

ОСОБЕННОСТИ УСТАНОВЛЕНИЯ ЗОН ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ В ПРЕДЕЛАХ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ

Т. Н. МЫСЛЫВА, А. В. КОЖЕКО, О. А. КУЦАЕВА

УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия»,
г. Горки, Республика Беларусь, 213407, e-mail: byrty41@yahoo.com, zubok.lesik@mail.ru, alexa-1982@bk.ru

(Поступила в редакцию 15.01.2021)

Точное определение зон неоднородностей агрохимических и физико-химических показателей в пределах поля является неотъемлемым условием эффективного внедрения точного земледелия. В статье представлены результаты применения методов геостатистического анализа для идентификации зон пространственной неоднородности в пределах землепользования РПУП «Устье» НАН Республики Беларусь (Витебская область, Оршанский район). Общая площадь обследуемой территории составила 7549,49 га. Характер пространственного распределения данных о содержании гумуса, подвижных фосфора и калия, кальция, магния, водорастворимого бора, кислоторастворимых меди и цинка, а также pH почвенного раствора был оценен с помощью инструментов модуля Spatial Statistics программного продукта ArcGIS. Посредством применения методов геостатистического анализа с помощью алгоритма k-средних было установлено наличие 3 кластерных групп данных, характеризующих качество пахотных земель по комплексу показателей. Доминирующим показателем при определении группы 1 выступали содержание гумуса и подвижного фосфора ($R^2 = 1,0$), группы 2 – содержание гумуса ($R^2 = 0,98$), группы 3 – содержание подвижного калия ($R^2 = 0,92$). Полученные результаты целесообразно использовать для разработки цифровых карт-заданий по дифференцированному внесению минеральных удобрений при внедрении элементов точного земледелия.

Ключевые слова: геопространственный анализ, пахотные земли, агрохимические показатели, кластеризация, точное земледелие.

Accurate determination of zones of heterogeneity of agrochemical and physicochemical indicators within the field is an essential condition for the effective implementation of precision farming. The article presents results of applying the methods of geostatistical analysis to identify zones of spatial heterogeneity within the land use of the RPUE "Ustye" of the National Academy of Sciences of the Republic of Belarus (Vitebsk region, Orsha district). The total area of surveyed territory was 7,549.49 hectares. The nature of spatial distribution of data on the content of humus, mobile phosphorus and potassium, calcium, magnesium, water-soluble boron, acid-soluble copper and zinc, as well as the pH of the soil solution was estimated using the tools of Spatial Statistics module of ArcGIS software product. By applying the methods of geostatistical analysis using the k-means algorithm, the presence of 3 cluster data groups was established, characterizing the quality of arable land by a set of indicators. The dominant indicator in determining group 1 was the content of humus and mobile phosphorus ($R^2 = 1.0$), group 2 – the content of humus ($R^2 = 0.98$), group 3 – the content of mobile potassium ($R^2 = 0.92$). It is advisable to use the obtained results for the development of digital task maps for the differentiated application of mineral fertilizers when introducing elements of precision farming.

Key words: geospatial analysis, arable land, agrochemical indicators, clustering, precision farming.

Введение

Интенсификация процессов глобализации мировой экономики стала причиной возникновения ситуации, когда аграрное производство всех без исключения стран, не зависимо от уровня их экономического и социального развития, столкнулось с целым рядом серьезных проблем, связанных как с возрастающим спросом на невозобновляемые энергоресурсы и пресную воду и их недостатком, так и с усилением процессов урбанизации и сокращением площадей земель, пригодных для выращивания сельскохозяйственных культур, вследствие усиления эрозионных процессов и опустынивания, вызванных глобальным потеплением климата [1]. В частности, за последнее десятилетие сокращение площади пахотных земель в Европе, согласно прогнозным оценкам, к 2030 году достигнет 1,12 % [2–4]; для Беларуси этот показатель колеблется в пределах от 0,1 до 0,4 % [5].

В условиях постоянного удорожания энергоресурсов, сырья для производства минеральных удобрений и наличия дефицита органических удобрений актуальной становится проблема поиска путей увеличения экономической эффективности использования земельных ресурсов. Одним из действенных способов ее успешного решения является внедрение инновационных технологий в сфере землепользования, в частности технологий точного земледелия [6]. В докладе Европейского парламента о точном сельском хозяйстве и будущем агропромышленной отрасли в Европе точное земледелие определяется как «современная концепция управления сельским хозяйством, использующая цифровые методы для мониторинга и оптимизации процессов сельскохозяйственного производства» [2].

Одним из важнейших элементов системы точного земледелия является дифференцированное внесение минеральных удобрений и агрохимикатов [7]. Применение этой технологии позволяет не только выровнять пестроту распределения элементов питания в границах одного поля, но и повысить урожайность сельскохозяйственных культур за счет создания оптимального режима питания [8]. Создание актуальных карт однородных территориальных менеджмент-зон, отражающих реальное состояние качества земель и позволяющих дифференцировать внесение минеральных удобрений и химических мелиорантов, при этом максимально используя потенциальные возможности почвы, – важнейшее условие эффективного внедрения точного земледелия. Рынок подобного рода продуктов в

структуре элементов системы точного земледелия в странах ЕС за последние 5 лет увеличился более, чем на 17,5 % и составляет около 32 % [2], демонстрируя устойчивую тенденцию к увеличению.

Точное определение зон неоднородностей агрохимических и физико-химических показателей в пределах поля является неотъемлемым условием эффективного внедрения точного земледелия. Его успешное выполнение, в свою очередь возможно исключительно посредством применения возможностей ГИС-анализа для поиска пространственных закономерностей в распределении тех или иных почвенных показателей и взаимосвязей между ними и разработки методики создания актуальных карт, пригодных для использования техникой, оснащенной системами глобального позиционирования. Однако, невозможно разработать единую универсальную методику создания актуальных карт, отражающих реальное состояние качества земель и позволяющих дифференцировать внесение минеральных удобрений и химических мелиорантов и максимально использовать потенциальные возможности почвы. Такую методику следует разрабатывать в контексте конкретных почвенных, природно-климатических и экономических условий для каждого отдельного сельскохозяйственного предприятия.

В этой связи целью исследований стало: 1) определение оптимального числа градаций качества пахотных земель в пределах землепользования РПУП «Устье» НАН Республики Беларусь; 2) установление возможности выполнения классификации территории землепользования сельскохозяйственного предприятия по комплексу требуемых признаков.

Основная часть

Исследования выполнялись в 2020 г. в пределах землепользования РПУП «Устье» НАН Республики Беларусь (Оршанский район Витебской области) на площади 7549,49 га пахотных земель (из массива были исключены органогенные почвы, площадь которых составила 321,05 га) (рис. 1).

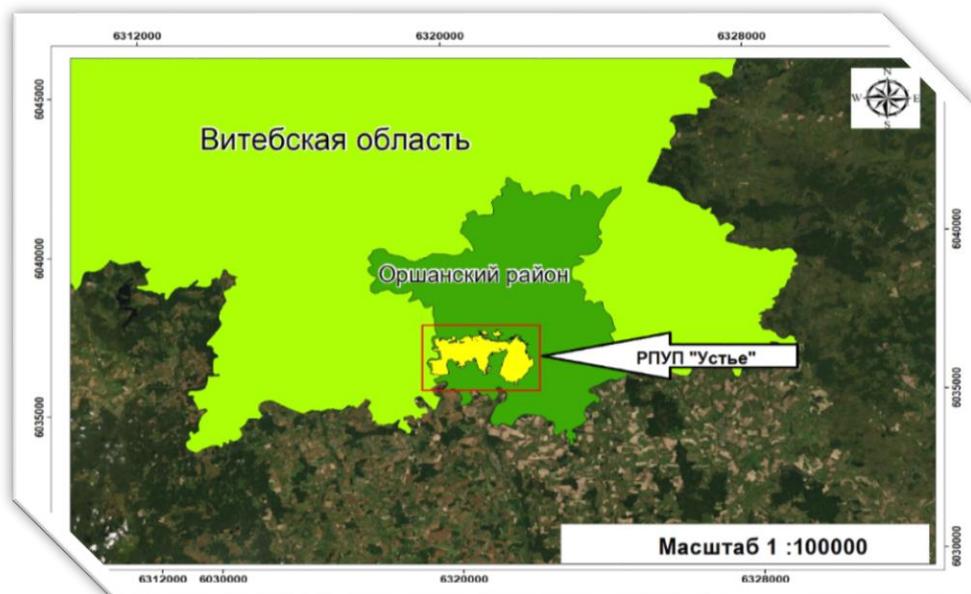


Рис. 1. Расположение объекта выполнения исследований

Шейп-файл с размещением земельных участков в пределах территории выполнения исследования и атрибутивными значениями содержания в почве гумуса, подвижных фосфора и калия, кальция, магния, водорастворимого бора, кислоторастворимых меди и цинка, а также pH почвенного раствора был создан в среде ГИС ArcGIS версии 10.5 по результатам оцифровки планово-картографических материалов, полученных при выполнении агрохимического обследования территории сельскохозяйственного предприятия в 2019 году КУПП «Витебская областная проектно-изыскательская станция химизации сельского хозяйства».

Геопространственный анализ данных об агрохимических и физико-химических свойствах почв пахотных земель выполнялся с помощью функциональных возможностей набора инструментов «Расчет кластеризации» модуля «Пространственная статистика» программного продукта ArcGIS версии 10.5. С помощью инструментов геопространственной статистики выполнялся анализ структурных закономерностей в распределении данных и анализ их кластеризации.

Использование методов геостатистического анализа позволяет идентифицировать однородные территориальные зоны в пределах территории землепользования по одному или нескольким параметрам. Метод k-средних – наиболее популярный метод кластеризации, который был изобретён в 1950-х годах XX ст. математиком Гуго Штейнгаузом [9]. Действие алгоритма кластеризации заключается в

том, что он стремится минимизировать суммарное квадратичное отклонение точек кластеров от центров этих кластеров (1):

$$V = \sum_{i=1}^k \sum_{x \in S_i} (x - \mu_i)^2, \quad (1)$$

где k – число кластеров; S_i – полученные кластеры; $i = 1, 2, \dots, k$; μ_i – центры масс всех векторов x из кластера S_i .

С помощью алгоритма k -средних пространственные данные распределяются на заданное число групп, в пределах которых все показатели, включенные в отдельную группу, наиболее схожи между собой, в то время как сами группы максимально отличаются друг от друга [10].

Поиск оптимального числа групп выполнялся в пределах выборки данных, сведения об основных статистических характеристиках которой представлены в табл. 1.

Таблица 1. Статистические характеристики выборки данных об агрохимических и физико-химических свойствах почв пахотных земель РПУП «Устье» НАН Республики Беларусь, $n=1292$

Название элемента	Статистическая характеристика показателя									
	значение показателя				Sd	Cv, %	Асимметрия	Экссесс	1-й квартиль	3-й квартиль
	min	max	mid	med						
pH _{KCl}	4,53	7,41	6,09	6,15	0,48	7,9	-0,50	3,21	5,80	6,42
Гумус, %	1,17	3,20	2,18	2,07	0,57	26,1	0,48	2,09	1,73	2,64
P ₂ O ₅ , мг/кг	40	450	212	188	102	48,1	0,85	2,98	137	268
K ₂ O, мг/кг	42	450	242	244	99	40,9	0,12	2,38	168	310
Ca, мг/кг	137	2810	1444	1397	270	18,7	0,45	3,83	1246	1604
Mg, мг/кг	135	546	384	393	59	15,4	-0,67	2,96	340	438
B, мг/кг	0,29	1,10	0,77	0,75	0,20	26,0	0,07	1,92	0,61	0,95
Cu, мг/кг	0,70	5,10	2,29	2,10	0,83	36,2	1,64	5,75	1,80	2,50
Zn, мг/кг	1,0	10,3	3,02	2,5	1,69	56,0	1,90	7,27	1,90	3,60

Примечание: Sd – среднее квадратическое отклонение; Cv – коэффициент вариации; mid – среднее значение; med – медиана.

Исследовались девять показателей, из которых два показателя имели близкое к нормальному распределению (pH_{KCl} и содержание кальция), два показателя – лептокуртическое распределение (содержание кислоторастворимых меди и цинка), остальные – платикуртическое распределение. pH почвенного раствора и содержание магния имели отрицательную асимметрию, а их средние значения были меньше медианных. Максимальные коэффициенты вариации установлены для содержания в почве кислоторастворимого цинка, а также подвижных фосфора и калия. Статистические характеристики каждого из показателей оказали определенное влияние на количество идентифицированных зон неоднородности, установленных в пределах землепользования. Непосредственное влияние на качественный состав выделенных в ходе выполнения геопространственного анализа групп оказало также наличие пространственного тренда – систематического изменения наблюдаемой величины либо явления с изменением его местоположения (координаты) (рис. 2).

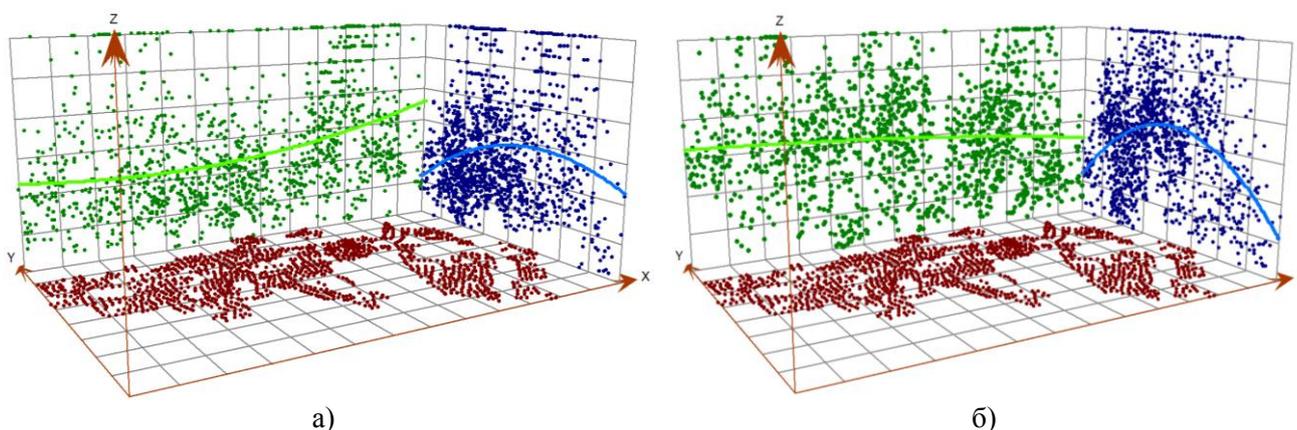


Рис. 2. Тренд данных о содержании подвижных фосфора (а) и калия (б) в почвах пахотных земель РПУП «Устье» НАН Республики Беларусь

Наблюдается умеренный возрастающий тренд в содержании в почве подвижного фосфора и слабый убывающий тренд – в содержании подвижного калия в направлении с востока на запад, а также уменьшение содержания данных макроэлементов в северном и южном направлениях от центра землепользования, более четко проявляющееся в отношении содержания калия.

Анализ группирования является действенным инструментом изучения геопространственных данных, выполняющим процедуру классификации, цель которой – поиск естественных кластеров высоких и/или низких значений в массиве данных. С его помощью данные о почвенных параметрах распределяются на заданное число групп, в которых все показатели наиболее схожи между собой, в то время как сами группы максимально отличаются друг от друга [11]. Посредством выполнения анализа группирования возможно установить наличие в пределах землепользования однородных зон с определенным набором параметров, под которыми подразумеваются агрохимические и физико-химические свойства почвы, а под однородностью – наличие параметров с высокими либо низкими показателями. Поскольку использование пространственных ограничений для параметров было нецелесообразным, при поиске групп, под которыми понимались зоны пространственной неоднородности, применялся алгоритм k-средних. Данный алгоритм сначала определяет начальные объекты, которые используются для формирования каждой группы. Первый начальный объект выбирается произвольно, а при выборе остальных начальных значений применяется взвешивание, которое отдает предпочтение объектам, наиболее отдаленным от существующего набора начальных объектов (эта часть алгоритма называется k-средних ++). После определения начальных значений все объекты в пространстве данных назначаются ближайшему начальному объекту. При этом для каждого кластера объектов вычисляется центр данных, а каждый объект назначается ближайшему центру. Процесс вычисления центра данных для каждой группы и назначения объектов ближайшему центру продолжается до стабилизации групп (возможно применение до 100 итераций) [10]. Была рассмотрена возможность идентификации от 3-х до 5-ти зон неоднородности (табл. 2).

Таблица 2. Значение R^2 для идентифицированных групп агрохимических и физико-химических свойств почв пахотных земель РПУП «Устье» НАН Республики Беларусь

Идентифицированная группа показателей	Наименование показателя								
	pH _{ксл}	гумус, %	кальций	магний	подвижные		водорастворимый бор	кислоторастворимые	
					фосфор	калий		медь	цинк
мг/кг									
Группирование на 5 групп									
1	0,6528	0,9360	0,4617	0,4526	1,0000	1,0000	0,8889	0,7500	0,4624
2	0,7049	1,0000	0,5952	0,7689	0,9122	0,9510	0,8889	1,0000	0,7849
3	0,6806	0,9803	0,3135	0,5012	0,7683	0,8799	0,7901	0,8182	0,9677
4	0,8750	0,7635	0,2435	0,7226	0,9171	0,8824	0,7778	0,6818	0,5054
5	0,8819	0,7734	0,5290	0,6253	0,9780	0,9975	0,7037	0,4773	0,7312
Общее значение	0,3219	0,4947	0,6213	0,4771	0,4651	0,3496	0,3577	0,5793	0,4480
Группирование на 4 группы									
1	0,7951	0,9310	0,2941	0,4599	0,9268	0,9534	1,0000	0,4773	0,4731
2	0,6806	0,9803	0,3135	0,5012	0,8341	0,8799	0,7901	0,8182	0,9677
3	0,8576	1,0000	0,6120	0,7689	0,9122	0,9510	0,8889	1,0000	0,7849
4	0,9306	0,7734	0,5290	0,9538	0,9902	0,9975	0,7037	0,8182	0,9785
Общее значение	0,2624	0,4654	0,5852	0,4989	0,4031	0,3571	0,3215	0,4105	0,3099
Группирование на 3 группы									
1	0,9271	1,0000	0,5993	0,7689	1,0000	0,9534	1,0000	1,0000	0,4731
2	0,9375	0,9803	0,3094	0,5547	0,8293	0,8799	0,7901	0,8409	0,9677
3	0,9514	0,7734	0,5290	0,9538	0,9902	0,9975	0,7037	0,9318	0,9785
Общее значение	0,0494	0,4568	0,5728	0,2270	0,3694	0,3155	0,3328	0,3810	0,3078

Следует отметить, что не существует единого стандартного способа установления оптимального количества зон неоднородности. В каждом конкретном случае оно должно быть установлено, исходя из имеющихся в распоряжении геопространственных данных, их статистических характеристик, а также с учетом особенностей рельефа территории землепользования. В данном исследовании оптимальное количество групп и наличие кластеризации в данных были определены эмпирическим путем посредством оценки отчетов о результатах группирования. В результате выполнения группирования для каждого показателя в группе рассчитывалась величина R^2 , показывающая, в какой степени вариация в исходных данных для каждого из изучаемых показателей была сохранена в процессе группировки (2):

$$R^2 = (TSS - ESS) / TSS, \quad (2)$$

где TSS – общая сумма квадратов (вычисляется посредством возведения в квадрат и суммирования отклонений от глобального среднего значения каждой переменной); ESS – объясненная сумма квадратов (вычисляется посредством возведения в квадрат и суммирования отклонений значений каждой переменной от среднего значения для группы).

При разбиении выборки данных на пять групп было установлено, что доминирующим показателем при определении группы 1 выступает содержание подвижных фосфора и калия ($R^2 = 1,0$), групп 2 и 3 – содержание гумуса ($R^2 = 1,0$ и $0,98$ соответственно), группы 4 – содержание подвижного фосфора ($R^2 = 0,92$), группы 5 – содержание подвижного калия ($R^2 = 0,99$). Такая же тенденция сохраняется и при выделении четырех групп за исключением группы 4, где доминирующим показателем выступает подвижный фосфор. В целом же, независимо от количества выделенных групп, величина содержания кальция наиболее сильно отличает объекты (кластеры) в пределах исследуемой территории (см. табл. 2).

Наиболее оптимальным решением оказалось выделение в пределах землепользования трех групп неоднородности агрохимических и физико-химических показателей почвы. При этом доминирующим показателем при определении группы 1 выступали содержание гумуса и подвижного фосфора ($R^2 = 1,0$), группы 2 – содержание гумуса ($R^2 = 0,98$), группы 3 – содержание подвижного калия ($R^2 = 0,92$). Эффективность группировки была оценена с помощью псевдо-F-статистики Калински-Харабаза [11], которая отражает сходство объектов в группе и различие между группами и свидетельствует о правильности выбора оптимального количества групп неоднородности (рис. 3).

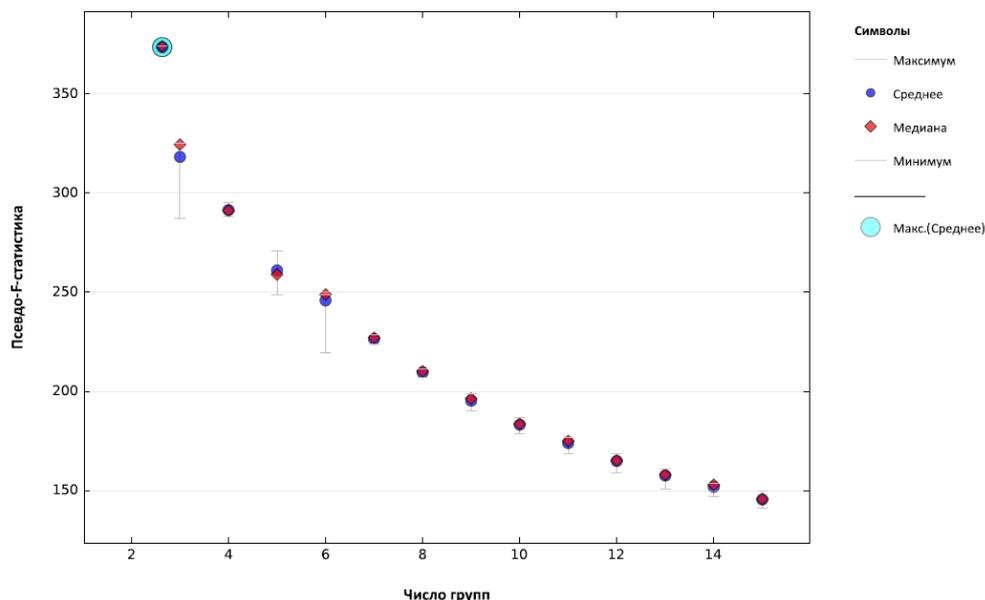


Рис. 3. График распределения значений псевдо-F-статистики Калински-Харабаза

На рис. 4 показана пространственная локализация выделенных групп – зон пространственной неоднородности, а также результат анализа кластеров, в ходе которого были идентифицированы статистически значимые зоны концентрации высоких и низких значений данных об агрохимических и физико-химических свойствах почвы. Наилучшее соотношение «однородность кластера – однородность группы» установлено в случае выполнения группирования на три группы. Именно при такой группировке фиксируется максимальное совпадение локализации земель, относящихся к группе 1, с локализацией кластеров низких значений, а группы 3 – с локализацией кластеров высоких значений. Для сравнения, при выполнении идентификации пяти групп в области кластеризации высоких значений локализованы группы 3, 4 и 5, а в области низких значений – группы 1 и 2. Это свидетельствует о нецелесообразности выделения такого количества групп. Аналогичная тенденция прослеживается и при выполнении деления на четыре группы. Площадь земель, относящихся к группе 1, составила 3881,04 га, к группе 2 – 2214,63 га, к группе 3 – 1453,83 га, что в процентном соотношении составило 51,4, 29,3 и 19,3 % к общей площади землепользования.

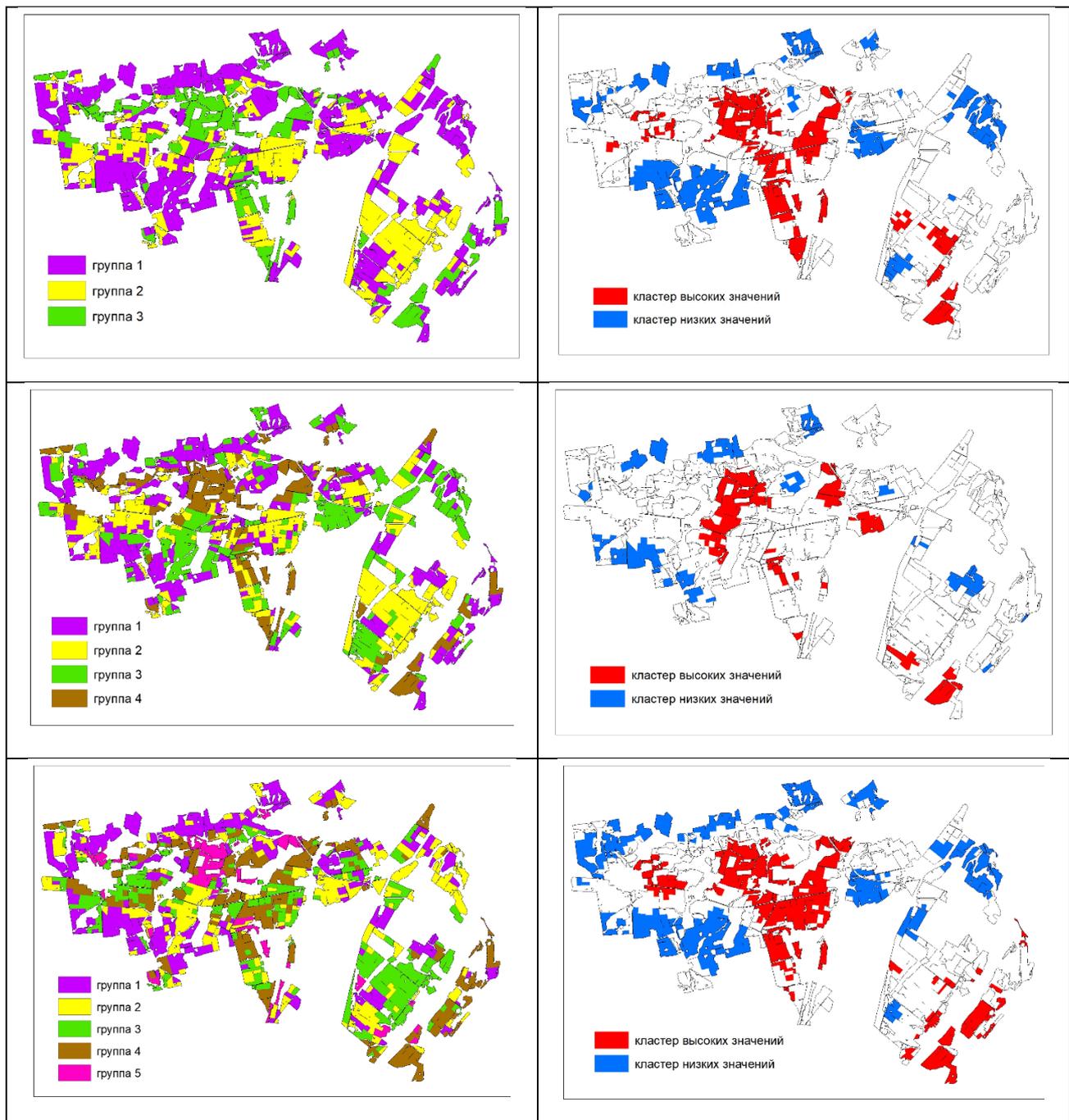


Рис. 4. Пространственная локализация выделенных групп – зон пространственной неоднородности и результат анализа кластеров в пределах пахотных земель РПУП «Устье» НАН Республики Беларусь

О целесообразности выделения именно трех зон неоднородности свидетельствует и распределение градаций агрохимических и физико-химических свойств почв пахотных земель в пределах выделенных групп (табл. 3). Именно такое деление обеспечивает равномерный переход от высоких до низких значений каждого показателя в составе группы и позволяет идентифицировать в пределах землепользования массивы пахотных земель с хорошими, удовлетворительными и низкими показателями. Исключение составили только содержание подвижного фосфора, которое сначала снижается, а потом возрастает в пределах выделенных групп, и содержание подвижного калия, которое изменяется в противоположном всем остальным показателям направлении – от большего к меньшему, а не наоборот. Объяснением такого характера распределения подвижных фосфора и калия в разрезе групп может служить наличие пространственного тренда в данных о содержании этих макроэлементов в почве, что наглядно иллюстрирует рис. 2. Кроме того, для идентификации групп были использованы данные, полученные в ходе выполнения агрохимического обследования землепользования. Их проверка в процессе выполнения анализа кластеров показала, что присутствует довольно значительное

количество выбросов высоких и низких значений в пределах выборки данных о содержании в почве подвижных фосфора и калия.

Таблица 3. Градация агрохимических и физико-химических свойств почв пахотных земель РПУП «Устье» НАН Республики Беларусь в пределах идентифицированных групп

Идентифицированная группа показателей	Наименование показателя								
	рН _{KCl}	гумус, %	кальций	магний	подвижные		водорастворимый бор	кислоторастворимые	
					фосфор	калий		медь	цинк
	мг/кг								
Группирование на 5 групп									
1	БН	НД	П	В	П	П	С	С	Н
2	СК	НД	П	В	П	П	В	С	Н
3	БН	С	П	В	В	В	В	С	С
4	БН	П	В	В	П	С	В	С	Н
5	БН	П	В	В	П	Н	В	В	В
Группирование на 4 группы									
1	БН	С	П	В	П	П	С	С	Н
2	БН	С	П	В	В	В	В	С	С
3	СК	Н	П	В	П	П	В	С	Н
4	БН	П	В	В	П	С	В	В	С
Группирование на 3 группы									
1	СК	НД	П	В	П	П	С	С	Н
2	БН	С	П	В	В	В	В	С	С
3	БН	П	В	В	П	С	В	В	С

Примечание: БН – близкое к нейтральному; СК – слабокислое; Н – низкое; НД – недостаточное; С – среднее; П – повышенное; В – высокое.

Пространственные выбросы в данном случае могут быть обусловлены как несовершенством методики отбора проб почвы, так и несовершенством применяемых методов картографирования результатов агрохимических исследований. С другой стороны, наличие выбросов может быть вызвано и объективными причинами, например, применением различных доз минеральных удобрений в пределах отдельных рабочих участков. Этим, в частности, может быть объяснена пестрота пространственного распределения подвижных фосфора и калия в пределах исследуемой территории землепользования. По нашему мнению, при обнаружении участков-выбросов необходимо провести дополнительное их обследование с целью уточнения причины их появления. В случае, если участки-выбросы окажутся неподтвержденными, их следует предварительно удалить из выборки данных перед выполнением кластеризации.

Следует отметить, что точное определение зон неоднородностей агрохимических и физико-химических показателей в пределах поля либо земельного массива возможно исключительно посредством применения ГИС-анализа для поиска пространственных закономерностей в распределении тех или иных почвенных показателей и взаимосвязей между ними.

Заключение

Результаты выполненных исследований дают основания для следующих выводов: 1) использование методов геостатистического анализа данных о качественном состоянии земель позволяет идентифицировать неоднородности в пределах как отдельного поля, так и всего землепользования по одному или нескольким параметрам; 2) анализ группирования данных с помощью алгоритма k-средних позволяет установить наличие в пределах землепользования однородных зон с определенным набором параметров, однако является непригодным для установления четких границ зон пространственной неоднородности; 3) посредством выполнения геостатистического анализа с использованием алгоритма k-средних установлено, что оптимальной является идентификация 3-х групп данных, характеризующих качество пахотных земель по комплексу показателей; 4) группирование данных с помощью кластерного анализа позволяет выявить и математически оценить пространственное распределение агрохимических и физико-химических показателей почвы; изучить пространственную автокорреляцию и оценить кластеризацию данных о свойствах почвы, а также определить местоположения кластеров в пространстве; 5) методы геопроцессуальной статистики позволяют установить наиболее четкие границы между плодородными и мало плодородными землями, что может быть использовано при дальнейшем определении границ менеджмент-зон для целей точного земледелия, в пределах которых будут дифференцированно применяться удобрения либо осуществляться те или иные землеустроительные мероприятия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Myslyva, T. Problems, prospects and experience in the implementation of precision farming in the Republic of Belarus in the context of national land use / T. Myslyva / Proceedings of the XI International Scientific Agricultural Symposium «Agrosym 2020». – East Sarajevo: Faculty of Agriculture, 2020. – P. 972–978.
2. Daheim, C. Precision agriculture and the future of farming in Europe / C. Daheim, K. Poppe, R. Schrijver – Directorate-General for Parliamentary Research Services, 2016. – 274 p.
3. Zarco-Tejada, P. J. Precision agriculture: an opportunity for EU farmers – potential support with the cap 2014-2020 / P. J. Zarco-Tejada, N. Hubbard, Ph. Loudjani. – Joint Research Centre of the European Commission, Brussels, 2014. – 57 p.
4. EU agricultural outlook for markets and income, 2018-2030 / European Commission. – DG Agriculture and Rural Development, Brussels, 2018. – 128 p.
5. Сельское хозяйство Республики Беларусь: статистический сборник / Национальный статистический комитет Республики Беларусь, Минск. – 2019. – 212 с.
6. Куцаева, О. А. Создание менеджмент-зон для дифференцированного внесения минеральных удобрений с использованием инструментов геостатистики / О. А. Куцаева // Вестник БГСХА. – 2020. – №2. – С. 176–181.
7. Куцаева, О. А. Экономическая эффективность off-line дифференцированного внесения минеральных удобрений с использованием менеджмент-зон / О. А. Куцаева // Аграрная экономика. – №8. – С. 55–66.
8. Котельникова, Е. А. Устойчивое развитие зернопродуктового подкомплекса в условиях рискованного земледелия / Е. А. Котельникова, К. А. Петров // Аграрный научный журнал. – 2011. – № 1. – С. 80–84.
9. Steinhaus, H. Sur la division des corps materiels en parties / H. Steinhaus // Bulletin International de l'Academie Polonaise des Sciences. – 1956. – Cl. III. – Vol IV. – P. 801–804.
10. Mitchell, A. The ESRI Guide to GIS Analysis / A. Mitchell. – Esri Press, 2005. – Vol. 2. – 252 p.
11. Митчелл Э. Руководство по ГИС-анализу. Часть 1. Пространственные модели и взаимосвязи / Э. Митчелл. – ESRI: 2000. – 170 с.
12. Calinski, R. A dendrite method for cluster analysis / R. Calinski, J. Harabasz // Commun. Statistics. – 1974. – №3. – P. 1–27.