

СОЗДАНИЕ МЕНЕДЖМЕНТ-ЗОН ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВА ПРИ ВНЕДРЕНИИ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ

Т. Н. МЫСЛЫВА, О. А. КУЦАЕВА

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

(Поступила в редакцию 14.01.2020)

Представлены результаты применения методов геостатистического анализа для формирования менеджмент-зон в пределах землепользования сельскохозяйственного предприятия при внедрении элементов системы точного земледелия. Выполнена оценка характера пространственного распределения данных о содержании в почве гумуса, подвижных фосфора и калия, рН почвенного раствора, кислоторастворимых форм меди, цинка, марганца и водорастворимого бора посредством применения инструментов модуля «Пространственная статистика» ArcGIS версии 10.5. Величина расстояния, с которого необходимо начать анализ пространственной автокорреляции, составила 550 м, тогда как величина приращения (лага), установленная эмпирическим путем, колебалась от 50 м для содержания в почве водорастворимого бора, кислоторастворимых цинка, марганца и рН почвенного раствора до 100 м – для содержания в почве гумуса и до 250 м – для содержания в почве подвижных фосфора и калия и кислоторастворимой меди. Установлено наличие достоверной кластеризации показателей содержания в почве гумуса, подвижных фосфора и калия, кислоторастворимых меди и цинка (p -значение $> 2,58$). Для данных о содержании в почве кислоторастворимого марганца установлено наличие кластеризации с низкими значениями, а данные о содержании водорастворимого бора являются не кластеризованными (z -оценка = $-0,323185$, p -значение = $0,746555$). Максимальным количеством пространственных выбросов с высокими значениями характеризуются данные о содержании в почве подвижных фосфора и кислоторастворимой меди – 84 и 96 соответственно, тогда как максимальным количеством выбросов с низкими значениями характеризуются данные о содержании в почве гумуса (135 кластеров) и меди (148 кластеров). Полученная информация может использоваться для осуществления внутрихозяйственных землеустроительных мероприятий при внедрении как системы точного земледелия в целом, так и отдельных ее элементов.

Ключевые слова: точное земледелие, менеджмент-зоны, геостатистический анализ, почва, кластеризация, индекс Морана, Getis-OrdGi*.

The results of applying the methods of geostatistical analysis for the formation of management zones within the land use of an agricultural enterprise when introducing elements of a precision farming system are presented. The nature of the spatial distribution of data on the content of humus, mobile phosphorus and potassium in the soil, the pH of the soil solution, acid-soluble forms of copper, zinc, manganese and water-soluble boron was estimated using the tools of the Spatial Statistics module ArcGIS version 10.5. The distance from which it is necessary to begin the analysis of spatial autocorrelation was 550 m, while the magnitude of the increment (lag), established empirically, ranged from 50 m for the content in the soil of water-soluble boron, acid-soluble zinc, manganese and soil pH, up to 100 m for the content in the soil of humus, and up to 250 m for the content in the soil of mobile phosphorus and potassium and acid-soluble copper. The presence of reliable clustering of soil content of humus, mobile phosphorus and potassium, acid-soluble copper and zinc (p -value > 2.58) was established. For data on the content of acid-soluble manganese in the soil, the presence of clustering with low values was established, and data on the content of water-soluble boron are not clustered (z -score = -0.323185 , p -value = 0.746555). The maximum amount of spatial emissions with high values is characterized by the data on the content in the soil of mobile phosphorus and acid-soluble copper – 84 and 96, respectively, while the maximum number of emissions with low values is characterized by the data on the content of humus (135 clusters) and copper (148 clusters) in the soil. The information obtained can be used to implement on-farm land management measures when introducing both the precision farming system as a whole and its individual elements.

Key words: precision farming, management zones, geostatistical analysis, soil, clustering, Moran index, Getis-OrdGi*.

Введение

Стратегической целью развития аграрной экономики Беларуси на период до 2030 года является обеспечение устойчивого развития и достижение безубыточности сельскохозяйственного производства на основе повышения его научно-технического потенциала, внедрения безотходных и экологически безопасных технологий со щадящим режимом потребления ресурсов. Один из важнейших инструментов для достижения данной цели – инновационное развитие сельскохозяйственного производства, предусматривающее технологическую модернизацию, внедрение ресурсосберегающей системы машин и технологий для точного земледелия, использование технологий «big data» для создания информационных систем сельскохозяйственного мониторинга [1]. Вследствие глобализации мировой экономики сельское хозяйство всех стран сталкивается с рядом серьезных проблем, в частности, с изменением климата, растущим спросом на энергоресурсы и их дефицитом, ускоренной урбанизацией, старением населения в сельских регионах, увеличением конкуренции на мировых рынках. В отношении земельных ресурсов первоочередной проблемой, актуальной как для стран ЕС, так и для Беларуси и других сопредельных государств, является сокращение площади сельскохозяйственных угодий, которое в странах Европы в последние десять лет составляет в среднем 0,7 % в год [2], а в Беларуси достигает 0,1–0,4 % [3]. 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 способов ее успешного решения является внедрение точного (координатного) земледелия – современной концепции управления сельским хозяйством, использующей цифровые методы для мониторинга и оптимизации процессов сельскохозяйственного производства [4]. Его главная цель – увеличить количество и качество получаемой сельскохозяйственной продукции при меньшем потреблении энергетических и материальных ресурсов и обеспечении снижения негативного воздействия на окружающую среду. Мировой рынок технологий точного земледелия в среднем составляет 2,3 миллиарда евро и, как ожидается, с каждым годом будет увеличиваться в среднем на 12 % [5].

Беларусь имеет высокий потенциал для внедрения систем точного земледелия либо их отдельных элементов в аграрное производство. Однако, наряду с преимуществами существуют и проблемы, препятствующие широкому внедрению системы точного земледелия в практику сельскохозяйственных предприятий. Важнейшей из них является существующая система внутрихозяйственного землеустройства, ориентированная на традиционное энерго- и ресурсозатратное земледелие и не учитывающая существующих неоднородностей в пределах отдельного поля либо земельного участка – ключевых факторов для координатного земледелия.

ГИС-анализ является процессом поиска пространственных закономерностей в распределении данных и взаимосвязей между объектами [6]. Использование его возможностей позволяет решать целый ряд различных проблем в экономике, географии, эпидемиологии, криминалистике, демографии, при планировании работы экстренных служб, в транспортном анализе, археологии, экологии и многих других областях, а потребность в усовершенствованных инструментах геопространственного анализа постоянно возрастает [7]. ГИС-анализ становится также незаменимым инструментом при создании однородных территориальных зон для целей землеустройства в процессе внедрения систем точного земледелия. Вопросам реализации возможностей геопространственного анализа в различных сферах народного хозяйства посвящен целый ряд преимущественно зарубежных исследований. Применению ГИС-анализа в территориальном планировании посвящены работы [8, 9, 10], использованию возможностей геопространственного анализа для жилищного строительства и городского развития – исследования [11, 12], в экономике природопользования – работа [13, 14].

Планированию землепользования как функции государственного управления и регулирования в контексте повышения эффективности управления земельными ресурсами и совершенствованию принципов землеустройства посвящены работы А. С. Помелова, А. В. Колмыкова, В. Ф. Дудко, Г. М. Мороза [15–18]. Агропроизводственной и экологической интерпретации почвенного покрова Республики Беларусь с целью рациональной территориальной организации земель сельскохозяйственного назначения посвящены работы Н. В. Клебановича, В. М. Яцухно, А. Ф. Черныш [19–20]. Однако, вне внимания отечественных ученых-экономистов и землеустроителей оказались вопросы, связанные с: 1) методологией и методикой осуществления внутрихозяйственных землеустроительных мероприятий, и применением функциональных возможностей GIS при переходе к технологиям точного земледелия; 2) усовершенствованием методики внутрихозяйственного землеустройства в направлении перехода от формирования рабочих участков к формированию менеджмент-зон под конкретные требования сельхозпроизводителя. Таким образом, разработка новых подходов к управлению земельными ресурсами и осуществлению внутрихозяйственного землеустройства при внедрении системы точного земледелия является чрезвычайно актуальной для аграрного сектора экономики Беларуси.

Цель исследования – анализ пространственного распределения агрохимических и физико-химических свойств почв пахотных земель РУП «Учхоз БГСХА» для формирования менеджмент-зон при внедрении элементов системы точного земледелия.

Задачи исследования предусматривали следующее: 1) определить минимальное и максимальное расстояния окрестности поиска ближайшего соседства, дающие возможность подобрать оптимальную величину окрестности поиска при моделировании пространственного распространения агрохимических и физико-химических свойств почвы; 2) рассчитать глобальный индекс Морана I, позволяющий определить, имеет ли место явление кластеризации по отношению к атрибутивным данным, каковыми являются сведения о физико-химических и агрохимических свойствах почвы; 3) определить общий индекс Getis-OrdG для оценки общей структуры и тренда геоданных, а также степени кластеризации высоких и/или низких значений выборки; 4) рассчитать индекс Getis-OrdG*, позволяющий установить наличие кластеризации данных с высокими и низкими значениями; 5) выполнить

анализ кластеров и выбросов для установления отличий атрибутивных значений каждого рабочего участка от его окрестности, а окрестности рабочего участка – от остальной территории.

Основная часть

Исследования выполнялись на территории Горецкого района Могилевской области в пределах землепользования РУП «Учхоз БГСХА» на площади 8342,1 тыс. га. Шейп-файл с размещением земельных участков в пределах территории выполнения исследования был создан в среде ГИС ArcGIS версии 10.5 по результатам оцифровки планово-картографических материалов, полученных при проведении агрохимического обследования территории хозяйства в 2018 году УКПП «Могилевская областная проектно-изыскательская станция агрохимизации». Почвенный покров представлен преимущественно дерново-подзолистыми супесчаными на водно-ледниковых супесях и дерново-подзолистыми суглинистыми на лессовидных суглинках почвами [4].

Анализ пространственного распределения выполнялся с помощью функциональных возможностей наборов инструментов «Анализ структурных закономерностей» и «Расчет кластеризации» модуля «Пространственная статистика» ГИС ArcGIS версии 10.5 в отношении следующих агрохимических и физико-химических свойств почвы: реакция почвенного раствора (pH_{KCl}); содержание гумуса, подвижных фосфора и калия; содержание водорастворимого бора и кислоторастворимых форм меди, цинка и марганца. Сведения об основных статистических характеристиках выборок исходных данных представлены в табл. 1.

Таблица 1. Статистические характеристики выборки данных об агрохимических и физико-химических показателях, используемой для выполнения геостатистического анализа

Название показателя и объем выборки	Значение показателя			Sd	Cv, %	Med	Экссесс	Асимметрия
	min	max	mid					
pH_{KCl} , n=1622	4,16	6,90	5,83	0,56	9,6	5,94	2,87	-0,71
Гумус, %, n=1636	1,02	4,04	2,14	0,62	28,9	2,0	4,08	1,10
P_2O_5 , мг/кг, n=1630	40	426	208	95,7	46,4	192	2,11	0,36
K_2O , мг/кг, n=1634	41	401	217	95,7	44,1	203	2,28	0,45
B, мг/кг, n=1633	0,40	1,01	0,56	0,14	25,0	0,50	4,10	1,25
Cu, мг/кг, n=1611	0,76	4,15	2,14	0,62	28,9	2,09	3,26	0,49
Zn, мг/кг, n=1638	1,85	10,01	4,06	1,26	31,0	3,87	9,32	1,93
Mn, мг/кг, n=1627	2,80	5,50	3,67	0,40	11,9	3,60	5,95	1,33

Примечание: Sd – среднееквадратическое отклонение; Cv – коэффициент вариации; mid – среднее значение; Med – медиана.

Глобальный индекс Морана (I) рассчитывали по формуле (1):

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n w_{ij} (y_i - \bar{y})(y_j - \bar{y})}{[\sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n w_{ij}] [\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2]} \quad (1)$$

где n – количество единиц в выборке; w_{ij} – вес пространственной связи между i-й и j-й единицей выборки; y_i – атрибутивное значение для i-й единицы выборки; \bar{y} – выборочное среднее значение атрибута.

Величину индекса Getis-OrdGi* рассчитывали по формуле (2):

$$Getis-OrdGi^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{i,j} x_j - \bar{x} \sum_{j=1}^n w_{i,j}}{\sqrt{\frac{[n \sum_{j=1}^n w_{i,j}^2 - (\sum_{j=1}^n w_{i,j})^2]}{n-1}}} \quad (2)$$

где: x_j – атрибутивное значение объекта наблюдений; j; w_{ij} – пространственный вес между объектами i и j; n – общее число объектов.

Точное определение зон неоднородностей агрохимических и физико-химических показателей в пределах поля либо земельного массива является необходимым условием эффективного внедрения координатного 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. В частности, при применении интерполяционных моделей, позволяющих с высокой точностью прогнозировать фактическое пространственное распределение агрохимических и физико-химических показателей почвы и создавать актуальные карты по результатам агрохимических обследований необходимо правильно подобрать параметры вариограммы. Исключительно важным является и определение величины фик-

сированного расстояния или минимального расстояния окрестности поиска соседства, на которой существует связь (пространственная автокорреляция) между двумя точками с известным значением того либо иного почвенного параметра.

При выполнении пошаговой пространственной автокорреляции выделялись десять интервалов расстояний, равномерно распределенных по всему экстенду. Для каждого интервала рассчитывался глобальный индекс Морана и интервал, для которого данный индекс будет наибольшим, принимался в качестве оптимального расстояния для окрестности поиска. В табл. 2 приведены результаты определения минимального расстояния окрестности поиска ближайшего соседства.

В нашем случае величина расстояния, с которого необходимо начать анализ пространственной автокорреляции, составила 550 м, тогда как величина приращения (лага), установленная эмпирическим путем, колебалась от 50 м для содержания в почве водорастворимого бора, кислоторастворимых форм цинка, марганца и рН почвенного раствора до 100 м для содержания в почве гумуса и до 250 м для содержания в почве подвижных фосфора и калия и кислоторастворимой меди.

Таблица 2. Минимальное и максимальное расстояния окрестности поиска ближайшего соседства

Название показателя	Расстояние окрестности поиска, м		Минимальное расстояние окрестности поиска		Максимальное расстояние окрестности поиска	
	минимальное	максимальное	дисперсия	z-оценка	дисперсия	z-оценка
pH _{KCl}	700	850	0,000067	28,841475	0,000045	29,273034
Гумус, %	1050	1250	0,000030	59,854804	60,061236	0,000022
P ₂ O ₅ , мг/кг	2550	2550	0,000006	89,678997	0,000006	89,678997
K ₂ O, мг/кг	2050	2050	0,000009	71,995204	0,000009	71,995204
B, мг/кг	950	950	0,000037	40,763689	0,000037	40,763689
Cu, мг/кг	1550	1550	0,000015	61,540427	0,000015	61,540427
Zn, мг/кг	700	700	0,000065	54,399557	0,000065	54,399557
Mn, мг/кг	850	850	0,000045	32,823974	0,000045	32,823974

Именно величину лага следует учитывать при подборе шага в процессе создания мониторинговой сети наблюдений за качественным состоянием земель для целей точного земледелия. К сожалению, в современной практике агрохимического мониторинга, реализуемого в Беларуси, обследование почв проводится без точного геопозиционирования, поэтому при повторном обследовании трудно с уверенностью утверждать, что пробы были отобраны в том же самом месте. Из этого следует, что информация, полученная таким способом, не отражает реальную ситуацию и динамику изменения почвенных показателей на поле, что приводит к неверным результатам расчёта доз удобрений и непосредственно сказывается как на экономической деятельности сельскохозяйственного предприятия, так и на экологической обстановке в пределах агроландшафта [21].

Для того, чтобы определить, имеет ли место явление кластеризации по отношению к атрибутивным данным, каковыми в нашем случае являются сведения о различных показателях почвы, рассчитывалась величина глобального индекса Морана. Глобальный индекс Морана для нормально распределенных данных лежит в диапазоне от -1 до 1: 1) величина индекса +1 означает детерминированную прямую зависимость – группировку схожих (низких или высоких) значений и свидетельствует о наличии кластеризации данных; 2) величина индекса 0 означает абсолютно случайное распределение данных; 3) величина индекса -1 означает детерминированную обратную зависимость – идеальное перемешивание низких и высоких значений, напоминающее шахматную доску, что свидетельствует о равномерном распределении данных. Данный индекс является мерой пространственной автокорреляции и характеризует наличие или отсутствие пространственной автокорреляции геоданных. В табл. 3 приведены результаты определения величины глобального индекса Морана I для каждого из физико-химических и агрохимических показателей. В ней указана величина глобального индекса Морана I, рассчитанная для выборки по значениям атрибута, а также величина z-оценки, позволяющие судить о характере распределения данных.

Таблица 3. Результаты определения величины глобального индекса Морана

Название показателя и объем выборки	Фактический глобальный индекс Морана	Ожидаемый глобальный индекс Морана	Дисперсия	z-оценка
pH _{KCl} , n=1622	0,197827	-0,000617	0,000041	31,058111
Гумус, %, n=1636	0,277465	-0,000612	0,000019	63,163917
P ₂ O ₅ , мг/кг, n=1630	0,204838	-0,000614	0,000005	91,269389
K ₂ O, мг/кг, n=1634	0,221134	-0,000612	0,000008	79,800517
B, мг/кг, n=1633	0,240076	-0,000615	0,000033	41,920766
Cu, мг/кг, n=1611	0,218027	-0,000621	0,000013	59,681461
Zn, мг/кг, n=1638	0,360388	-0,000611	0,000058	47,335097
Mn, мг/кг, n=1627	0,219248	-0,000615	0,000040	34,559781

Фактическая величина глобального индекса Морана I колеблется в пределах от 0,197827 до 0,360388, следовательно, данные об агрохимических и физико-химических свойствах почвы в преде-

лах исследуемой территории распределены не случайно и кластеризованы. Поскольку величина z-оценки во всех случаях превышает 2,58, то с вероятностью 99 % можно утверждать, что кластеризованный тип распределения данных является не случайным. Следует отметить также, что при расчете глобального индекса Морана I учитывались не координаты пространственных данных, а их атрибутивные значения.

Степень кластеризации значений (поиска неожиданных всплесков высоких либо низких значений в пространстве) для каждой выборки данных определяли посредством вычисления общего индекса Getis-OrdG, с помощью которого оценивали общую структуру и тренд геоданных. Если фактическая величина общего индекса Getis-OrdG больше ожидаемой, наблюдается кластеризация данных с высокими значениями атрибута, если меньше – имеет место кластеризация данных с низкими значениями атрибута.

По результатам определения величины фактического общего индекса Getis-OrdG установлено, что имеет место его превышение над ожидаемым значением для выборок данных о содержании в почве гумуса, подвижных фосфора и калия, кислоторастворимых меди и цинка и для данных о величине pH почвенного раствора. Судя по величине z-параметра, которая превышала 2,58, с вероятностью 99 % можно утверждать, что установленный сильно кластеризованный тип распределения данных с высокими значениями является не случайным, о чем свидетельствует и величина p-значения, не превышающая 0,000008 при допустимом значении 0,01. В качестве параметра концептуализации пространственных отношений был выбран `fixed_distance_band`, при котором каждый объект анализировался в контексте соседних объектов в пределах указанного порогового расстояния, определенного в процессе пошаговой пространственной автокорреляции, за пределами которого влияние соседних объектов не учитывалось. Для данных о содержании в почве кислоторастворимого марганца установлено наличие кластеризации данных с низкими значениями, а данные о содержании водорастворимого бора являются не кластеризованными (z-оценка = -0,323185, p-значение составляет 0,746555).

Анализ горячих точек (от англ. Hot Spot Analysis, HSA) является качественным методом исследования и инструментом предварительной оценки геоданных, который ориентирован на определение приоритетных областей («горячих точек») и позволяет установить наличие кластеризации данных с высокими и низкими значениями [22]. В анализе горячих точек исследуются: 1) все объекты изучаемой области данных; 2) окрестность каждого из объектов; 3) изучаемая область данных. Целью анализа является определение наличия у окрестности объекта статистически значимых отличий изучаемого атрибута от всей области значений. Если в окрестности объекта значение изучаемого атрибута выше, чем в изучаемой области, объект является «горячей точкой», если ниже – «холодной». Его выполняют посредством определения величины индекса $Getis-OrdG_i^*$ – статистического показателя, рассчитываемого для каждого пространственного объекта в наборе данных. Однако следует отметить, что при расчете индекса $Getis-OrdG_i^*$ учитываются не атрибутивные значения отдельных объектов, а атрибутивные значения их окрестностей, которые рассчитываются для каждого объекта и сравниваются со значениями в остальной области исследований.

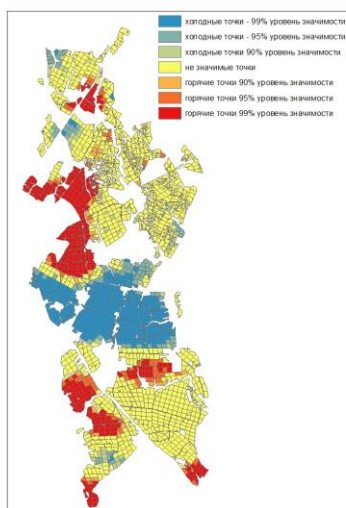
Полученные итоговые z-оценки и p-значения свидетельствуют о том, в какой области пространства кластеризуются объекты с высокими или низкими значениями. При этом выполняется анализ каждого объекта в контексте соседних объектов. Чтобы быть статистически значимой «горячей» либо «холодной» точкой, объект должен иметь высокое или низкое значение и быть окружен другими объектами с такими же высокими или низкими значениями. Локальная сумма значений для объекта и его соседей сравнивается пропорционально с суммой всех объектов; когда локальная сумма сильно отличается от ожидаемой локальной суммы, и когда это отличие является слишком большим, чтобы быть результатом случайного процесса, получается статистически значимая z-оценка. Высокое значение z-оценки и небольшая величина p-значения для функции указывают на наличие статистически значимой «горячей точки». Низкое отрицательное значение z-оценки и небольшая величина p-значения указывают на наличие статистически значимой «холодной точки». Чем выше (или ниже) показатель z, тем более интенсивна кластеризация данных. Значения z-оценки, близкие к нулю означают, что пространственная кластеризация данных отсутствует.

В результате выполнения анализа горячих точек были определены статистически значимые пространственные кластеры высоких значений (горячих точек) и низких значений (холодных точек) для всех изучаемых показателей и выполнена визуализация полученных данных (рис. 1–2).

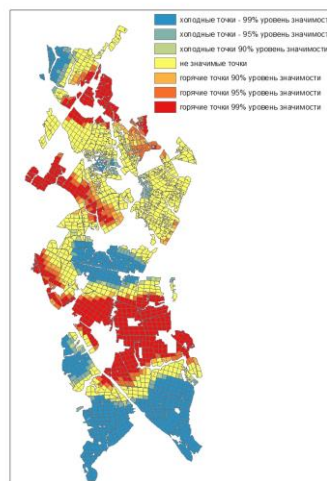


Рис. 1. Результаты анализа «горячих точек» (а – рН_{KCl}; б – содержание гумуса; в – содержание фосфора; г – содержание калия)

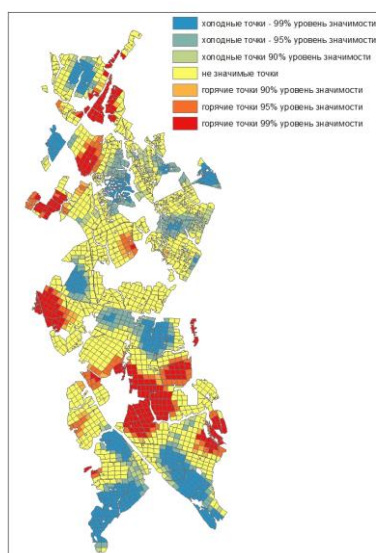
Такая информация дает возможность визуально идентифицировать, где именно в пределах территории исследований наблюдаются максимальные и минимальные значения изучаемых свойств почв. Это, в свою очередь, позволяет сформировать однородные земельные массивы с высокими и низкими показателями того или иного признака, которые могут быть преобразованы в векторные пространственные данные, что позволит определить площадь этих массивов в пределах землепользования сельскохозяйственного предприятия. На основании результатов анализа горячих точек следует формировать менеджмент-зоны – однородные участки, в пределах которых будут осуществляться те или иные агрохимические мероприятия. Кроме того, данные зоны посредством использования функциональных возможностей ГИС могут быть разбиты на рабочие участки, сформированные под ширину захвата используемой высокоточной сельскохозяйственной техники, а полученные картографические изображения – использоваться в качестве карт-заданий для ее работы.



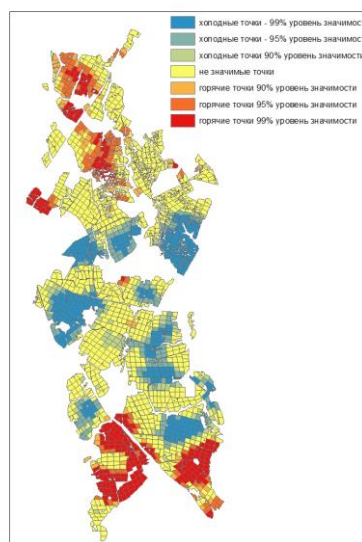
а)



б)



в)



г)

Рис. 2. Результаты анализа «горячих точек»
(а – водорастворимый бор; кислоторастворимые: б – медь; в – цинк; г – марганец)

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. Рынок такого рода продуктов в структуре элементов системы точного земледелия в странах ЕС за последние 5 лет увеличился более, чем на 17,5 % и составляет сегодня около 32 %. Кроме того, использование точных карт-заданий, адаптированных под условия конкретных сельскохозяйственных предприятий, позволяет снизить затраты при дифференцированном внесении минеральных удобрений на 10–25 €/га, а при дифференцированном внесении извести – на 25 €/га [2, 5].

Анализ кластеров и выбросов идентифицирует концентрации высоких значений, концентрации низких значений и пространственные выбросы данных об агрохимических и физико-химических свойствах почвы и помогает установить, где проходят наиболее четкие границы между контурами с высоким и низким значением того либо иного показателя в почве и есть ли в пределах исследуемой территории аномально высокие или аномально низкие значения показателей, которые можно отнести к пространственным выбросам. В результате выполнения анализа кластеров и выбросов по результа-

там оценки величины локального индекса Морана I, z-оценки и p-значения установлено наличие пространственных выбросов высоких и низких значений для всех исследуемых показателей (рис. 3).

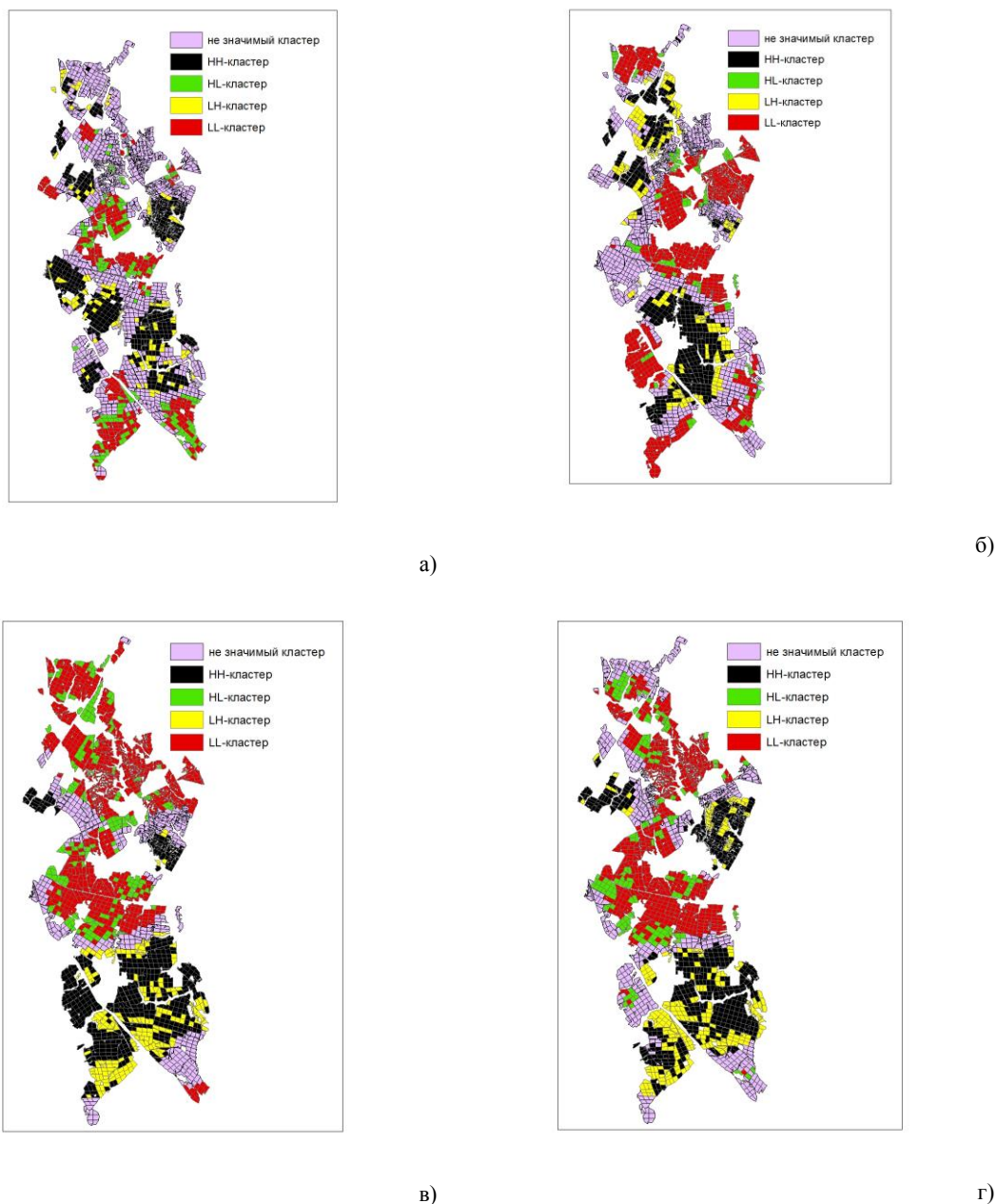


Рис. 3. Результаты анализа кластеров и выбросов (карты локальных индикаторов пространственной ассоциативности) (а – рН_{к_с}; б – содержание гумуса; в – содержание фосфора; г – содержание калия)

Максимальным количеством пространственных выбросов с высокими и низкими значениями характеризуются данные о содержании в почве подвижных фосфора и калия – 344 и 369 соответственно. В целом количество кластеров с низкими значениями в 1,3 раза превышает количество кластеров с высокими значениями. Наименьшим количеством выбросов характеризуются данные о содержании в почве кислоторастворимых цинка и марганца – 122 и 167 соответственно. Пространственные выбросы могут быть обусловлены как несовершенством методики отбора проб почвы при выполнении ее агрохимического обследования (выбросы содержания гумуса в почве), так и несовершенством применяемых методов картографирования результатов агрохимических исследований, основанных на определении средневзвешенного показателя.

По нашему мнению, при обнаружении участков-выбросов необходимо провести дополнительное их обследование с целью уточнения ситуации. Также необходимо исключать эти участки из набора данных при выполнении моделирования пространственного распределения того либо иного показателя посредством метода интерполяции. В частности, применение методов кригинга требует наличия

данных, распределение которых нормально, либо близко к нормальному. С другой стороны, наличие выбросов может быть обусловлено и объективными причинами, например, применением различных доз минеральных удобрений либо химических мелиорантов в пределах отдельных рабочих участков. Этим, в частности, может быть объяснена пестрота пространственного распределения подвижных фосфора и калия, связанная, по всей видимости, именно с применением различных норм фосфорно-калийных удобрений.

Для получения оптимальных результатов при определении пространственных выбросов был выполнен оптимизированный анализ, при котором вычисления локального индекса Морана I производилось автоматически.

В результате оптимизации кластерного анализа количество выбросов с высокими и низкими значениями значительно сократилось. Максимальное количество выбросов с высокими значениями установлено для данных о содержании фосфора (84 кластера) и кислоторастворимой меди (96 кластеров), тогда как максимальным количеством выбросов с низкими значениями характеризуются данные о содержании в почве гумуса (135 кластеров) и меди (148 кластеров). Как и до оптимизации, минимумом выбросов характеризовались данные о содержании в почве кислоторастворимых цинка и марганца. При выполнении данного анализа также было уточнено оптимальное расстояние окрестности поиска ближайшего соседства, которое составило, м: $r_{H_{KCl}}$ – 683,38; гумус – 1279,92; фосфор подвижный – 890; калий подвижный – 889; бор водорастворимый – 1081,32; медь кислоторастворимая – 1480,68; цинк кислоторастворимый – 682,88; марганец кислоторастворимый – 682,88. Уточненное расстояние окрестности поиска целесообразно использовать при пространственном моделировании в качестве одного из параметров модели вариограммы.

Заключение

Использование геостатистического анализа данных о качественном состоянии земель позволяет:

- 1) выявить и математически оценить пространственное распределение агрохимических и физико-химических показателей почвы;
- 2) изучить пространственную автокорреляцию данных и определить величину лага, которую следует учитывать при подборе шага в процессе создания мониторинговой сети наблюдений за качественным состоянием земель для целей точного земледелия;
- 3) оценить кластеризацию данных о свойствах почвы и определить местоположения кластеров в пространстве;
- 4) выполнить визуализацию кластеров путем построения карт локальных индикаторов пространственной ассоциативности;
- 5) установить наиболее четкие границы между плодородными и мало плодородными землями, позволяющие определить менеджмент-зоны для целей точного земледелия, в пределах которых будут осуществляться те или иные землеустроительные мероприятия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Национальная стратегия устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2030 года [Электронный ресурс] : протокол Президиума Совета Министров Республики Беларусь от 2 мая 2017 г. № 10 / Национальная комиссия по устойчивому развитию Республики Беларусь. – Режим доступа: <chrome-extension://mhjfbmdgcfjbbpaeofofohoefgiehjai/index.html>.
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. Национальная система мониторинга окружающей среды Республики Беларусь: результаты наблюдений, 2018 год / Под общей редакцией Е.П. Богодяж – Минск, Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды. – 2019. – 476 с.
4. Мысльва, Т. Н. Геостатистический анализ пространственного распределения агрохимических свойств почв земель сельскохозяйственного назначения / Т. Н. Мысльва, Ю. А. Белявский / Приемы повышения плодородия почв и эффективности удобрения : материалы Международной научно-практической конференции, посвященной памяти ученых: А. И. Горбылевой, Ю. П. Сиротина и В. И. Тюльпанова. – Горки: БГСХА, 2019. – С. 101–103.
5. J. 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, 2014. – 57 p.
6. Митчелл Э. Руководство по ГИС-анализу. Ч 1. Пространственные модели и взаимосвязи / Э. Митчелл. – ESRI: 2000. – 170 с.
7. Mitchell, A. The ESRI Guide to GIS Analysis /A. Mitchell. – Esri Press, 2005. – Volume 2. – 252 p.
8. Kurowska K. Possibilities use to selected methods of spatial data mining in demographic data analytics / K. Kurowska E. Kietlinska, H. Kryszk // International scientific journal: Baltic surveying – 2018. – Vol. 9. – P.56 – 62.
9. Барлиани, И. Я. Возможности использования ГИС-технологий в системе планирования и управления территорией / И. Я. Барлиани // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2016. – Вып. 6. – №1. – С. 247–250.
10. Каганович, А. А. Планирование территориальной устойчивости с использованием геоинформационных систем / А. А. Каганович // Известия Санкт-Петербургского госуд. аграрного университета. – 2017. – №1(46). – С. 203–207.
11. GIS for Housing and Urban Development / National Research Council. – Washington, DC: The National Academies Press. – 2003. – 142 p.
12. Чымыров, А. У. Использование ГИС в территориальном планировании / А. У. Чымыров, А. К. Бектуров // Вестник КГУСТА. – 2013. – №2. – С. 124–129.

13. Бакланов, П. Я. Региональные геоинформационные системы в природопользовании на Дальнем Востоке / П. Я. Бакланов, В. В. Ермошин, С. М. Краснопеев // Открытое образование. – 2010. – №5. – С. 12–23.
14. Applying geographical information systems (GIS) to environmental and resource economics / Bateman, I., Jones, A., Lovett, A. [et al.] // Environmental and Resource Economics. – 2002. – Vol. 22. – p. 219–269.
15. Помелов, А. С. Структурирование земельных ресурсов и регулирование землепользования в Беларуси / А. С. Помелов ; Общественное объединение «Земельная реформа». – Минск: РУП «БелНИЦзем», 2013. – 527 с.
16. Колмыков, А. В. Методология кластерной оценки устойчивого социально-экономического развития административных районов Беларуси / А. В. Колмыков // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2018. – № 3. – С. 25–31.
17. Дудко, В. Ф. Проблемы современного земельного кадастра в Беларуси / В. Ф. Дудко // Современные проблемы землеустройства и земельного кадастра: матер. междунар. научно-произв. конф. – Горки, 2000. – С. 80–84.
18. Мороз, Г. М. Оптимизация сельскохозяйственного землепользования / Г. М. Мороз, Г. И. Кузнецов // Сельскохозяйственный вестник. – Минск. – 2003. – №5. – С. 8–10.
19. Клебанович, Н. В. Географическая обусловленность кислотности почв Беларуси и эволюция подходов к ее нейтрализации / Н. В. Клебанович // Вестник БГУ. Серия 2, Химия. Биология. География. – 2013. – №2. – С. 81–86.
20. Типизация земель и использование ее результатов при формировании рабочих участков / Ю. П. Качков [и др.] // Земля Беларуси. – 2011. – № 3. – С. 41–48.
21. Якушев, В. В. Точное земледелие: теория и практика / В. В. Якушев. – СПб.: ФГБНУ АФИ, 2016. – 364 с.
22. Дидиков, А. Е. Применение метода «Анализ горячих точек» для повышения эффективности управления предприятием и выявления значимых экологических проблем / А. Е. Дидиков, М. Е. Алексеева // Экономика и экологический менеджмент. – 2015. – №3. – С. 273–282.