

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2026-1-55-70>
УДК 631.95(476)

Поступила в редакцию 23.03.2026
Received 23.03.2026

ОЦЕНКА СОВРЕМЕННОГО ПОЧВЕННО-АГРОЭКОЛОГИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА АГРОЛАНДШАФТОВ БЕЛАРУСИ

А. А. Сазонов

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Комплексная агроэкологическая оценка позволяет рационализировать использование природных ресурсов, определить возможности адаптации сельского хозяйства к природным условиям и найти баланс между интенсификацией и экологизацией. В работе представлена методика комплексной оценки почвенно-агроэкологического потенциала агроландшафтов Беларуси на основе статистического анализа их характеристик. В основе методики лежит база геоданных, включающая агроэкологические характеристики 1316 агроландшафтов страны. Последовательные факторный и регрессионный анализы позволяют обоснованно сократить число переменных, составить уравнения регрессии для урожайности группы зерновых и зернобобовых культур для периода 1995–2024 гг. с пятилетними интервалами и рассчитать индекс почвенно-агроэкологического потенциала агроландшафтов (ИПАП). Наиболее высокий потенциал отмечается на Гродненской возвышенности, где составляет 112,6 пункта индекса, наиболее низкий – на Нещердо-Городокской возвышенности – 55,0 пункта индекса.

Ключевые слова: агроэкологическая оценка; агроэкологический потенциал; агроландшафты; регрессионный анализ; зерновые культуры.

Для цитирования. Сазонов А. А. Оценка современного почвенно-агроэкологического потенциала агроландшафтов Беларуси // Природопользование. – 2026. – № 1. – С. 55–70.

ASSESSMENT OF THE MODERN SOIL AND AGROECOLOGICAL POTENTIAL OF AGRICULTURAL LANDSCAPES OF BELARUS

A. A. Sazonau

Belarusian State University, Minsk, Belarus

Abstract. Comprehensive agroecological assessment makes it possible to rationalize the use of natural resources, identify opportunities for adapting agriculture to natural conditions, and find a balance between intensification and ecologization. The paper presents a methodology for the comprehensive assessment of the soil-agroecological potential of agricultural landscapes in Belarus, based on statistical analysis of their characteristics. The methodology is based on a geodatabase that includes agroecological characteristics of 1316 agricultural landscapes across the country. Sequential factor and regression analyses allow for a justified reduction in the number of variables, the development of regression equations for the yield of grain and leguminous crops for the period 1995–2024 with five-year intervals, and the calculation of the index of soil-agroecological potential of agricultural landscapes (ISAP). The highest potential is observed in the Grodno Upland, where it amounts to 112.6 index points, while the lowest is found in the Neshcherdo-Gorodokskaya Upland, with 55.0 index points.

Keywords: agroecological assessment; agroecological potential; agricultural landscapes; regression analysis; grain crops.

For citation. Sazonau A. A. Assessment of the modern soil and agroecological potential of agricultural landscapes of Belarus. *Nature Management*, 2026, no. 1, pp. 55–70.

Введение.

Теоретические подходы к агроэкологической оценке. Комплексная агроэкологическая оценка позволяет рационализировать использование природных ресурсов, определить возможности адаптации сельского хозяйства к природным условиям, поиска баланса между интенсификацией и экологизацией. Результаты оценки необходимо учитывать при перспективном размещении посевов и оптимизации структуры посевных площадей сельскохозяйственных культур, прогнозирования и изменений потенциала по причине изменения климата и проведения мелиоративных мероприятий [1].

Изменяющиеся климатические условия, интенсификация сельскохозяйственного производства и повышение его наукоемкости требуют поиска новых подходов к оценке ресурсного потенциала агроландшафтов, что обуславливает актуальность настоящего исследования, цель которого – представить

методику комплексной оценки почвенно-агроэкологического потенциала агроландшафтов Беларуси на основе статистического анализа их характеристик с использованием ГИС-технологий и баз геоданных.

Применительно к агроландшафтам использование урожайности сельскохозяйственных культур как интегрального показателя степени соответствия природных условий требованиям их выращивания можно считать общепринятым. Согласно подходу к оценке природных условий Л. Г. Раменского «...единственным, прямым и достоверным оценщиком природных условий служит сама растительность» [2, 3]. А. Н. Витченко рассматривает продуктивность сельскохозяйственных культур как интегральный показатель «превращения вещества и энергии в ландшафтах, который отражает совокупное влияние различных составляющих энергетического, водного и биогеохимического балансов, дает возможность количественно оценить их роль и степень участия в формировании агроэкологического потенциала геосистем» [1].

В оценке эффективности аграрного производства известно два подхода: техническая эффективность и аллокативная эффективность [4]. Первая определяется по уровню использования имеющегося агроресурсного потенциала для максимизации выхода продукции при заданных факторах производства, вторая – по уровню соотношения между используемыми ресурсами для минимизации затрат при данных ценах на продукцию.

Различают агроэкологическую и агрохозяйственную оценки потенциала почвенно-земельных ресурсов агроландшафта [5]. *Агроэкологическая оценка* – это анализ факторов природной среды, оказывающих наиболее сильное влияние на интенсивное сельскохозяйственное использование типов земель. *Агрохозяйственная оценка* – это кадастровая оценка сельскохозяйственных земель и степень окультуренности почв в границах агроландшафта (землепользования).

Природный агропотенциал предопределяет развитие сельского хозяйства, складывается из всех элементов природного комплекса, оцениваемых с точки зрения благоприятности ведения сельского хозяйства, и в научном сообществе определяется по-разному [6]. Впервые понятие «природный потенциал ландшафта» для интегральной оценки введено Н. А. Солнцевым. В. В. Рюмин выявляет природный потенциал геосистем через их компоненты и свойства, «определяющие возможности и условия производственной деятельности, жизни и отдыха людей с учетом необходимости их восстановления и охраны» [6], включая как исходные качества природы, так и приобретенные в результате антропогенных изменений.

Подходы к агроэкологической оценке земель и почв агроландшафтов сложны и разнообразны, могут значительно отличаться в разных странах. В качестве объекта оценки выступают как земли, в том числе земли сельскохозяйственного назначения [7, 8], так и почвы [9–12], и структура почвенного покрова отдельных территорий.

К одной из разновидностей агроэкологической оценки относится бонитировка и агропроизводственная группировка почв, направленная на выявление и ранжирование групп почв по степени пригодности под определенные культуры, или объединение по потребности в гидротехнической и химической мелиорации. Критерии группировки различны, и могут включать в себя не только характеристики почв, но и рельефа [13].

Наибольшее распространение за рубежом получил разработанный в 1970-х годах Продовольственной и сельскохозяйственной организацией ООН (ФАО) метод рейтинговой оценки пригодности земель для сельскохозяйственного использования по четырем категориям пригодности, согласно которому «каждый оценочный показатель получает определенный балл (рейтинг) и рассчитывается индекс оценки земли как среднеарифметическое из общего числа баллов» [7].

В Беларуси бонитировка почв – основа оценки земель, целью которой является определение пригодности почв для возделывания различных культур, рациональное размещение производства, планирование урожайности и определение закупочных цен на продукцию. Разработаны частные агропроизводственные группировки почв Беларуси по пригодности для возделывания отдельных сельскохозяйственных культур [9]. Почва, ее плодородие, лежит в основе кадастровой оценки сельскохозяйственных земель страны.

Бонитировка почв и оценка сельскохозяйственных земель Беларуси сегодня ставит своей целью определение показателей, характеризующих плодородие, местоположение, технологические свойства сельскохозяйственных земель как средства производства в сельском хозяйстве, а также определение кадастровой стоимости сельскохозяйственных земель. Данный подход подвергается критике, поскольку само по себе плодородие почвы является «лишь потенциальной способностью почвы участвовать в создании урожая в рамках метаболизма агробиоценоза» и в конечном счете для разных культур неодинаково [14].

Существенным недостатком подходов к бонитировке и агропроизводственной группировке почв является слабая связь почвенных условий с другими агроэкологическими условиями, «абсолютизация почвенного критерия» [7]. Так, В. И. Кирюшин утверждает, что «традиционные агропроизводственные

группировки почв, методы картографирования и бонитировки почв, разрабатывавшиеся для условий экстенсивного земледелия, ограничены и малопригодны в связи с недостаточным отражением структуры почвенного покрова, рельефа, литологических и гидрогеологических условий, агроэкологических параметров почв и других характеристик агроландшафтов» [15]. Применительно к агропроизводственной группировке почв Беларуси отмечаются низкий учет требований практики, отсутствие характеристики производительной способности почв, условий залегания по рельефу, размеров элементарных почвенных ареалов (ЭПА) [16].

Для агроэкологической оценки земель исследователи нередко стремятся рассчитать интегральный показатель агроэкологического потенциала или состояния объекта исследования, методика оценки которого часто заключается в использовании бальной оценки и ввода поправочных коэффициентов. Определение весов для коэффициентов может быть как математическим (статистическим), так и экспертным. Среди последних можно отметить работы А. О. Белоусова, где в основе оценки весовых коэффициентов лежит метод анализа иерархий, а интегральный показатель рассчитывается как сумма взвешенных показателей [8].

Применяется как интегральная оценка агроэкологического потенциала [17], так и использование узкого набора критериев, или попытка выделения одного ведущего фактора, такого как рельеф, климат или почвы [2, 18]. Необходимость интегральной оценки обусловлена тем, что частные индикаторы не дают комплексного представления об объекте исследования [19].

Одним из подходов к интеграции почвенных и климатических условий в одном индексе является почвенно-экологический индекс (ПЭИ) [20], выражающийся в баллах продуктивности основных сельскохозяйственных культур, позже модифицированный в почвенно-агроклиматический индекс (ПАКИ). Результативность данного подхода, опирающегося на различные условности и допущения, оценивается как невысокая [7].

Я. В. Рейнгард и О. В. Нежевляк применяют метод, «основанный на определении и сопоставлении экологических, агроэкологических и антропогенных элементов ландшафтов с учетом их положительного или отрицательного влияния на условия произрастания сельскохозяйственных культур» [10, 21], находя частное от суммы факторов, оказывающих положительное воздействие на культуры, и поправочных коэффициентов на отрицательное воздействие.

В целом интегральная оценка земель сегодня теряет актуальность, становясь более дифференцированной [7]: современные агротехнологии смягчают лимитирующие условия, позволяя увеличивать урожаи даже на почвах с невысокими бонитировочными показателями. Тем не менее она сохраняет фундаментальное значение, поскольку позволяет обеспечить сопоставимость территорий, унификацию критериев оценки и целостное представление о функционировании агроландшафтов как систем.

Агроэкологическая оценка земель, основанная на адаптивно-ландшафтном подходе к земледелию, развивается в работах В. И. Кирюшина. Данный подход заключается в идентификации агрономически значимых характеристик в соответствии с требованиями культур и агротехнологий, определении ландшафтных связей, особенностей энерго- и массопереноса и ландшафтно-геохимических потоков, соотнобразуется с системой агроэкологической оценки сельскохозяйственных культур, и состоит из четырех этапов: ландшафтно-экологического анализа территории, агроэкологической оценки почв, агроэкологической типизации и классификации земель, создания агрогеоинформационных систем по агроэкологической оценке земель [22].

В Беларуси работы, посвященные анализу и оценке агроэкологического состояния ландшафтов, земель и почв, выполняются достаточно давно. Значительный вклад в разработку данной проблемы внесли сотрудники Белорусского государственного университета: В. М. Яцухно [4], А. Н. Витченко [1], Ю. П. Качков и О. Ю. Панасюк [23], М. Н. Брилевский [24] и др. В Институте почвоведения и агрохимии НАН Беларуси разработаны подходы к определению потенциала почвенно-земельных ресурсов на основе типологии земель [25], сформированы подходы к разработке адаптивно-ландшафтных систем земледелия [26]. Оценка почвенно-земельного потенциала на основе структуры почвенного покрова отдельных районов страны проводит А. Н. Червань, разделяя потенциал на агроэкологическую и агрохозяйственную составляющие [27] и выделяя пять групп агроэкологического потенциала – от очень низкого до очень высокого.

Факторы агроэкологической оценки. В процессе агроэкологической оценки необходимо обоснованно подходить к выбору факторов и учитывать наиболее важные (критические, лимитирующие) из них. В случае если все природные факторы являются критическими, это может указывать на исчерпание естественных условий для размещения и продуцирования объекта оценки, а дальнейшее использование земель возможно с дополнительными затратами на восстановление природно-ресурсного потенциала земель или переходом на виды использования, где критические показатели не играют существенной роли [28].

Количество оцениваемых факторов зависит от уровня интенсификации производства [22]. Анализируя литературные источники, можно выделить десять групп, включающих более 160 факторов, применяемых в агроэкологической оценке земель:

1) почвенные: гранулометрический состав, почвенно-компонентный состав, водный режим, заболоченность, почвообразующие и подстилающие породы, минералогический состав, структурное состояние, слитогенез, мощность встречающихся эоловых отложений, запасы продуктивной влаги и влагоемкость, водопроницаемость, водоподъемная способность [7–9, 11, 21–23, 29];

2) структура почвенного покрова: контрастность, сложность, неоднородность [7, 21];

3) климатические [7, 21, 22, 30]:

– зональные: континентальность климата, широта местности;

– факторы увлажнения: влагообеспеченность, гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК) за период с устойчивой температурой выше 10 °С, коэффициент увлажнения, сумма осадков за год и вегетативный период, сумма осадков за зиму, весну, лето, осень, осадки твердые или запас воды в снеге, осадки жидкие, высота снежного покрова, характер выпадения осадков, индекс аридности (AI);

– почвенно-климатические факторы: средняя температура на поверхности почвы, продолжительность безморозного периода, глубина промерзания почвы, даты промерзания и оттаивания почвы, даты устойчивого прогревания почвы до 5 °С и 10 °С на глубине 5 и 10 см, сумма среднесуточных температур почвы выше 10 °С на глубине 5 и 10 см, период нахождения почв под снегом, продолжительность периода открытой поверхности почвы, запасы продуктивной влаги в слое почвы 0–20 см осенью перед началом сева озимых и в слое 0–100 см весной;

– температурные факторы: температурный режим, среднегодовая температура воздуха, сумма эффективных (активных) температур, сумма температур выше 15 °С, 10 °С и 5 °С за вегетацию, длительность периодов со среднесуточными температурами выше 5 °С, 10 °С и 15 °С, среднемесячные и среднегодовые температуры июля и января (самого теплого и самого холодного месяцев), абсолютные минимум и максимум температуры, даты прохождения среднесуточных температур через 0 °С, 5 °С, 10 °С и 15 °С весной и осенью, даты первого осеннего и последнего весеннего заморозков среднегодовые и экстремальные, частота и интенсивность заморозков в мае;

– ветровой режим: годовая роза ветров, средняя скорость ветра в году и в отдельные периоды вегетации, максимальное число дней в году со скоростью ветра более 15 м/с, среднее число дней в году с ветрами более 15 м/с, вероятность скоростей ветра выше 5 м/с в отдельные периоды вегетации; число дней в году со скоростью ветра выше 5 м/с;

– показатели условий перезимовки культур: даты установления и схода снежного покрова, средняя высота снежного покрова, влажность почвы перед промерзанием и установлением устойчивого снежного покрова, вероятность наступления оттепелей, число дней в году с оттепелями, продолжительность оттепелей;

– факторы негативных погодных явлений: вероятность выпадения ливней и сильных дождей в отдельные периоды, количество ливней в год, число дней в году с ливнями и сильными дождями, средневозвешенная интенсивность ливней; число дней с атмосферной засухой (продолжительность засух), вероятность проявления засух в отдельные периоды вегетации, в том числе в июле; среднегодовая продолжительность пыльных бурь, среднее число пыльных бурь в год, средняя скорость ветра во время пыльных бурь, эрозионная способность пыльных бурь, среднее многолетнее число метелей в году; вероятность суховея в отдельные периоды; число дней в году с суховеями; длительность суховея;

4) геоморфологические и морфометрические: формы мезо- и микрорельефа, коэффициент горизонтального расчленения, коэффициент вертикального расчленения, форма, кривизна, крутизна, экспозиция, длина склонов, коэффициент овражности и плотности оврагов [7, 18, 22, 29, 31];

5) геологические и гидрогеологические: гидрогеологический режим, уровень, состав, проточность грунтовых вод, тектоническое строение, генетические типы отложений, геологические фации и фациальные комплексы, поемность [7, 22, 29];

6) экологические: эрозионное состояние, фактическая и потенциальная эродированность, деградация земель, доля подверженных дефляции земель, радиационное загрязнение, индекс разнообразия Симпсона (при оценке биоразнообразия), соотношение типов земель (угодий), эколого-хозяйственный баланс, коэффициенты относительной напряженности, естественной защищенности территории, коэффициента экологической стабилизации, содержание тяжелых металлов, содержание радионуклидов [8, 11, 21–23, 32];

7) агрохимические: емкость катионного обмена, кислотность (pH_{KCl}), содержание гумуса и мощность гумусового горизонта, содержание подвижных форм фосфора (P_2O_5) и калия (K_2O), актуальная щелочность, потенциальная кислотность, гипсоносность, солонцеватость, засоленность [7–9, 22];

8) агрохозяйственные и мелиоративные: окультуренность, уровень плодородия, конфигурация, контурность, удельный периметр рабочих участков, освоенность территории, распаханность, каменистость,

скелетность, порозность, пористость, плотность сложения, наличие плужной подошвы, пластичность, липкость, набухание, усадка, связность, твердость (или сопротивление пенетрации) и удельное сопротивление при обработке, закустаренность, доля мелиорированной пашни, площадь пригодной для сельскохозяйственного использования пашни, залесенность (лесистость), доля естественных сенокосов, доля естественных пастбищ [7, 8];

9) социальные: транспортная инфраструктура, демографические характеристики [8];

10) экономические: кадастровая стоимость, инвестиции в сельское хозяйство [8].

С точки зрения лимитирующего влияния на возделывание сельскохозяйственных культур и возможностей их преодоления, агроэкологические факторы разделяются на четыре группы: управляемые, регулируемые, ограниченно регулируемые и нерегулируемые, а по характеру природных ограничений пригодности земель для возделывания конкретных культур или групп культур и характеру мероприятий по их преодолению или адаптации ранжируются по шести категориям [22].

Таким образом, для почвенно-агроэкологической оценки агроландшафтов Беларуси предлагается использовать группы климатических, почвенных, геоморфологических и морфометрических, экологических, агрохимических, агрохозяйственных и мелиоративных факторов.

Методика и материалы исследования. В общем виде предлагаемая методика количественной оценки почвенно-агроэкологического потенциала агроландшафтов включает четыре этапа (рис. 1).

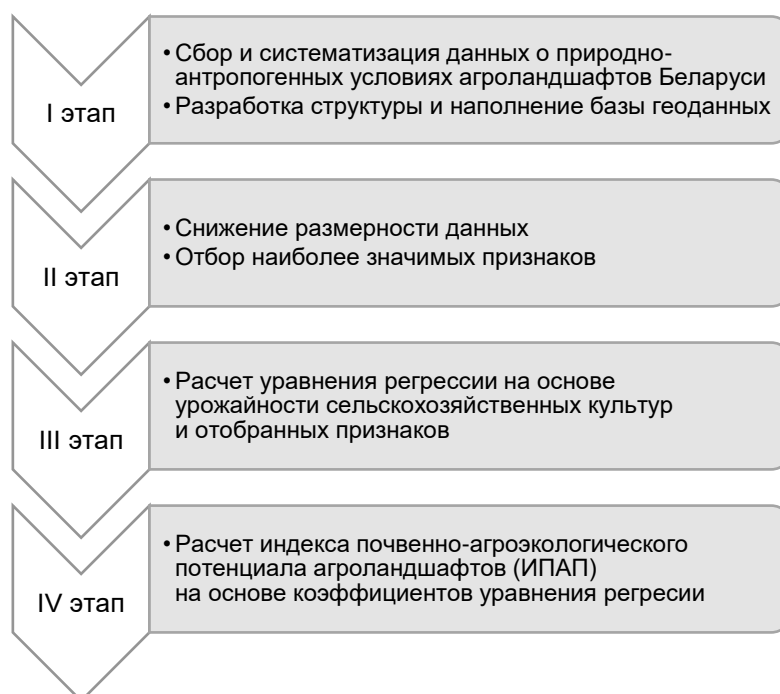


Рис. 1. Концептуальная модель оценки почвенно-агроэкологического потенциала агроландшафтов

Fig. 1. The conceptual model for assessing the soil-agroecological potential of agricultural landscapes

На первом этапе оценки осуществляются сбор и систематизация данных об агроландшафтах для последующего анализа. В основе предлагаемой методики оценки почвенно-агроэкологического потенциала агроландшафтов Беларуси лежит база данных, структура и методика создания которой представлена в наших публикациях [33]. Отметим, что на данном этапе важно охватить как можно большее число исходных независимых переменных (признаков), что в дальнейшем позволит обоснованно отобрать из них наиболее важные. В работе анализируется 127 исходных признаков по 1316 агроландшафтам – операционно-территориальным единицам исследования (ОТЕ).

Для целей настоящего исследования под *агроландшафтом* понимается пространственно организованная природно-хозяйственная геосистема, функционирующая в границах современного сельскохозяйственного землепользования (как элементарная информационная ОТЕ), характеризующаяся сочетанием пространственно-сопряженных и функционально однородных природно-территориальных комплексов, систем использования земель и примерно равным уровнем энергетических затрат, отражающих уровень интенсивности сельскохозяйственного производства [33]. Границами современного землепользования выступают границы сельскохозяйственных предприятий Беларуси, которые

рассматриваются как локальный центр концентрации и управления антропогенной энергией, тогда как окружающий природный ландшафт выступает пространством ее трансформации и диссипации. Границы сельскохозяйственного предприятия, таким образом, определяют пределы управляемого антропогенного воздействия на ландшафт, направленного на достижение максимальной сельскохозяйственной продуктивности при заданном уровне интенсивности землепользования.

На втором этапе оценки осуществляется снижение размерности данных и статистически обоснованный отбор показателей – предикторов уравнения регрессии. В качестве предикторов из исходных 127 отобрано 24 признака, выделенных на основе корреляционного и компонентного (факторного) анализа методом главных компонент в соответствии с методикой, представленной в работах [33, 34]. Отобранные признаки характеризуют природно-антропогенные факторы формирования и функционирования агроландшафтов:

а) агроклиматические факторы (6 признаков): средняя температура января, индекс континентальности, количество осадков за год, продолжительность безморозного периода на почве, продолжительность периода с средней суточной температурой выше 10 °С, ГТК за период с устойчивой температурой выше 10 °С;

б) почвенно-эрозионные факторы (3 признака): длина склонов, общая доля эродированных земель и доля земель с высоким уровнем дефляционной опасности в структуре земельного фонда агроландшафтов;

в) почвенно-экологические факторы (11 признаков) представлены долей в структуре земель агроландшафтов: дерновых заболоченных, зональных типов почв; почв тяжелого гранулометрического состава; переувлажненных почв и гидроморфных почв; почв моренного, водно-ледникового, лёссового и лёссовидного генезиса; почв с однородным и с двухчленным строением профиля; почв с подстилкой связными породами;

г) почвенно-структурные факторы (4 признака): индекс видового разнообразия Маргалефа, индекс дробности ЭПА, дифференциация величины почвенных контуров, коэффициент контрастности почвенного покрова по Ю. К. Юодису.

На третьем этапе оценки производится регрессионный анализ методом множественной линейной регрессии. Отметим, что компонентного анализа по группам признаков может оказаться недостаточно, в таком случае стоит рассмотреть другие методы регрессионного анализа, например метод частичных наименьших квадратов или гребневую регрессию (ridge-регрессию). Расчеты выполнены в программном обеспечении статистической обработки данных IBM SPSS Statistics 26. Исходя из подхода к оценке природных условий через продуктивность сельскохозяйственных культур, в качестве зависимой переменной уравнений регрессии выбрана урожайность сельскохозяйственных культур. В качестве предикторов в нашем исследовании выступают признаки, отобранные на предыдущем этапе, однако могут быть использованы и собственные значения компонент.

На четвертом этапе оценки осуществляется количественная оценка потенциала агроландшафтов Беларуси, для этого предлагается использовать индекс почвенно-агроэкологического потенциала агроландшафтов (ИПАП), рассчитанный на основе значимых коэффициентов уравнений регрессии, собственные значения которых нормированы в шкалу 0...1 методом минимакс.

Расчет ИПАП производится по формуле

$$A = 10 + k + \sum (x_i x_i')^2,$$

где A – индекс почвенно-агроэкологического потенциала; 10 – константа; k – свободный член; x_i – нормированное собственное значение признака i ; x_i' – соответствующий коэффициент уравнения регрессии для признака i .

Константа 10 введена для обеспечения положительных значений индекса, возведение в квадрат – для удобства его интерпретации.

Результаты и их обсуждение. Для примера расчета ИПАП в качестве зависимой переменной нами использованы урожайность группы зерновых и зернобобовых культур по данным Национального статистического комитета Беларуси на период 1995–2024 гг. с пятилетними интервалами и среднегодовая урожайность за тот же период. Выбор культур обусловлен тем, что зерновые и зернобобовые являются основной группой сельскохозяйственных культур Беларуси [35]. Поскольку статистические данные об урожайности культур агрегированы по административным районам, средние значения урожайности использованы для всех ОТЕ исследования, расположенных в соответствующих районах.

Дисперсионный анализ моделей регрессии для каждого временного интервала представлен в табл. 1, анализируя которую можно отметить, что модели регрессии статистически значимы (значимость 0,00 при уровне значимости 0,05). Для всех моделей степени свободы регрессии, остатков и общие составили 24, 1291 и 1315 соответственно.

Таблица 1. Дисперсионный анализ моделей регрессии**Table 1. Analysis of variance of regression models**

Зависимая переменная (урожайность)	Сумма квадратов			Средний квадрат		Критерий Фишера F
	Регрессия	Остатки	Всего	Регрессия	Остатки	
1995 г.	32,03	17,31	49,34	1,34	0,01	99,56
2000 г.	26,89	24,61	51,50	1,12	0,02	58,77
2005 г.	23,31	18,73	42,05	0,97	0,02	66,94
2010 г.	29,17	21,61	50,78	1,22	0,02	72,62
2015 г.	20,93	21,20	42,14	0,87	0,02	53,11
2020 г.	23,51	18,25	41,75	0,98	0,01	69,30
2024 г.	40,44	20,52	60,96	1,69	0,02	106,03
Среднемноголетнее значение	28,06	17,51	45,57	1,17	0,01	86,20

Сумма квадратов регрессии показывает, насколько хорошо модель объясняет вариацию зависимой переменной, остаточная сумма квадратов указывает на вариацию, которую модель не смогла объяснить. Последнюю можно связать, во-первых, с влиянием неучтенных агротехнических факторов – внесения органических и минеральных удобрений, технологий земледелия, а также неблагоприятных погодных явлений в течение года, а во-вторых – с системными ошибками расчета урожайности, ее усреднению по административным районам.

Высокое значение F -статистики (критерий Фишера) указывает на высокую значимость модели, и на то, что модель хорошо подходит для объяснения вариации зависимой переменной во всех периодах.

Табл. 2 позволяет оценить качество модели для каждого временного интервала. R показывает силу линейной связи между предикторами и зависимой переменной. Самая сильная связь отмечается для 2024 г. (0,81), самая слабая – для 2015 г. (0,71). Для среднемноголетнего значения она составляет 0,79, что в целом указывает на сильную или умеренно сильную линейную зависимость.

Таблица 2. Коэффициенты детерминации моделей регрессии**Table 2. Coefficients of determination of regression models**

Зависимая переменная (урожайность)	R	R^2	Скорректиро- ванный R^2	Изменение R^2	Изменение F
1995 г.	0,81	0,66	0,64	0,65	99,56
2000 г.	0,72	0,52	0,51	0,52	58,77
2005 г.	0,74	0,55	0,55	0,55	66,94
2010 г.	0,76	0,57	0,57	0,57	72,62
2015 г.	0,71	0,50	0,49	0,50	53,11
2020 г.	0,75	0,56	0,56	0,56	69,30
2024 г.	0,81	0,66	0,66	0,66	106,03
Среднемноголетнее значение	0,79	0,62	0,62	0,62	86,20

Коэффициент детерминации (R^2) отражает долю вариации зависимой переменной, объясненную моделью. Наибольшее – 0,66 (2024 г.), наименьшее – 0,50 (2015 г.) и среднемноголетнее – 0,62 (62 % вариации) значения указывают на умеренно-высокую объяснительную способность моделей.

Скорректированный R^2 учитывает количество предикторов и размер выборки, предоставляя более консервативную оценку объясненной вариации. Значения скорректированного R^2 близки к R^2 , что говорит об оптимальном количестве предикторов.

Стандартная ошибка показывает среднее отклонение предсказанных значений от наблюдаемых. Наибольшая точность характерна для 1995 г. и среднемноголетних данных, наименьшая – для 2000 г. Стандартная ошибка изменяется в интервале 0,12–0,14.

Изменение R^2 показывает вклад предикторов в объясненную вариацию. Значения совпадают с R^2 . Это указывает на то, что модель включает только значимые предикторы. Изменение F соответствует F -статистике, проверяя значимость добавленных предикторов. Все значения высоки (от 53,11 в 2015 г. до 106,03 в 2024 г.), что подтверждает значимость модели ($p = 0,00$).

Для каждого временного интервала составлены уравнения регрессии, рассчитаны коэффициенты (табл. 3) и почвенно-агроэкологический потенциал агроландшафтов Беларуси (рис. 2).

Таблица 3. Коэффициенты уравнений регрессии почвенно-агроэкологического потенциала

Table 3. Coefficients of regression equations for soil-agroecological potential

Независимая переменная	Зависимая переменная							Сумма квадратов
	1995 г.	2000 г.	2005 г.	2015 г.	2020 г.	2024 г.	Средне-голетнее значение	
Свободный член	1,05	0,78	1,03	0,45	0,71	0,70	0,74	4,53
Средняя температура января	-1,74	–	–	–	-1,52	-2,28	-1,21	11,99
Индекс континентальности	-3,04	-2,70	-1,64	-2,34	-3,56	-4,90	-3,28	72,10
Количество осадков за год	–	–	–	-0,96	–	–	–	0,91
Продолжительность безморозного периода на почве	-0,77	-0,27	-0,39	–	-0,43	-0,65	-0,41	1,60
Продолжительность периода с средней суточной температурой выше 10 °С	4,11	2,97	1,25	2,01	3,32	5,25	3,36	81,16
ГТК за период с температурой выше 10 °С	-0,49	–	-1,33	0,93	-0,95	–	-0,51	4,02
Длина склонов	-0,42	-0,81	-0,57	–	–	–	–	1,16
Общая доля эродированных земель	2,47	1,95	2,26	1,54	0,65	1,03	1,69	21,72
Земли с высоким уровнем дефляционной опасности	–	-0,54	–	–	-0,42	-0,53	-0,31	0,83
Дерновые заболоченные почвы	–	–	-0,54	–	–	–	–	0,29
Зональные типы почв	-1,59	-1,02	-1,43	–	–	-0,99	-0,83	7,27
Почвы тяжелого гранулометрического состава	-0,28	-0,27	–	–	-0,28	-0,44	-0,30	0,51
Переувлажненные почвы	-0,86	-0,69	-1,55	-0,80	-0,64	-0,81	-0,90	6,10
Гидроморфные почвы	-1,73	-2,12	-2,36	-1,13	-1,12	-1,54	-1,66	20,68
Почвы на моренных отложениях	–	–	0,30	–	–	–	–	0,09
Почвы на водно-ледниковых отложениях	–	-0,15	0,14	-0,13	–	0,18	–	0,09
Почвы на лёссовых и лёссовидных отложениях	0,52	0,36	0,91	0,34	0,74	0,93	0,70	3,23
Почвы с однородным строением профиля	–	0,67	–	0,99	0,96	–	0,49	2,58
Почвы с двухчленным строением профиля	-0,24	–	-0,47	0,29	–	–	–	0,36
Подстиление связными породами	0,20	0,27	0,41	–	–	–	–	0,28
Индекс видового разнообразия Маргалефа	–	–	0,67	–	1,08	1,04	0,69	3,15
Индекс дробности	-3,72	-3,25	-3,90	-2,40	-1,77	-1,89	-2,95	60,75
Дифференциация величины ЭПА	–	-0,57	–	–	-0,45	–	–	0,52
Коэффициент контрастности	–	–	–	–	-0,44	-0,38	–	0,34

Примечание. Статистически незначимые коэффициенты отмечены прочерком.

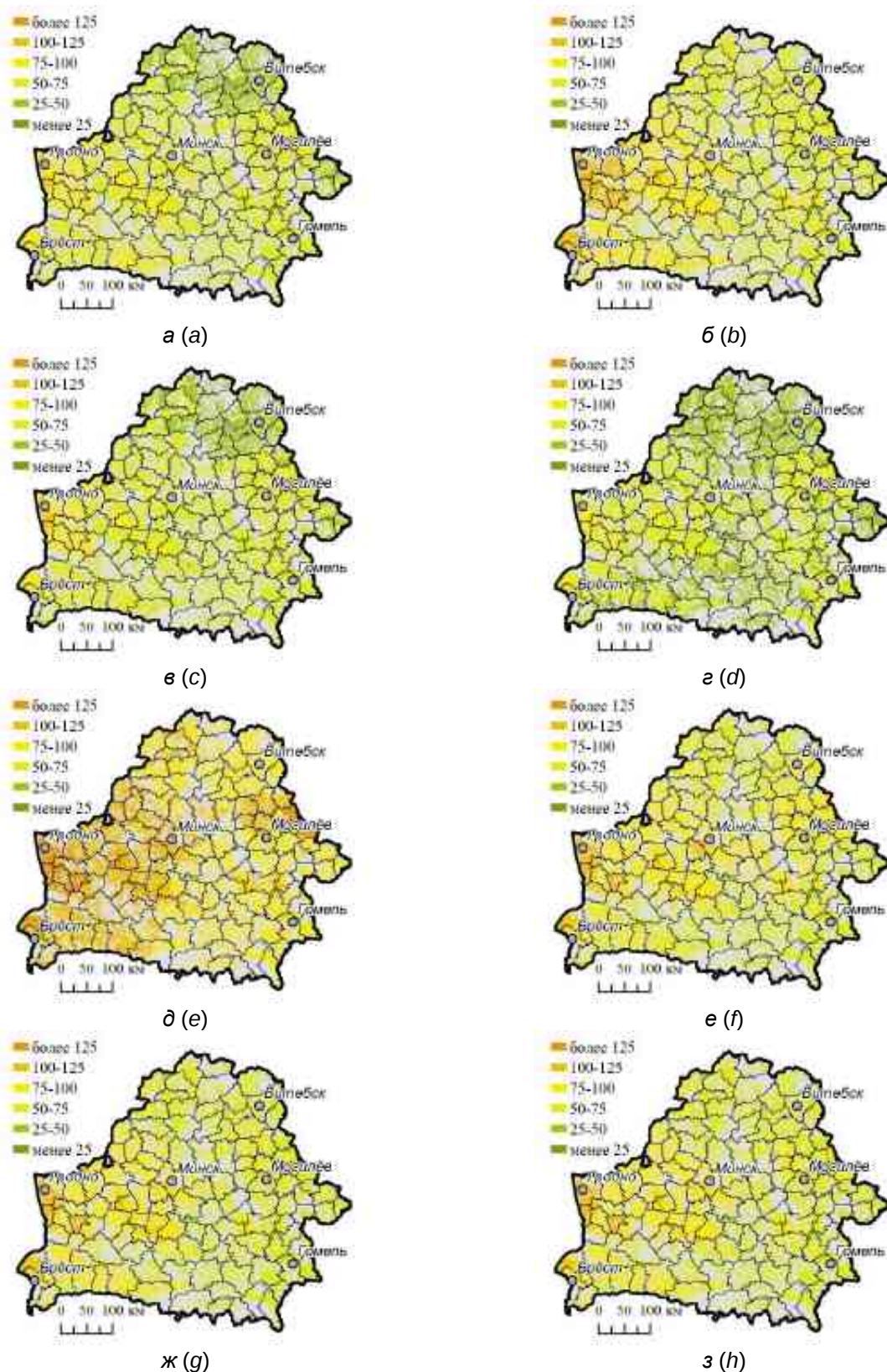


Рис. 2. Индекс почвенно-агроэкологического потенциала агроландшафтов Беларуси:
а – 1995 г.; б – 2000 г.; в – 2005 г.; г – 2010 г.; д – 2015 г.;
е – 2020 г.; ж – 2024 г.; з – среднее за период 1995–2024 гг.

Fig. 2. Index of soil and agroecological potential of agricultural landscapes of Belarus:
a – 1995; b – 2000; c – 2005; d – 2010; e – 2015; f – 2020; g – 2024; h – average for 1995–2024

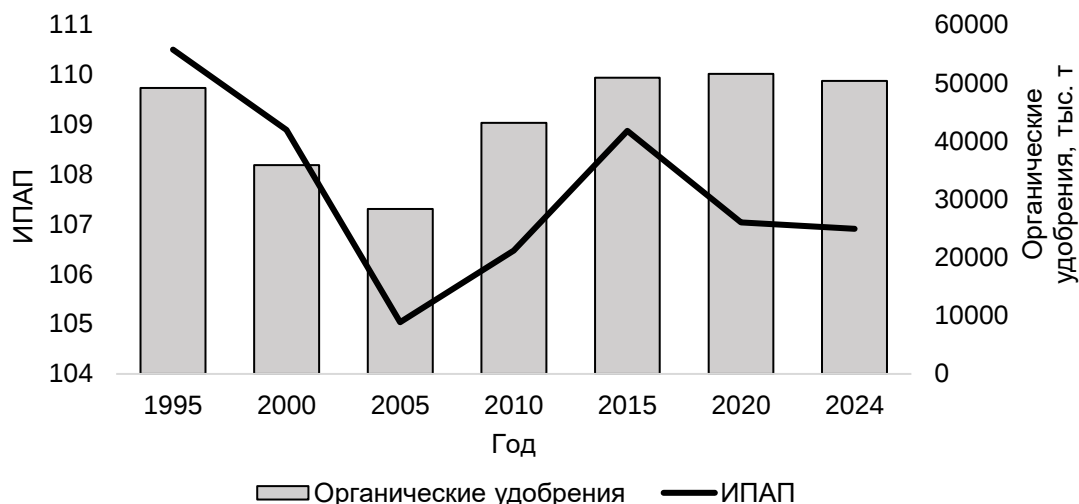


Рис. 3. Динамика среднего по Беларуси индекса почвенно-агроэкологического потенциала агроландшафтов в контексте внесения органических удобрений

Fig. 3. Dynamics of the average for Belarus index of soil-agroecological potential of agricultural landscapes in the context of organic fertilizer application

Установлено, что вне зависимости от года наблюдения статистически устойчивое влияние оказывают следующие группы факторов: климатические – индекс континентальности (стабильно отрицательное влияние), продолжительность периода с температурой выше 10 °С (стабильно положительное влияние); почвенные – переувлажненные и гидроморфные почвы (устойчиво отрицательное влияние), почвы на лёссовых и лёссовидных отложениях (устойчиво положительное влияние); почвенно-гетерогенные – индекс дробности почвенного покрова (устойчиво отрицательное влияние).

Сравнительный анализ регрессионных моделей свидетельствует о наличии устойчивой инвариантной структуры факторов, определяющих пространственно-временную дифференциацию урожайности группы зерновых и зернобобовых сельскохозяйственных культур на территории Беларуси, а также о существенной трансформации роли отдельных факторов во времени.

Сумма квадратов коэффициентов позволяет выявить иерархическую структуру влияния факторов на почвенно-агроэкологический потенциал агроландшафтов и определить устойчивое факторное ядро, отражающее совокупное действие на потенциал агроландшафтов. Системное влияние – сумма квадратов более 60 – оказывают факторы продолжительности периода с средней суточной температурой выше 10 °С, индекс континентальности и индекс дробности почвенного покрова. Значительное влияние – сумма квадратов 20–21 – оказывают лимитирующие факторы эрозийного состояния и гидроморфизма почв. Умеренное влияние – сумма квадратов 6–20 – оказывают факторы условий перезимовки культур (средняя температура января), зональные и переувлажненные почвы. Сумма квадратов коэффициентов остальных факторов сопоставима с суммой квадратов свободного члена – около 4 и менее, и не играет определяющей роли.

Среднегодовое значение ИПАП агроландшафтов в среднем по Беларуси (см. рис. 2, 3) составляет 74,6 пункта индекса. Максимум наблюдается в 2015 г. – в среднем по стране 102,4 пункта ИПАП, абсолютный максимум – 153,4 пункта ИПАП. Минимум наблюдается в 2010 г. – в среднем 52,9 пункта ИПАП, абсолютный минимум по стране – 14,7 пункта ИПАП.

Анализ пространственно-временной динамики ИПАП агроландшафтов Беларуси позволяет выявить ряд тенденций (рис. 2, 3). Снижение уровня ИПАП в 2005 г. до среднего по стране значения 105,0 можно связать с минимальным за весь период наблюдения уровнем внесения органических удобрений в сельскохозяйственных организациях страны (28 млн т, или 3,8 т/га), которые имеют наиболее стабильную связь с урожайностью [36]. После 2015 г. ИПАП демонстрирует снижение – с 108,9 до 106,9 на фоне стабильного внесения органических удобрений и сниженного внесения минеральных, что может быть связано с климатообусловленным снижением урожайности, особенно в южных регионах страны [37].

Почвенно-агроэкологический потенциал агроландшафтов Беларуси проанализирован в разрезе физико-географических районов страны (рис. 4), которые соответствуют схеме районирования Национального атласа Беларуси [38].

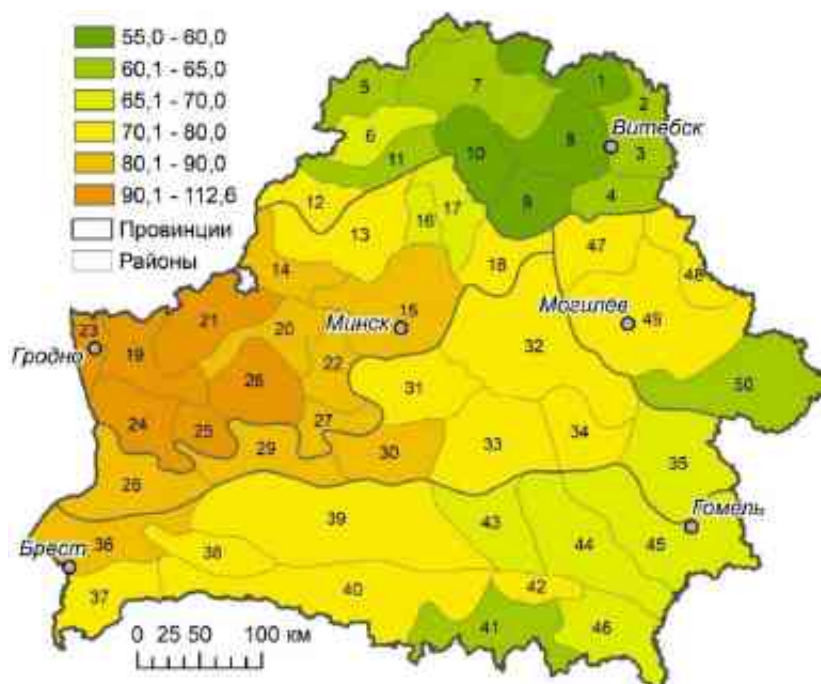


Рис. 4. Среднегодовое почвенно-агроэкологическое потенциальное агроландшафтов физико-географических районов Беларуси, пункты ИПАП.

- Белорусская Поозерская провинция:** 1 – Нещердо-Городокская возвышенность; 2 – Суражская равнина; 3 – Витебская возвышенность; 4 – Лучоская равнина; 5 – Освейско-Браславские гряды; 6 – Дисненская низина; 7 – Полоцкая низина; 8 – Шумилинская равнина; 9 – Чашникская равнина; 10 – Ушачско-Лепельская возвышенность; 11 – Свенцянские гряды; 12 – Нарочанская равнина.
- Западно-Белорусская провинция:** 13 – Вилейская низина; 14 – Ошмянская возвышенность; 15 – Минская возвышенность; 16 – Докшицкая равнина; 17 – Верхнеберезинская равнина; 18 – Борисовская возвышенная равнина; 19 – Средненеманская низина; 20 – Верхненеманская низина; 21 – Лидская равнина; 22 – Столбцовская равнина; 23 – Гродненская возвышенность; 24 – Волковысская возвышенность; 25 – Слонимская возвышенность; 26 – Новогрудская возвышенность; 27 – Копыльская гряда.
- Предполеская провинция:** 28 – Пружанская равнина; 29 – Барановичская равнина; 30 – Слуцкая равнина; 31 – Пуховичская равнина; 32 – Центральноберезинская равнина; 33 – Бобруйская равнина; 34 – Кличевско-Рогачевская равнина; 35 – Чечерская равнина.
- Полеская провинция:** 36 – Высоковская равнина; 37 – Малоритская равнина; 38 – Равнина Загородье; 39 – Ясельдинско-Слуцкая низина; 40 – Среднеприпятская низина; 41 – Лельчицкая равнина; 42 – Мозырско-Юровичская возвышенность; 43 – Копаткевичская равнина; 44 – Василевичская низина; 45 – Речицко-Сожская низина; 46 – Комаринская низина.
- Восточно-Белорусская провинция:** 47 – Оршанская возвышенность; 48 – Горецко-Мстиславская возвышенность; 49 – Оршано-Могилёвская равнина; 50 – Костюковичская равнина

Fig. 4. Long-term average soil-agroecological potential of agrolandscapes in the physical-geographical regions of Belarus, ISAP.

- Belarusian Poozerskaya Province:** 1 – Neshcherdo-Gorodokskaya Upland; 2 – Surazhskaya Plain; 3 – Vitebskaya Upland; 4 – Luchoskaya Plain; 5 – Osveyskaya-Braslavskaya Ridges; 6 – Disnenskaya Lowland; 7 – Polotskaya Lowland; 8 – Shumilinskaya Plain; 9 – Chashnikskaya Plain; 10 – Ushachsko-Lepelskaya Upland; 11 – Svetsyanskiye Ridges; 12 – Narochanskaya Plain.
- Western Belarusian Province:** 13 – Vileyskaya Lowland; 14 – Oshmyanskaya Upland; 15 – Minskaya Upland; 16 – Dokshytskaya Plain; 17 – Verkhneberezhinskaya Plain (Upper Berezina Plain); 18 – Borisovskaya Elevated Plain; 19 – Srednenemanskaya Lowland (Middle Neman Lowland); 20 – Verkhnenemanskaya Lowland (Upper Neman Lowland); 21 – Lidskaya Plain; 22 – Stolbtsovskaya Plain; 23 – Grodnenskaya Upland; 24 – Volkovyskaya Upland; 25 – Slonimskaya Upland; 26 – Novogrudskaya Upland; 27 – Kopylskaya Ridge.
- Pre-Polesye (Predpoleskaya) Province:** 28 – Pruzhanskaya Plain; 29 – Baranovichskaya Plain; 30 – Slutskaya Plain; 31 – Pukhovichi Plain; 32 – Tsentralnoberezhinskaya Plain (Central Berezina Plain); 33 – Bobruiskaya Plain; 34 – Klichevsko-Rogachevskaya Plain; 35 – Checherskaya Plain.
- Polesye Province:** 36 – Vysokovskaya Plain; 37 – Maloritskaya Plain; 38 – Zagorodye Plain; 39 – Yaseldinsko-Slutskaya Lowland; 40 – Srednepripyatskaya Lowland (Middle Pripyat Lowland); 41 – Lelchitskaya Plain; 42 – Mozyrsko-Yurovichskaya Upland; 43 – Kopatkevichskaya Plain; 44 – Vasilevichskaya Lowland; 45 – Rechitsko-Sozhskaya Lowland; 46 – Komarinskaya Lowland.
- Eastern Belarusian Province:** 47 – Orshanskaya Upland; 48 – Goretsko-Mstislavskaya Upland; 49 – Orshano-Mogilevskaya Plain; 50 – Kostyukovichskaya Plain

ИПАП характеризуется выраженной географической дифференциацией. Наиболее высокий потенциал отмечается на западе страны, в районах Западно-Белорусской и Полесской физико-географических провинций, что обусловлено сочетанием благоприятных почвенных и климатических факторов, создающих условия для интенсивного сельскохозяйственного производства. В центральной части Беларуси потенциал умеренный, наблюдаются отдельные очаги с высоким потенциалом на Слуцкой равнине, Копыльской гряде. На востоке и севере страны, в особенности Поозерье, востоке Полесской провинции преобладают агроландшафты с низким потенциалом, что обусловлено менее благоприятными условиями для сельского хозяйства.

Наибольшим среднемноголетним значением ИПАП характеризуется Гродненская возвышенность – 112,6 пункта индекса. Высокий потенциал – 90,0 пункта индекса и более – наблюдается у агроландшафтов Волковысской, Слонимской, Новогрудской возвышенностей, Средненеманской низины. Наименьшим среднемноголетним потенциалом агроландшафтов характеризуется Нещердо-Городокская возвышенность – 55,0 пункта индекса.

Разброс значений ИПАП по физико-географическим районам Беларуси в среднем составляет 12 пунктов. Наиболее однородные показатели с размахом значений менее 3,0 характерны для Речицко-Сожской и Василевичской низин, Ушачско-Лепельской возвышенности. Наибольший размах индекса характерен для Пружанской и Барановичской равнин, Ясельдинско-Случеской низины – более 20 пунктов индекса.

Заключение. Агроэкологическая оценка является основой определения продуктивного потенциала агроландшафтов и оптимизации землепользования. Оценка продуктивности ландшафтов Беларуси показывает, что агроэкологические условия страны позволяют возделывать широкий набор культур, есть резервы для повышения их урожайности [30].

Полученные нами уравнения регрессии не противоречат известным моделям [4], поскольку предусматривают природно-антропогенные факторы, определяющие производительную способность культур, без учета мелиоративного состояния земель, внесения удобрений и применяемых агротехнологий. По некоторым оценкам, до 80 % прироста урожайности в Беларуси обеспечивается применением органических и минеральных удобрений в сочетании с известкованием [39]. Также более ранними исследованиями установлено, что для территории Беларуси климатические факторы демонстрируют слабую и умеренную корреляционную связь с урожайностью основных культур [40, 41], однако последние работы указывают на существенное климатообусловленное снижение урожайности [37] и возможность его прогнозирования с учетом погодных факторов [41]. По расчетам Г. И. Сачка, урожайность основных сельскохозяйственных культур определяют почвы – на 34 %, климатическая составляющая – на 28 % и удобрения – на 37 % [39]. Д. А. Иванову с соавторами удалось установить влияние почв и рельефа на урожайность на уровне по 27 % на каждый фактор [2], что соответствует полученным нами результатам.

Разработанная методика более полно учитывает гетерогенность почвенного покрова, что дает основание говорить о почвенно-агроэкологической оценке агроландшафтов. Методика позволяет получать статистически обоснованные результаты и может быть адаптирована под другие культуры. Рассчитанные значения ИПАП имеют сильную положительную корреляцию (0,7) с баллом почвенного плодородия и баллом кадастровой оценки сельскохозяйственных земель агроландшафтов.

Выявлены пространственно-временные особенности дифференциации ИПАП Беларуси. Наиболее высокий потенциал отмечается на Гродненской возвышенности, низкий – на Нещердо-Городокской возвышенности.

Список использованных источников

1. Витченко, А. Н. Теоретические и прикладные аспекты исследования агроэкологического потенциала ландшафтов Беларуси / А. Н. Витченко, М. Н. Брилевский // Выбранные научные работы Белорусского государственного университета, 1921–2001 : в 7 т. / Бел. гос. ун-т. – Мн., 2001. – Т. 7 : Биология. География. – С. 357–379.
2. Иванов, Д. А. Исследование влияния почвенного покрова и рельефа на продуктивность культур / Д. А. Иванов, О. В. Карасева, М. В. Рублюк // Достижения науки и техники АПК. – 2021. – Т. 35, № 2. – С. 19–26.
3. Раменский, Л. Г. Проблемы и методы изучения растительного покрова : избр. работы / Л. Г. Раменский ; ред.: В. И. Василевич [и др.]. – Л. : Наука, Ленингр. отд-ние, 1971. – 334 с.
4. Яцухно, В. М. Агроресурсный потенциал административных районов Беларуси: оценка состояния и современное использование / В. М. Яцухно // Вестник БГУ. Серия 2, Химия. Биология. География. – 2016. – № 3. – С. 144–148.
5. Методика агроэкологической оценки почвенно-ресурсного потенциала эрозийных и заболоченных агроландшафтов северной, центральной и южной провинций Беларуси / Н. Н. Цыбулько, А. М. Устинова, В. Б. Цырибко [и др.]. – Мн. : Ин-т систем. исслед. в АПК НАН Беларуси, 2020. – 20 с.

6. Лысанова, Г. И. Ландшафтный анализ агроприродного потенциала геосистем / Г. И. Лысанова ; отв. ред. Ю. М. Семенов. – Иркутск : Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2001. – 188 с.
7. Кирюшин, В. И. Методология комплексной оценки сельскохозяйственных земель / В. И. Кирюшин // Почвоведение. – 2020. – № 7. – С. 871–879.
8. Белоусов, А. О. Метод расчета интегральных показателей качества и рационального использования земель сельскохозяйственного назначения в QGIS / А. О. Белоусов, В. Л. Богданов // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2022. – Т. 27, № 5. – С. 160–172.
9. Дыдышко, С. В. Агроэкологическая оценка пригодности почв пахотных земель Мстиславского района для возделывания зерновых культур / С. В. Дыдышко, Т. Н. Азарёнок, О. В. Матыченкова // Почвоведение и агрохимия. – 2022. – № 1 (68). – С. 7–20.
10. Нежевляк, О. В. Агроэкологическая оценка почвенного покрова Саргатского района Омской области / О. В. Нежевляк, Е. В. Свиницкая // Вестник Омского государственного аграрного университета. – 2015. – № 1 (17). – С. 28–32.
11. Будрицкая, И. А. Агроэкологическая оценка почв сухостепной Кулунды / И. А. Будрицкая, В. Л. Татаринцев, Л. М. Татаринцев // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2015. – № 11 (133). – С. 42–50.
12. Агроэкологическая оценка комплексных соединений почв / В. И. Савич, С. Л. Белопухов, В. А. Седых, Д. Н. Никиточкин // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. – 2013. – № 6. – С. 5–11.
13. Дитц, Л. Ю. Агроэкологическая группировка почв как один из путей рационального использования земель / Л. Ю. Дитц, Н. Л. Билецкая // Гео-Сибирь. – 2007. – Т. 2, № 1. – С. 149–151.
14. Анализ методик бонитировки почв и оценки продуктивности земель / И. Б. Усков, О. В. Кононенко, П. А. Суханов, А. О. Усков // Агрохимический вестник. – 2023. – № 5. – С. 81–89.
15. Кирюшин, В. И. Агроэкологический мониторинг земель, новые требования и методология / В. И. Кирюшин // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2007. – № 3 (15). – С. 9–11.
16. Лихацевич, Н. А. Типология дефляционноопасных земель Полесья и их использование / Н. А. Лихацевич, Ю. П. Качков, А. Ф. Черныш // Почвоведение и агрохимия. – 2011. – № 2 (47). – С. 52–61.
17. Гопп, Н. В. Агроэкологический потенциал западной части Кузнецко-Салаирской геоморфологической провинции: методика цифрового картографирования, геопространственный анализ, корреляция с содержанием органического углерода в почвах / Н. В. Гопп // Почвы и окружающая среда. – 2023. – Т. 6, № 3. – URL: <https://soils-journal.ru/index.php/POS/article/view/224> (дата обращения: 26.12.2025).
18. Санжаров, А. И. К вопросу использования ГИС-технологий для агроэкологической оценки земель в адаптивно-ландшафтных системах земледелия / А. И. Санжаров, Г. П. Глазунов, Ю. А. Соловьёва // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2019. – № 7. – С. 24–32.
19. Ключникова, Е. В. Методические подходы к расчету интегрального показателя, методы ранжирования / Е. В. Ключникова, Е. М. Шитова // Инноцентр. – 2016. – № 1 (10). – С. 4–18.
20. Использование почвенно-агроклиматического индекса при оценке агрономического потенциала пахотных земель в лесостепной зоне России / Д. С. Булгаков, Д. И. Рухович, Е. А. Шишконокова, Е. В. Вильчевская // Почвоведение. – 2018. – № 4. – С. 473–485.
21. Рейнгард, Я. Р. Методика агроэкологической оценки почвенного покрова Омской области / Я. Р. Рейнгард, О. В. Нежевляк // Омский научный вестник. – 2006. – № 7 (43). – С. 150–152.
22. Кирюшин, В. И. Агротехнологии / В. И. Кирюшин, С. В. Кирюшин. – СПб. : Лань, 2022. – 464 с.
23. Панасюк, О. Ю. Методические подходы к оценке агроэкологического состояния почвенного покрова Беларуси и некоторые предварительные результаты исследований / О. Ю. Панасюк, Н. А. Дятлова // Структура и морфогенез почвенного покрова в условиях антропогенного воздействия : материалы Междунар. науч.-практ. конф., 17–20 сент. 2013 г. / Бел. гос. ун-т [и др.] ; редкол.: И. И. Пирожник (гл. ред.) [и др.]. – Мн., 2013. – С. 41–43.
24. Белорусское Поозерье: анализ эколого-мелиоративного состояния / В. С. Аношко, М. Н. Брилевский, Ю. П. Качков [и др.]. – Мн. : Университетское, 1992. – 156 с.
25. Оценка потенциала почвенно-земельных ресурсов сельскохозяйственных организаций Беларуси с применением ГИС и использование ее результатов при оптимизации землепользования / А. Ф. Черныш, Т. А. Романова, А. Н. Червань, С. А. Касьянчик // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2011. – № 3. – С. 10–20.
26. Методика анализа структуры почвенного покрова для проектирования адаптивно-ландшафтных систем земледелия в типовых районах и сельхозорганизациях / Д. В. Матыченков, Т. Н. Азаренок, О. В. Матыченкова [и др.]. – Мн. : Ин-т систем. исслед. в АПК НАН Беларуси, 2024. – 47 с.
27. Червань, А. Н. Типизация структуры почвенного покрова средствами ГИС для оценки производительного потенциала агроландшафтов (на примере Республики Беларусь) / А. Н. Червань // Вестник Удмуртского университета. Серия «Биология. Науки о Земле». – 2021. – Т. 31, № 3. – С. 280–289.
28. Новиков, Д. В. Агроэкологическая типизация земель как информационная основа современного землеустройства / Д. В. Новиков // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. – 2010. – № 1 (61). – С. 29–35.
29. Бойко, О. С. Базовые параметры агроэкологического мониторинга агроландшафтов ЦЧР / О. С. Бойко, И. И. Васенев // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2007. – № 10 (74). – С. 103–109.
30. Витченко, А. Н. Агроэкологические ресурсы ландшафтов Белоруссии / А. Н. Витченко // Вестник БГУ. Серия 2, Химия. Биология. География. – 1987. – № 3. – С. 59–63.
31. Лебедева, И. И. Субстантивно-генетическая основа оценки педоразнообразия / И. И. Лебедева, Т. В. Королук // Почвоведение – продовольственной и экологической безопасности страны : тез. докл. VII съезда О-ва почвоведов им. В. В. Докучаева и Всерос. с междунар. участием науч. конф., Белгород, 15–22 авг. 2016 г. :

- в 2 ч. / О-во почвоведов им. В. В. Докучаева, Белгор. гос. нац. исслед. ун-т ; отв. ред.: С. А. Шоба, И. Ю. Савин. – М. ; Белгород, 2016. – Ч. 2. – С. 187–188.
32. Юртаев, А. А. Агроландшафтные исследования: теория и практика / А. А. Юртаев // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия «Естественные науки». – 2011. – № 15 (110). – С. 217–221.
 33. Сазонов, А. А. Почвенно-агроэкологическая типология агроландшафтов Беларуси / А. А. Сазонов // Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология. – 2025. – № 2. – С. 3–15.
 34. Сазонов, А. А. Типология агроландшафтов Республики Беларусь по агроклиматическому потенциалу на основе кластерного анализа / А. А. Сазонов, А. Л. Киндеев // Земля Беларуси. – 2025. – № 3 (91). – С. 51–61.
 35. Оценка почвенно-ресурсного потенциала пахотных земель сельскохозяйственных организаций Беларуси / Л. И. Шибут, Т. Н. Азаренок, О. В. Матыченкова [и др.] // Почвоведение и агрохимия. – 2019. – № 2 (63). – С. 15–23.
 36. Клебанович, Н. В. Сопряженность изменений урожайности зерновых и зернобобовых культур и уровня применения удобрений по районам Республики Беларусь / Н. В. Клебанович, А. Л. Киндеев // Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология. – 2022. – № 1. – С. 15–27.
 37. Коляда, В. В. Влияние изменения климата на динамику урожайности зерновых культур в регионах Беларуси / В. В. Коляда // Природопользование. – 2025. – № 1. – С. 17–26.
 38. Нацыянальны атлас Беларусі / Белкартаграфія ; гал. рэдкал.: У. Р. Гусакоў [і інш.] ; навук. рэд. раздз.: А. А. Каваленя [і інш.]. – Мн. : Белкартаграфія, 2024. – 1 атл. (348 с.).
 39. Сачок, Г. И. Факторы и модели изменчивости урожайности сельскохозяйственных культур Беларуси / Г. И. Сачок, Г. А. Камышенко. – Мн. : Бел. навука, 2006. – 242 с.
 40. Дмитриенкова, Ю. А. Вариация гидротермического коэффициента на территории Беларуси и его влияние на урожайность культур / Ю. А. Дмитриенкова // Природопользование : сб. науч. тр. / НАН Беларуси, Ин-т проблем использования природ. ресурсов и экологии. – Мн., 2006. – № 12. – С. 40–44.
 41. Клочков, А. В. Влияние погодных условий на урожайность сельскохозяйственных культур / А. В. Клочков, О. Б. Соломко, О. С. Клочкова // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2019. – № 2. – С. 101–105.

References

1. Vitchenko A. N., Brilevskii M. N. *Teoreticheskie i prikladnye aspekty issledovaniya agroekologicheskogo potentsiala landshaftov Belarusi* [Theoretical and applied aspects of the study of agroecological potential of landscapes in Belarus]. *Vybrannye nauchnye trudy Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta*, 1921–2001: v 7 t. = Selected Scientific Works of Belarusian State University, 1921–2001: in 7 vol., 2001, vol. 7: *Biologiya. Geografiya* = Biology. Geography, pp. 357–379. (in Russian)
2. Ivanov D. A., Karaseva O. V., Rublyuk M. V. *Issledovanie vliyaniya pochvennogo pokrova i rel'efa na produktivnost' kul'tur* [Study of the influence of soil cover and relief on crop productivity]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK = Achievements of Science and Technology of the Agro-Industrial Complex*, 2021, vol. 35, no. 2, pp. 19–26. (in Russian)
3. Ramenskii L. G. *Problemy i metody izucheniya rastitel'nogo pokrova* [Problems and methods of studying vegetation cover]. Leningrad, Nauka, Leningr. otd-nie Publ., 1971, 334 p. (in Russian)
4. Yatsukhno V. M. *Agroresursnyi potentsial administrativnykh raionov Belarusi: otsenka sostoyaniya i sovremennoe ispol'zovanie* [Agroresource potential of administrative districts of Belarus: state assessment and modern use]. *Vestnik BGU. Seriya 2, Khimiya. Biologiya. Geografiya* = *Bulletin of BSU. Series 2, Chemistry. Biology. Geography*, 2016, no. 3, pp. 144–148. (in Russian)
5. Tsybul'ko N. N., Ustinova A. M., Tsyribko V. B., et al. *Metodika agroekologicheskoi otsenki pochvenno-resursnogo potentsiala erozionnykh i zabolochennykh agrolandshaftov severnoi, tsentral'noi i yuzhnoi provintsii Belarusi* [Methodology for agroecological assessment of soil-resource potential of eroded and waterlogged agricultural landscapes in the northern, central and southern provinces of Belarus]. Minsk, Institut sistemnykh issledovaniy v APK NAN Belarusi Publ., 2020, 20 p. (in Russian)
6. Lysanova G. I. *Landshaftnyi analiz agro prirodnogo potentsiala geosistem* [Landscape analysis of agronatural potential of geosystems]. Irkutsk, Izd-vo Instituta geografii SO RAN Publ., 2001, 188 p. (in Russian)
7. Kiryushin V. I. *Metodologiya kompleksnoi otsenki sel'skokhozyaistvennykh zemel'* [Methodology for comprehensive assessment of agricultural lands]. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*, 2020, no. 7, pp. 871–879. (in Russian)
8. Belousov A. O., Bogdanov V. L. *Metod rascheta integral'nykh pokazatelei kachestva i ratsional'nogo ispol'zovaniya zemel' sel'skokhozyaistvennogo naznacheniya v QGIS* [Method for calculating integral indicators of quality and rational use of agricultural lands in QGIS]. *Vestnik SGUGiT (Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta geosistem i tekhnologii) = Vestnik SSUGT (Siberian State University of Geosystems and Technologies)*, 2022, vol. 27, no. 5, pp. 160–172. (in Russian)
9. Dydyshko S. V., Azarenok, T. N., Matychenkova O. V. *Agroekologicheskaya otsenka prigodnosti pochv pakhotnykh zemel' Mstislavskogo raiona dlya vozdel'yvaniya zernovykh kul'tur* [Agroecological assessment of the suitability of arable soils in the Mstislavl district for grain crops cultivation]. *Pochvovedenie i agrokhimiya = Soil Science and Agrochemistry*, 2022, no. 1 (68), pp. 7–20. (in Russian)
10. Nezhevlyak O. V., Svintsitskaya E. V. *Agroekologicheskaya otsenka pochvennogo pokrova Sargatskogo raiona Omskoi oblasti* [Agroecological assessment of the soil cover of the Sargatsky district of the Omsk region]. *Vestnik Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Bulletin of Omsk State Agrarian University*, 2015, no. 1 (17), pp. 28–32. (in Russian)

11. Budritskaya I. A., Tatarintsev V. L., Tatarintsev L. M. *Agroekologicheskaya otsenka pochv sukhostepnoi Kulundy* [Agroecological assessment of soils in the dry steppe of Kulunda]. *Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Bulletin of Altai State Agrarian University*, 2015, no. 11 (133), pp. 42–50. (in Russian)
12. Savich V. I., Belopukhov S. L., Sedykh V. A., Nikitochkin D. N. *Agroekologicheskaya otsenka kompleksnykh soedinenii pochv* [Agroecological assessment of complex soil compounds]. *Izvestiya Timiryazevskoi sel'skokhozyaistvennoi akademii = Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*, 2013, no. 6, pp. 5–11. (in Russian)
13. Ditts L. Yu., Biletskaya N. L. *Agroekologicheskaya gruppировка pochv kak odin iz putei ratsional'nogo ispol'zovaniya zemel'* [Agroecological grouping of soils as one of the ways to rational land use]. *Geo-Sibir' = Geo-Siberia*, 2007, vol. 2, no. 1, pp. 149–151. (in Russian)
14. Uskov I. B., Kononenko O. V., Sukhanov P. A., Uskov A. O. *Analiz metodik bonitirovki pochv i otsenki produktivnosti zemel'* [Analysis of methods for soil grading and land productivity assessment]. *Agrokhimicheskii vestnik = Agrochemistry Bulletin*, 2023, no. 5, pp. 81–89. (in Russian)
15. Kiryushin V. I. *Agroekologicheskii monitoring zemel', novye trebovaniya i metodologiya* [Agroecological monitoring of lands: new requirements and methodology]. *Izvestia of Orenburg State Agrarian University*, 2007, no. 3 (15), pp. 9–11. (in Russian)
16. Likhachevich N. A., Kachkov Yu. P., Chernysh A. F. *Tipologiya deflyatsionnoopasnykh zemel' Poles'ya i ikh ispol'zovanie* [Typology of deflation-prone lands in Polesie and their use]. *Pochvovedenie i agrokhimiya = Soil Science and Agrochemistry*, 2011, no. 2 (47), pp. 52–61. (in Russian)
17. Gopp N. V. *Agroekologicheskii potentsial zapadnoi chasti Kuznetsko-Salairskoi geomorfologicheskoi provintsii: metodika tsifrovogo kartografirovaniya, geoprostranstvennyi analiz, korrelyatsiya s sodержaniem organicheskogo ugleroda v pochvakh* [Agroecological potential of the western part of the Kuznetsk-Salair geomorphological province: methods of digital mapping, geospatial analysis, correlation with soil organic carbon content]. *Pochvy i okruzhayushchaya sreda = Soils and Environment*, 2023, vol. 6, no. 3. URL: <https://soils-journal.ru/index.php/POS/article/view/224> (accessed 26.12.2025). (in Russian)
18. Sanzharov A. I., Glazunov G. P., Solov'eva Yu. A. *K voprosu ispol'zovaniya GIS-tekhnologii dlya agroekologicheskoi otsenki zemel' v adaptivno-landshaftnykh sistemakh zemledeliya* [On the use of GIS technologies for agroecological assessment of lands in adaptive-landscape farming systems]. *Vestnik Kurskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii = Bulletin of Kursk State Agricultural Academy*, 2019, no. 7, pp. 24–32. (in Russian)
19. Klyushnikova E. V., Shitova E. M. *Metodicheskie podkhody k raschetu integral'nogo pokazatelya, metody ranzhirovaniya* [Methodological approaches to calculating the integral indicator, ranking methods]. *Innoventr = InnoCentre*, 2016, no. 1 (10), pp. 4–18. (in Russian)
20. Bulgakov D. S., Rukhovich D. I., Shishkonakova E. A., Vil'chevskaya E. V. *Ispol'zovanie pochvenno-agroklimaticheskogo indeksa pri otsenke agronomicheskogo potentsiala pakhotnykh zemel' v lesostepnoi zone Rossii* [Use of the soil-agroclimatic index in assessing the agronomic potential of arable lands in the forest-steppe zone of Russia]. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*, 2018, no. 4, pp. 473–485. (in Russian)
21. Reingard Ya. R., Nezhevlyak O. V. *Metodika agroekologicheskoi otsenki pochvennogo pokrova Omskoi oblasti* [Methodology for agroecological assessment of the soil cover of the Omsk region]. *Omskii nauchnyi vestnik = Omsk Scientific Bulletin*, 2006, no. 7 (43), pp. 150–152. (in Russian)
22. Kiryushin V. I., Kiryushin S. V. *Agrotekhnologii* [Agricultural technologies]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2022, 464 p. (in Russian)
23. Panasyuk O. Yu., Dyatlova N. A. *Metodicheskie podkhody k otsenke agroekologicheskogo sostoyaniya pochvennogo pokrova Belarusi i nekotorye predvaritel'nye rezul'taty issledovaniy* [Methodological approaches to assessing the agroecological state of the soil cover of Belarus and some preliminary research results]. *Struktura i morfogeneza pochvennogo pokrova v usloviyakh antropogennogo vozdeistviya = Structure and morphogenesis of soil cover under anthropogenic impact*. Proc. Int. Sci.-Pract. Conf., Minsk, September 17–20, 2013. Minsk, Belarusian State University, 2013, pp. 41–43. (in Russian)
24. Anoshko V. S., Brilevskii M. N., Kachkov Yu. P., et al. *Belorusskoe Poozer'e: analiz ekologo-meliorativnogo sostoyaniya* [Belarusian Lakeland: analysis of ecological and reclamation state]. Minsk, Universitetskoe Publ., 1992, 156 p. (in Russian)
25. Chernysh A. F., Romanova T. A., Chervan' A. N., Kas'yachik S. A. *Otsenka potentsiala pochvenno-zemel'nykh resursov sel'skokhozyaistvennykh organizatsii Belarusi s primeneniem GIS i ispol'zovanie ee rezul'tatov pri optimizatsii zemlepol'zovaniya* [Assessment of the potential of soil and land resources of agricultural organizations in Belarus using GIS and the use of its results in optimizing land use]. *Vesti Natsyynal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian Series*, 2011, no. 3, pp. 10–20. (in Russian)
26. Matychenkov D. V., Azarenok T. N., Matychenkova O. V., et al. *Metodika analiza struktury pochvennogo pokrova dlya proektirovaniya adaptivno-landshaftnykh sistem zemledeliya v tipovykh raionakh i sel'khozorganizatsiyakh* [Methodology for analyzing the soil cover structure for designing adaptive-landscape farming systems in typical districts and agricultural organizations]. Minsk, Institut sistemnykh issledovaniy v APK NAN Belarusi Publ., 2024, 47 p. (in Russian)
27. Chervan' A. N. *Tipizatsiya struktury pochvennogo pokrova sredstvami GIS dlya otsenki proizvoditel'nogo potentsiala agrolandshtafrov (na primere Respubliki Belarus')* [Typification of the soil cover structure using GIS for assessing

- the productive potential of agricultural landscapes (on the example of the Republic of Belarus)]. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya "Biologiya. Nauki o Zemle"* = Bulletin of Udmurt University. Series "Biology. Earth Sciences", 2021, vol. 31, no. 3, pp. 280–289. (in Russian)
28. Novikov D. V. *Agroekologicheskaya tipizatsiya zemel' kak informatsionnaya osnova sovremennogo zemleustroistva* [Agroecological typification of lands as an information basis for modern land management]. *Zemleustroistvo, kadastr i monitoring zemel'* = Land Management, Cadastre and Land Monitoring, 2010, no. 1 (61), pp. 29–35. (in Russian)
 29. Boiko O. S., Vasenev I. I. *Bazovye parametry agroekologicheskogo monitoringa agrolandshaftov TsChR* [Basic parameters of agroecological monitoring of agricultural landscapes in the Central Chernozem Region]. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta* = Vestnik of Orenburg State University, 2007, no. 10 (74), pp. 103–109. (in Russian)
 30. Vitchenko A. N. *Agroekologicheskie resursy landshaftov Belorussii* [Agroecological resources of landscapes of Belarus]. *Vestnik BGU. Seriya 2, Khimiya. Biologiya. Geografiya* = Bulletin of BSU. Series 2, Chemistry. Biology, Geography, 1987, no. 3, pp. 59–63. (in Russian)
 31. Lebedeva I. I., Korolyuk T. V. *Substantivno-geneticheskaya osnova otsenki pedoraznoobraziya* [Substantive-genetic basis for assessing pedodiversity]. *Pochvovedenie – prodovol'stvennoi i ekologicheskoi bezopasnosti strany* = Soil Science for Food and Environmental Security of the Country. Proc. VII Congr. of V. V. Dokuchaev Society of Soil Scientists and All-Russ. Sci. Conf. with Int. Particip., Belgorod, August 15–22, 2016. Moscow, Belgorod, 2016, part 2, pp. 187–188. (in Russian)
 32. Yurtaev A. A. *Agrolandshaftnye issledovaniya: teoriya i praktika* [Agrolandscape research: theory and practice]. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Estestvennye nauki"* = Belgorod State University Scientific Bulletin. Series "Natural Sciences", 2011, no. 15 (110), pp. 217–221. (in Russian)
 33. Sazonov A. A. *Pochvenno-agroekologicheskaya tipologiya agrolandshaftov Belarusi* [Soil-agroecological typology of agricultural landscapes of Belarus]. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Geografiya. Geologiya* = Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology, 2025, no. 2, pp. 3–15. (in Russian)
 34. Sazonov A. A., Kindeev A. L. *Tipologiya agrolandshaftov Respubliki Belarus' po agroklimaticheskomu potentsialu na osnove klasternogo analiza* [Typology of agricultural landscapes of the Republic of Belarus by agroclimatic potential based on cluster analysis]. *Zemlya Belarusi* = Land of Belarus, 2025, no. 3 (91), pp. 51–61. (in Russian)
 35. Shibut L. I., Azarenok T. N., Matychenkova O. V., et al. *Otsenka pochvenno-resursnogo potentsiala pakhotnykh zemel' sel'skokhozyaistvennykh organizatsii Belarusi* [Assessment of the soil-resource potential of arable lands of agricultural organizations in Belarus]. *Pochvovedenie i agrokhimiya* = Soil Science and Agrochemistry, 2019, no. 2 (63), pp. 15–23. (in Russian)
 36. Klebanovich N. V., Kindeev A. L. *Sopryazhennost' izmenenii urozhainosti zernovykh i zernobobovykh kul'tur i urovnya primeneniya udobrenii po raionam Respubliki Belarus'* [Conjugation of changes in the yield of grain and leguminous crops and the level of fertilizer application in the districts of the Republic of Belarus]. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Geografiya. Geologiya* = Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology, 2022, no. 1, pp. 15–27. (in Russian)
 37. Kolyada V. V. *Vliyanie izmeneniya klimata na dinamiku urozhainosti zernovykh kul'tur v regionakh Belarusi* [Impact of climate change on the yield dynamics of grain crops in the regions of Belarus]. *Prirodopol'zovanie* = Nature Management, 2025, iss. 1, pp. 17–26. (in Russian)
 38. *Nacyanal'ny atlas Belarusi* [National Atlas of Belarus]. *Belkartografiya* [Belkartografiya]. Chief editorial board: U. R. Gusakov [et al.]; scientific editors of sections: A. A. Kavalenya [et al.]. Minsk, Belkartografiya Publ., 2024, 348 p. (in Belarussian)
 39. Sachok G. I. *Faktory i modeli izmenchivosti urozhainosti sel'skokhozyaistvennykh kul'tur Belarusi* [Factors and models of yield variability of agricultural crops in Belarus]. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2006, 242 p. (in Russian)
 40. Dmitrienkova Yu. A. *Variatsiya gidrotermicheskogo koeffitsienta na territorii Belarusi i ego vliyanie na urozhainost' kul'tur* [Variation of the hydrothermal coefficient in Belarus and its influence on crop yields]. *Prirodopol'zovanie* = Nature Management, 2006, no. 12, pp. 40–44. (in Russian)
 41. Klochkov A. V., Solomko O. B., Klochkova O. S. *Vliyanie pogodnykh uslovii na urozhainost' sel'skokhozyaistvennykh kul'tur* [Influence of weather conditions on the yield of agricultural crops]. *Vestnik Belorusskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii* = Bulletin of the Belarusian State Agricultural Academy, 2019, no. 2, pp. 101–105. (in Russian)

Информация об авторе

Сазонов Алексей Александрович – старший преподаватель, Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь). E-mail: alexey.szonov@gmail.com

Information about the author

Alexey A. Sazonov – Senior lecturer, Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Belarus). E-mail: alexey.szonov@gmail.com