна. Она представляет собой природно-сельскохозяйственную геосистему, которая включает не только обрабатываемые земли, но и земли иного назначения [3]. В структуре агроландшафтов выделяются территориально выраженные массивы – продукционные ядра, при этом природный каркас выступает как компенсирующее пространство [7].

На несоответствие границ природного и сельскохозяйственного ландшафтов указывает О. Н. Трапезникова [8], которая рассматривает элементарный агроландшафт как совокупность агроэкосистем и часть агрогеосистемы более высокого порядка [9]. Определение элементарной агрогеосистемы А. М. Носова [10] видится наиболее удачным и подходящим для целей настоящего исследования.

Любая классификация базируется на выделении из исходного множества объектов гомогенных подмножеств на основе заданных критериев. В географии классификации привязываются к объектам, находящимся на земной поверхности. При этом используются два подхода – иерархический и фасетный (многоаспектный)¹. К последнему относится классификация почв Беларуси по номенклатурному списку².

¹Чертко Н. К., Карпиченко А. А. Математические методы в географии : учеб. пособие. Минск : Изд. центр БГУ, 2008. 202 с.

²Почвенное обследование земель и создание, обновление почвенных карт. Порядок и технология работ : ТКП 651-2020 (33520) : утв. Гос. ком. по имуществу Респ. Беларусь 09.01.2020 : ввод. в действие с 01.07.2020. Минск : Госкомимущество, 2020. IV, 66 с. : табл., цв. ил.

Вопрос классификации ландшафтов достаточно проработан. В этом отношении широко применяются региональный и типологический подходы³. С позиций регионального подхода ландшафт – конкретная территориальная единица, с позиций типологического подхода – относительно однородная территория, класс типов местности [11].

Таксономическую систему агроландшафтов впервые представил Ф. Н. Мильков [2]. В ней, однако, не учитывается природная специфика агроландшафтов и выделяются границы не геосистем, а функциональных зон [3]. Для Беларуси детальная типологическая характеристика агроландшафтов разработана Г. И. Марцинкевич, схема функциональной типологии – В. М. Яцухно и Ю. Э. Мандером [7].

Как частный случай классификации можно рассматривать агроэкологическую типологию земель – метод, служащий для систематизации множества объектов, условий и факторов и их последующего сопоставления с требованиями, предъявляемыми к выращиванию сельскохозяйственных культур [12]. Типология и классификация земель осуществляются в двух аспектах. Агроэкологическая типология направлена на разработку агротехнологий, ландшафтно-экологическая классификация земель – на ранжирование параметров оценки элементарных ареалов агроландшафта [10]. Элементарные ареалы агроландшафта могут быть ограничены элементарным почвенным ареалом или почвенными комбинациями [13], включать одну или несколько фаций [6] либо располагаться в границах элементарных участков, находящихся в пределах рабочего участка.

Сегодня применение геоинформационного моделирования в многомерной среде пространства признаков считается общепризнанным подходом [5, р. 23–36] к изучению агроландшафта и его компонентов [5, р. 3–21], что достигается разработкой баз геоданных [14], которые должны обеспечивать моделирование вертикальной, горизонтальной и временной структуры агроландшафта⁴ [15]. В качестве операционно-территориальной единицы ГИС-моделирования могут выступать элементарные ареалы агроландшафтов и их структурно-функциональные иерархии, агроэкологические группы и виды земель. Контуры операционно-территориальных единиц указывают на общие свойства ареалов, которые обладают внутренней неоднородностью [16].

Полиструктурность, полифункциональность и мультимасштабность агроландшафтов во времени и пространстве диктуют необходимость сосредоточиться не на моделировании процессов, а на использовании ландшафтных индикаторов (признаков). Их набор ограничивается только доступностью данных и может включать большое количество условий и факторов [6; 17–20]. Основная сложность при этом заключается не столько в поиске новых показателей, сколько в определении наиболее репрезентативных из них [5, р. 23–36].

Цель исследования – классификация агроландшафтов Беларуси по условиям их формирования и функционирования с учетом объективных и статистически обоснованных критериев. Поставлены следующие задачи: получение базы геоданных с информацией, комплексно характеризующей природные и антропогенные условия формирования и развития агроландшафтов, снижение размерности данных и отбор наиболее значимых факторов, а также разработка классификационной схемы агроландшафтов Беларуси.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования выступают агроландшафты Беларуси – земли, находящиеся в пределах сельскохозяйственных предприятий. Они могут рассматриваться как агроландшафты по двум причинам. Во-первых, сельскохозяйственные предприятия, как хозяйствующие субъекты, представляют собой устойчивую административную рамку природно-территориальных комплексов с четкими границами. В них входят не только сельскохозяйственные (продукционные ядра), но и несельскохозяйственные земли, интегрированные в агроландшафтные комплексы, которым присущи пространственная целостность и связность: отдельные рабочие участки характеризуются территориальной замкнутостью, образуя сопряженные массивы сельскохозяйственных земель, объединенные инфраструктурной сетью дорог, мелиоративных каналов и производственных центров. Во-вторых, сельскохозяйственные предприятия являются управленческо-функциональными, энергетическими и технологическими природно-хозяйственными формированиями, отличающимися единым подходом к системам земледелия, координированным использованием рабочей силы, техники и орудий, постоянным притоком антропогенной энергии.

В настоящей статье сельскохозяйственные предприятия рассматриваются в качестве основных операционно-территориальных единиц. Для исследования выбраны 1316 сельскохозяйственных предприятий площадью более 1400 га. Данное значение соответствует 75-му перцентилю исходной выборки (нижняя граница) ранжированных по площади сельскохозяйственных организаций и крестьянских (фермерских) хозяйств, существовавших в 2021 г., общей площадью 8,8 млн га, или 42 % площади страны.

³Марцинкевич Г. И., Счастная И. И. Ландшафтоведение : учеб. пособие. Минск : ИВЦ Минфина, 2014. 252 с.

⁴Система оценки ресурсного потенциала агроландшафтов / под ред. Н. П. Масютенко. Курск : ВНИИЗиЗПЭ РАСХН, 2012. 67 с.

Исследование состоит из трех этапов (рис. 1). На первом этапе была разработана база геоданных, которая включает 121 признак. Они распределены по четырем блокам атрибутивных данных.

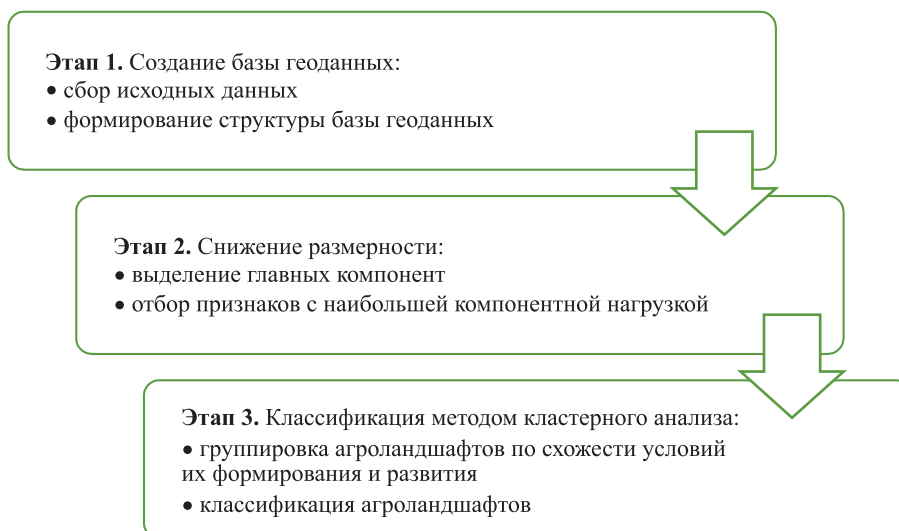


Рис. 1. Этапы исследования

Fig. 1. Research stages

Блок пространственных данных содержит 4 признака. К ним относятся границы основных операционно-территориальных единиц, их наименования, периметр и площадь.

Блок агроклиматических данных включает 17 признаков. С опорой на картографическое издание «Национальный атлас Беларуси»⁵ определены следующие показатели: средняя температура воздуха за январь и июль, °С; количество дней со средней суточной температурой выше 0; 5; 10 и 15 °С; количество безморозных дней на почве и в воздухе; сумма температур выше 5 и 10 °С; количество осадков за год, мм; количество осадков за теплый период, мм; число дней с устойчивым снежным покровом; гидротермический коэффициент за период с устойчивой температурой выше 10 °С. Вычислены их минимальное, среднее и максимальное значения, а также амплитуда. Значения производных индексов получены автором настоящего исследования: биоклиматический потенциал рассчитан по методике, предложенной в статье [21], в соответствии с данными агроэкологического атласа России и сопредельных стран⁶, индекс континентальности – по методике, описанной в публикации [22], индекс аридности – по методике, обоснованной в работе [23].

Блок агроэкологических данных складывается из подблока почвенных характеристик, подблока характеристик структуры почвенного покрова и педоразнообразия, подблока характеристик рельефа и эрозионного состояния. Для оценки неоднородности и разнообразия почвенного покрова разработан набор инструментов геообработки *SoilAnalyst*⁷ в среде *ArcGIS* [24].

В основе первого подблока лежат данные цифровых почвенных карт земельно-информационной системы Республики Беларусь⁸ (далее – ЗИС). Пространственная структура почв определена в разрезе типов почв (7 признаков), генезиса почвообразующих пород (8 признаков), гранулометрического состава почв (9 признаков), режима увлажнения (8 признаков), литологического строения профиля (3 признака), подстилающих пород (6 признаков).

Второй подблок, в свою очередь, состоит из подблока характеристик неоднородности структуры почвенного покрова и подблока характеристик педоразнообразия. Оценка неоднородности структуры почвенного покрова включает описание элементарного почвенного ареала и почвенных комбинаций. Особенности элементарного почвенного ареала установлены с помощью 11 признаков: минимального, среднего и максимального значений площади и длины контура (определены по базе геоданных), индекса дробности и степени дифференциации величины почвенных контуров (рассчитаны по методике, предложенной в статье [25]), коэффициента расчленения, коэффициента изрезанности и коэффициента кругообразности (получены по методике, описанной в публикации [26]). Специфика почвенных комбинаций

⁵Национальный атлас Беларуси / редкол.: У. Р. Гусакоў [и инш.]. Минск : Белкартаграфія, 2024. 348 с.

⁶Агроэкологический атлас России и сопредельных стран: экономически значимые растения, их вредители, болезни и сорные растения / под ред. А. Н. Афонина [и др.]. СПб. : Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2008. 1500 с.

⁷Sazonau A. A. SoilAnalyst // Zenodo : website. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15346356> (date of access: 01.04.2025).

⁸Геопортал земельно-информационной системы Республики Беларусь. URL: <https://gismap.by/> (дата обращения: 01.04.2021).

установлена с помощью 8 признаков. Классический коэффициент сложности вычислен по методике ведения мониторинга земель в Республике Беларусь⁹, медианный коэффициент сложности – по усовершенствованной методике, в основе которой лежит медианное значение коэффициента расчленения, что обеспечивает меньшую чувствительность индекса к статистическим выбросам и лучше отражает сложность структуры почвенного покрова в масштабе исследования. Коэффициент контрастности определен по методике, обоснованной в публикации [27], и по методике ведения мониторинга земель в Республике Беларусь. Принята шкала контрастности почв Беларуси, разработанная Н. В. Клебановичем¹⁰. Коэффициент неоднородности получен по методике ведения мониторинга земель в Республике Беларусь, при этом учитывались вариации коэффициента контрастности и коэффициента сложности.

Оценка педоразнообразия агроландшафтов Беларуси осуществлена по методике, описанной в статье [25], впервые. Педоразнообразие характеризуется с помощью 11 признаков: индекса богатства, индекса разнообразия Шеннона, нормированного индекса разнообразия Шеннона, индекса разнообразия Джини – Симпсона, индекса разнообразия Маргалефа, индекса разнообразия Менхиника, индекса разнообразия Бриллюэна, индекса разнообразия Макинтоша, индекса разнообразия Симпсона, индекса разнообразия Бергера – Паркера, индекса латеральной дифференциации.

В основе третьего подблока лежат данные цифровой модели рельефа *AirBUS WorldDEM4Ortho* с пространственным разрешением 24 м и данные слоя «почвы» ЗИС. Стандартным образом определены средние морфометрические параметры (9 признаков): абсолютная высота, м; амплитуда высот, м; общая кривизна склонов, град; крутизна склонов, град; горизонтальное, вертикальное и общее расчленение рельефа, км/км² (по методике, описанной в статье [28]); длина склонов, м (по методу *Slope Length* в среде *SAGA*); LS-фактор (по методу *Moore & Nieber 1989* в среде *SAGA*).

Эрозионное состояние земель характеризовалось с точки зрения фактической водной и ветровой эрозии, общей эродированности (4 признака) и потенциальной дефляционной и водно-эрозионной опасности (4 признака). По итогам оценки фактического эрозионного состояния по данным ЗИС получены сведения об удельном весе земель по типу и степени проявления эрозионных процессов (смытости, намытости, дефлированности) и их общей доле в земельном фонде. Уровень потенциальной водно-эрозионной опасности измерен с помощью *K*-фактора, отражающего степень уязвимости почв к эрозии в зависимости от отношения содержания в них песка к сумме пыли и глины (по методике, предложенной в работе [29]), интегрального показателя водно-эрозионной опасности, а также с помощью интегрального показателя водно-эрозионной опасности с учетом среднемесячной эродирующей способности дождей (по методике, обоснованной в публикации [30]). Последний показатель определен по информации Европейского центра данных о почве [31]. В результате оценки потенциальной дефляционной опасности по методике, описанной в статье [32], получены сведения об удельном весе земель со средней и сильной степенью опасности и их общей доле в земельном фонде.

Блок агрохозяйственных данных включает 12 признаков, благодаря которым возможно измерение потенциальной продуктивности агроландшафтов, мелиоративного состояния земель, радиационной загрязненности и освоенности территорий. В соответствии с данными ЗИС определены средние значения балла бонитета почв, балла кадастровой оценки, а также кислотности почв по рабочим участкам. Индексы средней площади рабочего участка и ее отношения к средней площади элементарного почвенного ареала рассчитаны в среде *ArcGIS* по данным ЗИС. В ходе оценки мелиоративного состояния земель на основе данных ЗИС получены сведения об общей доле мелиорированных земель в земельном фонде в зависимости от типа мелиорации (осушения, орошения, двойного регулирования). Степень радиационной загрязненности и площадь загрязненных земель установлены с опорой на атлас последствий аварии на Чернобыльской атомной электростанции¹¹ по данным ЗИС. При этом учитывался только ¹³⁷Cs, что обусловлено его малой подвижностью в экосистемах [33]. В базе геоданных представлена информация об общей доле загрязненных земель в земельном фонде с дифференциацией территорий по степени радиационной загрязненности (от 1 до 5 Ки/км², от 5 до 15 Ки/км², от 15 Ки/км² и более).

На втором этапе осуществлялось снижение размерности данных методом главных компонент с вариакс-вращением (нормализация Кайзера) в программе *IBM SPSS Statistics* (версия 26). Важное свойство метода – ортогональность (независимость) главных компонент, что является необходимым условием кластерного анализа. Для оценки влияния исходной переменной (признака) на формирование главных компонент использовались значения компонентной нагрузки, которые представляют собой корреляции между

⁹Методика ведения мониторинга земель в Республике Беларусь. Минск : [б. и.], 1993. 66 с.

¹⁰Клебанович Н. В. Методы обследования земель: задания и методические указания по выполнению практикума по курсу «Земельный кадастр». Минск : БГУ, 2008. 48 с.

¹¹Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии на Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларуси / под ред. Ю. А. Израэля, И. М. Богдевича. М. : Фонд «Инфосфера» : НИА-природа, 2009. 140 с.

исходными переменными и главными компонентами. По значению компонентной нагрузки определялись признаки, оказывающие наибольшее влияние на компоненту.

На третьем этапе агроландшафты Беларуси классифицировались методом k -средних в среде *ArcGIS Pro*. Данный метод машинного обучения направлен на минимизацию дисперсии внутри выделяемых групп и максимизацию дисперсии между ними. Заданный набор центров кластеров (ядер кластеризации) напрямую влияет на конечный результат. Они могут быть определены вручную, случайно или с использованием алгоритмов оптимизации. Метод k -средних требует предварительного знания числа выделяемых кластеров, однако установлением их оптимального количества и оценкой качества кластеризации занимается эксперт. Если число кластеров заранее неизвестно, для поиска их оптимального количества используются особые метрики, в частности метод псевдо- F -статистики, или индекс Калински – Харабаша. Наибольшее значение метрики отвечает наилучшему количеству выделяемых кластеров.

Результаты и их обсуждение

Компонентный анализ. На основе разработанной базы геоданных признаки были объединены в группы, характеризующие агроклиматические, почвенно-эрозионные, почвенно-экологические, почвенно-структурные и агрохозяйственные условия формирования и развития агроландшафтов. Критериями отбора исходных признаков для анализа выступили их распространенность (более 5 % земель внутри операционно-территориальной единицы отвечают заданному параметру) и отсутствие сильной корреляции с другими признаками для исключения коллинеарности.

Агроклиматическое состояние агроландшафтов характеризуется с помощью 17 признаков (блок агроклиматических данных). Выявлены четыре компоненты, после вращения первая из них объясняет 34 % общей дисперсии, вторая – 27 %, третья – 20 %, четвертая – 13 % (суммарно 94 %). Первая компонента отражает влияние на агроландшафты холодного периода и условия перезимовки сельскохозяйственных культур. Средняя температура воздуха за январь имеет наибольшую компонентную нагрузку (0,933)¹². Высоким значением данного показателя отличается также продолжительность периода со средней суточной температурой выше 0 °C (0,914) и 5 °C (0,845). Установлена обратная связь (–0,928) с числом дней с устойчивым снежным покровом. Вторая компонента описывает влияние на агроландшафты теплого периода. Максимальной компонентной нагрузкой обладают индекс континентальности (0,963) и средняя температура воздуха за июль (0,816). Третья компонента отражает влияние на агроландшафты количества осадков. Наибольшая компонентная нагрузка отмечена у количества осадков за год (0,899) и за теплый период (0,820). Менее выражена связь с индексом аридности (0,760) и гидротермическим коэффициентом за период с устойчивой температурой выше 10 °C (0,678). Четвертая компонента описывает влияние на агроландшафты продолжительности безморозного периода на почве (0,886) и в воздухе (0,872). Некоторые признаки демонстрируют высокую корреляцию с двумя компонентами. Для первой и второй компонент такая связь установлена с продолжительностью периода со средней суточной температурой выше 10 и 15 °C, суммой температур выше 5 и 10 °C, биоклиматическим потенциалом, для второй и третьей компонент – с гидротермическим коэффициентом за период с устойчивой температурой выше 10 °C.

Почвенно-эрозионное состояние агроландшафтов характеризуется с помощью 14 признаков: доли фактически эродированных почв (смытых, намытых, дефлированных), %; общей доли эродированных почв в земельном фонде, %; доли земель с высоким потенциалом развития эрозии, %; интегрального показателя водно-эрозионной опасности с учетом среднемесячной эродирующей способности дождей; доли земель с высоким уровнем дефляционной опасности, %; абсолютной высоты, м; амплитуды высот, м; длины склонов, м; кривизны склонов, град; крутизны склонов, град; горизонтального, вертикального и общего расчленения рельефа, км/км².

Выявлены три компоненты, при этом первая из них объясняет 34 % общей дисперсии, вторая – 24 %, третья – 15 % (суммарно 73 %). Первая компонента описывает эрозионный потенциал агроландшафтов: длину склонов (0,869), вертикальное расчленение (0,857), амплитуду высот (0,829), крутизну склонов (0,801), общее расчленение (0,727), абсолютную высоту (0,697). Вторая компонента отражает фактическое проявление эрозии: общую долю эродированных почв в земельном фонде (0,913), долю намытых (0,897) и смытых (0,780) почв. Третья компонента описывает дефляцию: долю земель с высоким уровнем дефляционной опасности (–0,712), долю дефлированных земель (–0,617). При этом заметно выделяется такой признак, как горизонтальное расчленение рельефа (–0,691), что можно объяснить высокими значениями названного показателя на Полесье (по данным морфометрического районирования¹³ [28]), где дефляция наиболее распространена.

¹²Здесь и далее в рамках подраздела в скобках указано значение компонентной нагрузки.

¹³Национальный атлас Беларуси / редкал.: У. Р. Гусакоў [i інш.]. 348 с.

Почвенно-экологическое состояние агроландшафтов характеризуется с помощью 41 признака. Из них отобраны 11 признаков в разрезе типов почв (дерновые заболоченные и зональные почвы), гранулометрического состава почв (почвы тяжелого гранулометрического состава), режима увлажнения (переувлажненные и гидроморфные почвы), генезиса почвообразующих пород (моренные, водно-ледниковые, лессовые и лессовидные почвы), строения профиля (однородное, двухчленное строение профиля), подстилающих пород (подстиление связными породами).

Выявлены пять компонент, при этом первая из них объясняет 22 % общей дисперсии, вторая – 20 %, третья – 15 %, четвертая – 15 %, пятая – 13 % (суммарно 85 %). Первая компонента описывает дерново-подзолистые и дерново-подзолистые заболоченные (0,909), а также гидроморфные (–0,838) почвы. Вторая компонента описывает лессовые и лессовидные почвообразующие породы (0,856) тяжелого гранулометрического состава (0,880). Третья компонента отражает почвы моренного генезиса (0,934). Четвертая компонента описывает почвы двухчленного строения профиля (0,850). Установлено, что почвы однородного строения демонстрируют обратную связь (–0,760). Пятая компонента отражает переувлажненные минеральные почвы (0,884), преимущественно дерново-заболоченные (0,683).

Почвенно-структурное состояние агроландшафтов оценивается с помощью 20 признаков (подблоки характеристик структуры почвенного покрова (9 признаков) и педоразнообразия (11 признаков) блока агро-экологических данных). Отобраны такие признаки структуры почвенного покрова, как средние значения площади и длины контура, индекс дробности, степень дифференциации величины почвенных контуров, коэффициент кругообразности, коэффициент изрезанности (средневзвешенный), медианный коэффициент сложности, коэффициент контрастности (по методике, обоснованной в публикации [27]), коэффициент неоднородности в вариации с медианным коэффициентом сложности. Из числа характеристик педоразнообразия взяты все признаки.

Выявлены четыре компоненты, при этом первая из них объясняет 27 % общей дисперсии, вторая – 24 %, третья – 18 %, четвертая – 9 % (суммарно 78 %). Первая компонента описывает педоразнообразие с помощью индекса богатства (0,877), индекса разнообразия Шеннона, индекса разнообразия Маргалеса (0,914), индекса разнообразия Менхеника (0,764) и индекса латеральной дифференциации (0,869). Вторая компонента отражает сложность контуров элементарных почвенных ареалов, при этом учитываются средние значения площади (–0,904) и длины (–0,927) контура, индекс дробности (0,951), медианный коэффициент сложности (0,941). Третья компонента описывает дифференциацию числа и размера элементарных почвенных ареалов. Наибольшую компонентную нагрузку имеют степень дифференциации величины почвенных контуров (0,793), индекс Макинтоша (–0,688) и индекс Симпсона (0,681). Четвертая компонента отражает контрастность и неоднородность структуры почвенных покровов. Максимальной компонентной нагрузкой обладают коэффициент контрастности (0,839) и коэффициент неоднородности в вариации с медианным коэффициентом сложности (0,661).

Агрохозяйственное состояние агроландшафтов характеризуется с помощью 18 признаков: средних значений балла бонитета почв, балла кадастровой оценки, а также кислотности почв по рабочим участкам, индексов средней площади рабочего участка и ее отношения к средней площади элементарного почвенного ареала, общей доли мелиорированных земель в земельном фонде в зависимости от типа мелиорации (осушения, орошения, двойного регулирования), доли земель под древесно-кустарниковой растительностью в земельном фонде, общей доли луговых земель в земельном фонде с выделением луговых естественных, закустаренных, улучшенных, неиспользуемых и иных земель, а также общей доли загрязненных земель в земельном фонде с дифференциацией территорий по степени радиационной загрязненности (от 1 до 5 Ки/км², от 5 до 15 Ки/км², от 15 Ки/км² и более). Дифференциация земель с точки зрения их загрязнения радионуклидами (¹³⁷Cs) рассматривается отдельно.

Выявлены три компоненты, при этом первая из них объясняет 28 % общей дисперсии, вторая – 19 %, третья – 19 % (суммарно 66 %). Первая компонента описывает процесс выхода из сельскохозяйственного оборота малопродуктивных и малоиспользуемых земель. Установлена обратная связь со средним значением балла бонитета почв по рабочим участкам (–0,865), индексом средней площади рабочего участка (–0,719) и долей земель под древесно-кустарниковой растительностью в земельном фонде (0,750). Данный факт обусловлен выведением малопродуктивных земель из сельскохозяйственного оборота и их зарастанием древесно-кустарниковой растительностью. Вторая компонента отражает среднее значение кислотности почв по рабочим участкам (–0,880) и долю мелиорированных земель с двойным регулированием в земельном фонде (0,812), что можно объяснить широким применением подобных систем на участках со сравнительно более кислыми торфяными почвами. Третья компонента описывает осушение земель. Для земель с осушительной мелиорацией значение компонентной нагрузки составляет 0,814, для луговых улучшенных земель – 0,798.

Классификация агроландшафтов. Предлагаемая типология основана на классификации по факетному принципу и кластерном анализе. По ранее определенным величинам компонентных нагрузок из шести групп признаков отобраны самые существенные – признаки с наибольшей компонентной нагрузкой и признаки, которые демонстрируют высокую корреляцию с двумя и более компонентами. Они комплексно характеризуют условия формирования и развития агроландшафтов и позволяют оценить их состояние.

Для каждой группы признаков проведен кластерный анализ методом k -средних. Оптимальное число кластеров рассчитано по индексу Калински – Харабаша (рис. 2).

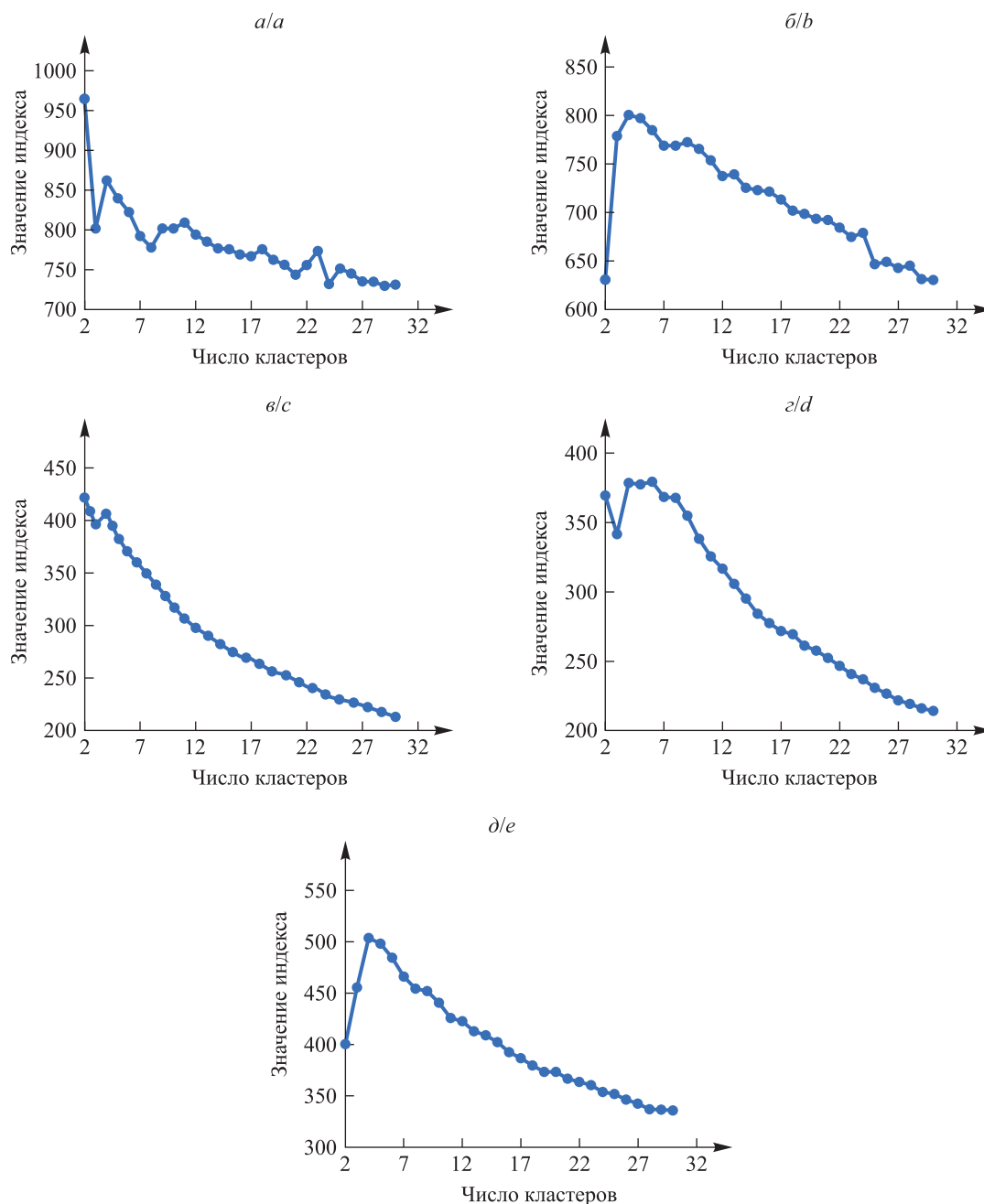


Рис. 2. Число кластеров по индексу Калински – Харабаша для отобранных признаков:

- a* – признаки агроклиматического состояния; *б* – признаки почвенно-эрозионного состояния;
в – признаки почвенно-структурного состояния; *г* – признаки почвенно-экологического состояния;
д – признаки агрохозяйственного состояния

Fig. 2. The number of clusters according to the Kalinski – Kharabash index for the selected characteristics:

- a* – characteristics of agroclimatic condition; *b* – characteristics of soil-erosion condition;
c – characteristics of soil-structural condition; *d* – characteristics of soil-ecological condition;
e – characteristics of agro-economic condition

Минимальное число кластеров, равное 2, часто соответствует наибольшим значениям индекса Калински – Харабаша. Однако такое разделение исходного множества не всегда является оптимальным, и при поиске наилучшего количества кластеров необходимо ориентироваться не только на наибольшее значение метрики, но и на локальные максимумы. Для подавляющей части групп признаков оптимальным является выделение четырех кластеров: для признаков агроклиматического состояния индекс Калински – Харабаша составляет 862, для признаков почвенно-эрозионного состояния – 800, для признаков почвенно-структурного состояния – 407, для признаков агрохозяйственного состояния – 500. Для признаков почвенно-экологического состояния выделены шесть кластеров, индекс Калински – Харабаша составляет 379. Для признаков почвенно-радиологического состояния эмпирически установлено оптимальное число кластеров, равное 3.

Степень влияния каждого признака на результат кластеризации оценивается по величине коэффициента детерминации. Наибольшее влияние на формирование кластеров агроклиматического состояния оказывают гидротермический коэффициент за период с устойчивой температурой выше 10 °C (0,78)¹⁴, индекс континентальности (0,74), продолжительность периода со средней суточной температурой выше 10 °C (0,68), продолжительность безморозного периода на почве (0,65), средняя температура воздуха за январь (0,62), количество осадков за год (0,52). Наибольшее влияние на формирование кластеров почвенно-эрозионного состояния оказывает доля земель с высоким уровнем дефляционной опасности (0,73). Менее ощутимо влияние доли фактически эродированных почв (смытых, намытых, дефлированных) (0,65) и длины склонов (0,56). Наибольшее влияние на формирование кластеров почвенно-экологического потенциала оказывает моренный генезис почвообразующих пород (0,92). Значения коэффициента детерминации более 0,60 характерны для тяжелого гранулометрического состава почв (0,69), однородного строения профиля (0,69), лессового и лессовидного генезиса почвообразующих пород (0,68), гидроморфного режима увлажнения (0,65), дерновых заболоченных типов почв (0,64), водно-ледникового генезиса почвообразующих пород (0,59), подстилания связными породами (0,45), двухчленного строения профиля (0,34), переувлажнения (0,21). Наибольшее влияние на формирование кластеров почвенно-структурного состояния оказывают индекс дробности и коэффициент контрастности (0,60). Менее выражено влияние индекса разнообразия Маргалефа (0,50). Степень дифференциации величины почвенных контуров практически не воздействует на формирование кластеров (0,07). Наибольшее влияние на формирование кластеров агрохозяйственного состояния оказывают средние значения балла бонитета почв (0,58), а также кислотности почв по рабочим участкам (0,52). Менее выражено влияние доли земель с осушительной мелиорацией (0,50). Для признаков почвенно-радиологического состояния характерны высокие значения коэффициента детерминации: для общей доли загрязненных земель в земельном фонде его значение равняется 0,92, для доли загрязненных земель со степенью радиационной загрязненности от 1 до 5 Ки/км² и от 5 до 15 Ки/км² – 0,88.

Таким образом, по выделенным кластерам методом фасетной классификации составлена агроэкологическая типология агроландшафтов Беларуси (см. таблицу).

Агроэкологическая типология агроландшафтов Беларуси

Agroecological typology of Belarusian agrolandscapes

Условия	Номер кластера	Число основных операционно-территориальных единиц	Площадь, млн га	Характеристика агроландшафтов
Агроклиматические	1	448	3,3	Агроландшафты умеренного климата с достаточным увлажнением
	2	226	1,7	Агроландшафты с высоким температурным потенциалом и недостаточным увлажнением
	3	223	1,8	Агроландшафты с более выраженной континентальностью климата и недостаточным увлажнением
	4	419	3,2	Агроландшафты с низким температурным потенциалом и достаточным увлажнением
Почвенно-эрозионные	1	621	4,8	Агроландшафты с низким эрозионным риском
	2	343	2,5	Агроландшафты с умеренным дефляционным риском
	3	275	2,2	Агроландшафты с умеренным водно-эрозионным риском
	4	77	0,6	Агроландшафты с высоким водно-эрозионным риском

¹⁴Здесь и далее в рамках подраздела в скобках указано значение коэффициента детерминации.

Окончание таблицы
Ending of the table

Условия	Номер кластера	Число основных операционно-территориальных единиц	Площадь, млн га	Характеристика агроландшафтов
Почвенно-структурные	1	563	4,2	Агроландшафты с низкой неоднородностью и сложностью структуры почвенного покрова, умеренным педоразнообразием
	2	360	2,6	Агроландшафты с низкой неоднородностью и контрастностью структуры почвенного покрова, низким педоразнообразием
	3	238	2,1	Агроландшафты с высокой неоднородностью и дробностью структуры почвенного покрова, высоким педоразнообразием
	4	155	1,2	Агроландшафты с высокой неоднородностью и контрастностью структуры почвенного покрова, низким педоразнообразием
Почвенно-экологические	1	192	1,7	Зональные легкие почвы на моренных отложениях двухчленного строения различного подстилания
	2	189	1,4	Зональные тяжелые почвы на лессовых и лессовидных отложениях двухчленного строения различного подстилания
	3	51	0,4	Зональные тяжелые почвы на лессовых и лессовидных отложениях однородного строения
	4	568	4,2	Зональные легкие почвы на водно-ледниковых отложениях двухчленного строения с подстиланием рыхлыми породами
	5	132	0,9	Заболоченные легкие почвы на водно-ледниковых и древнеаллювиальных отложениях двухчленного строения с подстиланием рыхлыми породами
	6	184	1,4	Заболоченные легкие и торфяные почвы на водно-ледниковых отложениях двухчленного строения с подстиланием рыхлыми породами
Агрохозяйственные	1	312	2,5	Умеренно мелиорированные агроландшафты с низким плодородием
	2	257	1,9	Умеренно мелиорированные агроландшафты с высоким плодородием
	3	280	2,1	Сильно мелиорированные агроландшафты с умеренно высоким плодородием
	4	467	3,5	Слабо мелиорированные агроландшафты с умеренно низким плодородием
Почвенно-радиологические	1	1152	8,8	Агроландшафты без радиационного загрязнения земель ^{137}Cs
	2	129	1,0	Агроландшафты с низким и умеренным радиационным загрязнением земель ^{137}Cs
	3	35	0,2	Агроландшафты с высоким радиационным загрязнением земель ^{137}Cs

Пространственное положение таксономических единиц представлено на рис. 3. В соответствии с предложенной типологией место агроландшафта в схеме можно охарактеризовать кодом из шести переменных:

$$C = a.b.c.d.e(f),$$

где C – классификационный код агроландшафта; a – агроклиматическое состояние; b – почвенно-эрозийное состояние; c – почвенно-структурное состояние; d – почвенно-экологическое состояние; e – агрохозяйственное состояние; f – почвенно-радиологическое состояние.

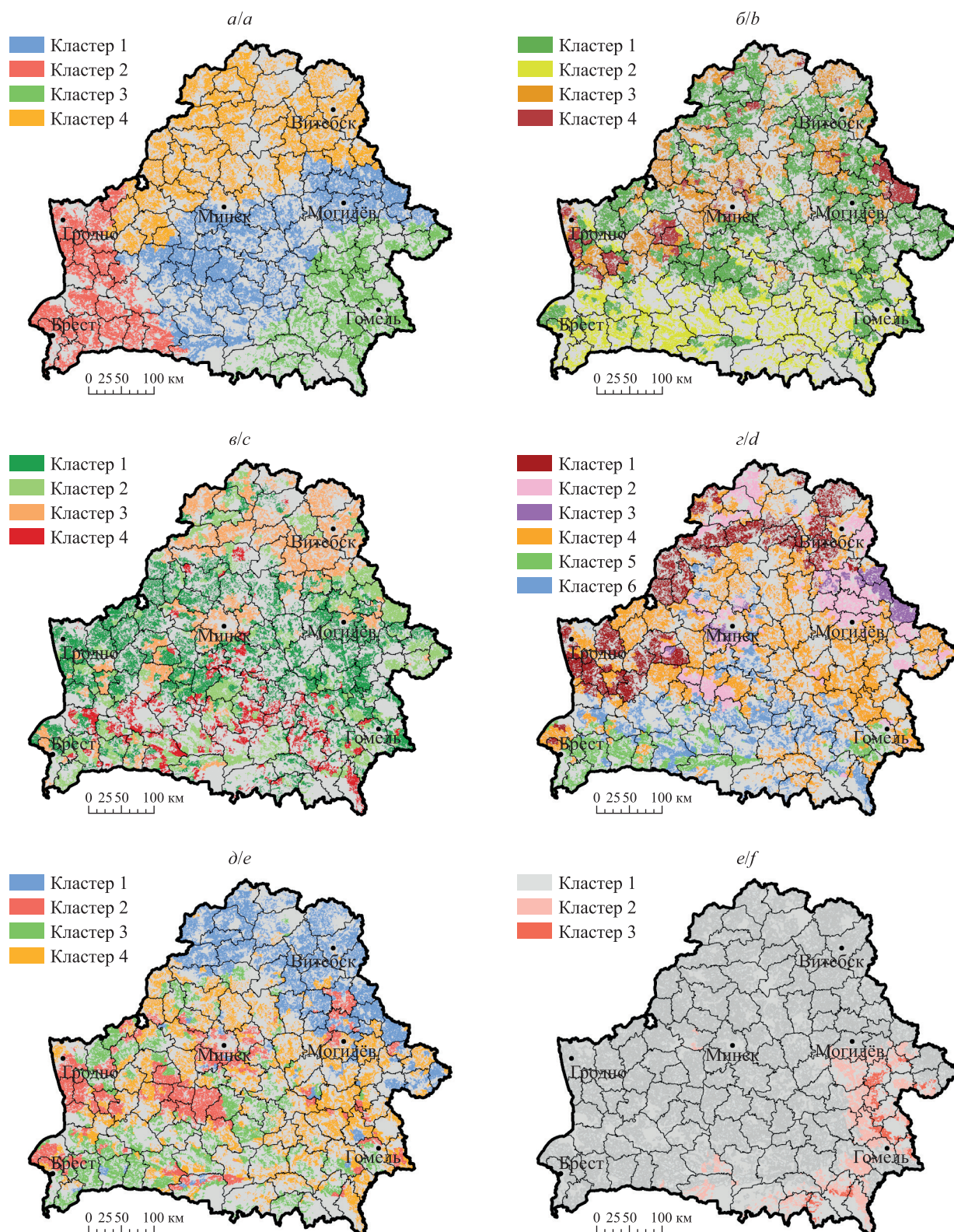


Рис. 3. Кластеры агроэкологического состояния агроландшафтов Беларуси:

a – кластеры агроклиматического состояния; *б* – кластеры почвенно-эрозийного состояния;
в – кластеры почвенно-структурного состояния; *г* – кластеры почвенно-экологического состояния;
д – кластеры агрохозяйственного состояния; *е* – кластеры почвенно-радиологического состояния

Fig. 3. Clusters of agroecological conditions of Belarusian agrolandscapes:

a – clusters of agroclimatic condition; *b* – clusters of soil-erosion condition; *c* – clusters of soil-structural condition;
d – clusters of soil-ecological condition; *e* – clusters of agro-economic condition; *f* – clusters of soil-radiological condition

Код переменной соответствует номеру кластера. Первые четыре знака кода (*a*, *b*, *c*, *d*) описывают природно-антропогенные условия формирования и функционирования агроландшафтов, два последних (*e*, *f*) – антропогенно-техногенные условия.

На природно-антропогенном уровне выделяются 169 типов агроландшафтов, с учетом антропогенно-техногенного уровня – 390 типов. Агроландшафты умеренного климата с достаточным увлажнением, высоким водно-эрозионным риском, низкой неоднородностью структуры почвенного покрова, заболоченными легкими и торфяными почвами на водно-ледниковых и органогенных отложениях (код 1.4.1.6), а также агроландшафты континентального климата с недостаточным увлажнением, высоким водно-эрозионным риском, низкой неоднородностью структуры почвенного покрова, заболоченными легкими и торфяными почвами на водно-ледниковых и органогенных отложениях (код 3.4.1.6) являются наиболее распространенными природно-антропогенными типами агроландшафтов (65 и 50 контуров соответственно).

Заключение

Оценка условий формирования и развития агроландшафтов Беларуси на основе методов компонентного и кластерного анализа позволила обоснованно выявить ведущие группы факторов. Агроклиматические условия характеризуются средней температурой воздуха за январь, количеством осадков за год, продолжительностью безморозного периода на почве и периода со средней суточной температурой выше 10 °С, гидротермическим коэффициентом за период с устойчивой температурой выше 10 °С и индексом континентальности. Почвенно-эрозионные условия определяются длиной склонов, долей земель с высоким уровнем дефляционной опасности и общей долей фактически эродированных земель в земельном фонде. Почвенно-экологические условия характеризуются долевым соотношением почв в разрезе их основных свойств: типовой принадлежности (дерновые заболоченные, зональные типы), тяжелого гранулометрического состава, режима увлажнения (переувлажненные, гидроморфные), генезиса почвообразующих пород (моренные, водно-ледниковые, лессовые и лессовидные), однородного и двухчленного строения профиля, подстилания связными породами. Почвенно-структурные условия определяются индексом дробности, дифференциацией величины почвенных контуров, коэффициентом контрастности и индексом видового разнообразия Маргалефа. Агрохозяйственные условия характеризуются баллом бонитета почв, средней кислотностью почв, степенью осушительной мелиорации. Почвенно-радиологические условия характеризуются общей долей загрязненных земель в земельном фонде с дифференциацией территорий по степени радиационной загрязненности (от 1 до 5 Ки/км², от 5 до 15 Ки/км², от 15 Ки/км² и более).

На основе выделенных факторов впервые составлена агроэкологическая типология агроландшафтов Беларуси по фасетному принципу, что позволяет охарактеризовать природно-антропогенные и антропогенно-техногенные условия формирования и функционирования агроландшафтов. На природно-антропогенном уровне выделяются 169 типов агроландшафтов, с учетом антропогенно-техногенного уровня – 390 типов.

Разработанная типологическая схема обладает рядом преимуществ, особенно гибкостью и масштабируемостью: для каждого уровня классификации можно разработать новые классы без необходимости перестройки всей схемы. Применяемые подходы могут быть использованы для дальнейшего совершенствования и расширения типологии, в частности для учета социально-экономических факторов. Схема должна послужить основой для поиска общих подходов к проектированию адаптивно-ландшафтных систем земледелия с учетом выявленных особенностей агроландшафтов.

Библиографические ссылки

1. Масляев ВН, Евсеев АД, Кулагов СА, Светкин АС, Терехин ДЮ. О соотношении понятий «агрогеосистема», «агроландшафт» и «агроэкосистема» как основных дефиниций в геоэкологических исследованиях. *Московский экономический журнал*. 2025;10(1):484–504.
2. Мильков ФН. *Вопросы географии. Сборник 124, Природные комплексы и сельское хозяйство*. Москва: Мысль; 1984. Сельскохозяйственные ландшафты, их специализация и классификация; с. 24–34.
3. Юртаев АА. Агроландшафтные исследования: теория и практика. *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки*. 2011;15:217–221.
4. Mueller L, Sychev VG, Dronin NM, Eulenstein F, editors. *Exploring and optimizing agricultural landscapes*. Cham: Springer; 2021. Agricultural landscapes: history, status and challenges; p. 3–54 (Innovations in landscape research).
5. Mirschel W, Terleev VV, Wenkel K-O, editors. *Landscape modelling and decision support*. Cham: Springer; 2020. 616 p. (Innovations in landscape research).
6. Кирюшин ВИ, Кирюшин СВ. *Агротехнологии*. Москва: Лань; 2022. 464 с.

7. Яцухно ВМ, Мандер ЮЭ. *Формирование агроландшафтов и охрана природной среды*. Минск: Институт геологических наук АНБ; 1995. 122 с.
8. Трапезникова ОН. Геоэкологическая концепция агроландшафта. *Известия Русского географического общества*. 2014; 146(1):73–85.
9. Трапезникова ОН. *Парадоксы северного земледелия: история и география агроландшафтов лесной зоны Восточно-Европейской равнины*. Москва: Геос; 2019. 256 с.
10. Носонов АМ. *Территориальные системы сельского хозяйства (экономико-географические аспекты исследования)*. Москва: Янус-К; 2001. 324 с.
11. Лысанова ГИ. *Ландшафтный анализ агроприродного потенциала геосистем*. Новосибирск: Издательство Института географии Сибирского отделения РАН; 2001. 188 с.
12. Новиков ДВ. Агроэкологическая типизация земель как информационная основа современного землеустройства. *Землеустройство, кадастр и мониторинг земель*. 2010;1:29–35.
13. Алманова ЖС. Агроэкологическая типология земель для проектирования адаптивно-ландшафтных систем земледелия в Северном Казахстане. *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*. 2017;9:22–24.
14. Баденко ВЛ, Иванов ДА, Топаж АГ. Информационное обеспечение агроландшафтных исследований. *Информация и космос*. 2014;4:52–54.
15. Ольшевский АВ. Геоинформационное моделирование агроландшафтов Белорусского Полесья. *Вестник Белорусского государственного университета. Серия 2, Химия. Биология. География*. 2009;2:71–75.
16. Родоман ББ. *География, районирование, картоиды*. Смоленск: Ойкумена; 2007. 368 с.
17. Nabati J, Nezami A, Neamatollahi E, Akbari M. GIS-based agro-ecological zoning for crop suitability using fuzzy inference system in semi-arid regions. *Ecological Indicators*. 2020;117(5):106646.
18. Червань АН, Нарожная АГ. Технология проведения геосистемного анализа для территориального планирования природопользования. *Современные проблемы науки и образования* [Интернет]. 2016 [прочитано 1 апреля 2025 г.];6. Доступно по: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=25855>.
19. Кирюшин ВИ. Методология комплексной оценки сельскохозяйственных земель. *Почвоведение*. 2020;7:871–879.
20. Дыдышко СВ, Азарёнок ТН, Матыченкова ОВ. Агроэкологическая оценка пригодности почв пахотных земель Мстиславского района для возделывания зерновых культур. *Почвоведение и агрохимия*. 2022;1:7–20.
21. Логинов ВФ, Хитриков МА. Оценка биоклиматического потенциала Беларуси с использованием данных дистанционного зондирования и компьютерного моделирования. *Природные ресурсы*. 2019;2:82–93.
22. Котляров ДА. Анализ индекса континентальности климата на территории Северо-Востока России. *Вестник Балтийского федерального университета имени И. Канта. Серия: Естественные и медицинские науки*. 2024;1:92–103.
23. Даждо Р. *Основы экологии: природа и человек*. Москва: Прогресс; 1975. 415 с.
24. Сазонов АА. Автоматизация процессов создания и анализа тематических почвенных карт. В: Пересадыко ВА, редактор. *Збірник матеріалів конференції «ГІС-форум 2017»; 22–24 лютого 2017 р.; Харків, Україна. Випуск 1*. Харків: Хмельницький національний університет; 2017. с. 67–71. Спільно з видавництвом «Смугаста типографія».
25. Смирнова МА, Геннадиев АН. Количественная оценка почвенного разнообразия: теория и методы исследования. *Вестник Московского университета. Серия 5, География*. 2017;4:3–11.
26. Сазонов АА, Пенкрат ИВ, Рудаковский ИА. Структура почвенного покрова Национального парка «Нарочанский». *Территория науки*. 2018;3:12–18.
27. Юодис ЮК. О структуре почвенного покрова Литовской ССР. *Почвоведение*. 1967;11:50–55.
28. Курлович ДМ. Морфометрический ГИС-анализ рельефа Беларуси. *Земля Беларуси*. 2014;4:42–48.
29. Афанасьев НИ, Юхновец АВ. Коэффициенты устойчивости почв Беларуси к водной эрозии. *Почвоведение и агрохимия*. 2010;2:49–54.
30. Лазовик ГС, Топаз АА. Оценка эрозионной опасности почв и ее картографирование с использованием ГИС-технологий. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология*. 2021;2:18–31. DOI: 10.33581/2521-6740-2021-2-18-31.
31. Panagos P, van Liedekerke M, Borrelli P, Köninger J, Ballabio C, Orgiazzi A, et al. European Soil Data Centre 2.0: soil data and knowledge in support of the EU policies. *European Journal of Soil Science*. 2022;73(6):13315.
32. Цыбулько НН, Цырибко ВБ, Алексейчик ЕВ, Жукова ИИ. Генетические особенности, типизация и распространение дефляционно опасных почв на сельскохозяйственных землях Беларуси. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2023;3:78–87.
33. Яцухно ВМ. Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии на Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларуси. *Вестник Белорусского государственного университета. Серия 2, Химия. Биология. География*. 2011;1:107–108.

Получена 17.07.2025 / исправлена 15.08.2025 / принята 18.08.2025.
Received 17.07.2025 / revised 15.08.2025 / accepted 18.08.2025.