Василий РАУБО

кандидат экономических наук, доцент
(Белорусский государственный аграрный технический университет)

Сергей ОСНОВИН

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент
(Белорусский государственный экономический университет)

Наталья МАЛЬЦЕВИЧ

кандидат экономических наук, доцент
(Институт бизнеса Белорусского государственного университета)

Галина РУСКЕВИЧ

старший научный сотрудник

Алексей КИРЕЙКОВ

заведующий отделом
(отдел обращения с отходами «БелНИЦ «Экология»)

УДК 634.739:631.319

Статистический анализ базовых элементов систем с использованием точного земледелия

Введение

В мире широко распространена система точного земледелия. Каждое поле в ней рассматривается с учетом его специфики (неоднородности рельефа, состава почвы, агрохимических характеристик). Принятие во внимание этих параметров позволяет находить для пахотных участков оптимальные варианты обработки и использования. Иными словами, возделывание тех или иных культур предполагает корректировку аграрных технологий с учетом локальных характеристик отдельных наделов. Кроме того, система точного земледелия предполагает использование обратной связи путем анализа объемов продукции, полученной с различных участков. Благодаря этому, создаются предпосылки для обеспечения экологической безопасности применяемых аграрных технологий.

Использование данных о состоянии участков полей стало возможным благодаря наличию на мобильных агрегатах компьютерных устройств и использованию спутниковой навигационной системы GPS, обеспечивающей точное позиционирование ее пользователей. Применение GPS-контроллеров позволяет составлять карты полей с учетом условий возделывания различных культур и объемов их выращивания на отдельных участках.

Земля – один из компонентов окружающей среды. Она представляет собой важнейший природный ресурс, на протяжении всей истории человечества используемый для удовлетворения разнообразных потребностей – ведения сельского хозяйства, размещения жилых и производственных зданий, получения доступа к иным природным объектам.

В условиях научно-технического прогресса земля не утратила ни одного из своих назначений. Наука и техника, достигнув успехов в освоении природы, все же не нашли замены данному средству производства. Более того, в последние годы к большинству исследователей пришло понимание ценности земель как незаменимого элемента единого мира природы, участвующего в поддержании экологического баланса, необходимого для выживания человечества.

Главной целью государственной экологической политики является создание условий для результативного использования природных ресурсов и снижения антропогенной нагрузки на окружающую среду. По данным Реестра земельных ресурсов Республики Беларусь, по состоянию на 1 января 2016 г. площадь земель нашей страны составляла 20760 тыс. га, из которых на сельскохозяйственные приходилось 8581,9 тыс. га, или 41,34% от общей площади [1].

Оптимизации структуры землепользования способствуют перераспределение и вывод из оборота мелкоконтурных, заболоченных и малопродуктивных сельхозугодий с их последующим переводом в иные виды земель (в том числе и лесные). В Программе социально-экономического развития Республики Беларусь на 2016–2020 годы указано на необходимость перехода к точному земледелию, предполагающему использование спутниковой навигации, а также автоматизированных систем для сбора информации и управления производственными процессами [2].

В соответствии с основными положениями упомянутой программы переход к «зеленой» агроэкономике предполагает:

восстановление естественного плодородия почв;

повышение урожайности сельскохозяйственных культур;

внедрение и адаптацию энерго- и ресурсосберегающих технологий;

совершенствование аграрной политики.

Среди современных концепций «зеленого» аграрного производства можно выделить адаптивно-ландшафтное земледелие, биологизированное сельское хозяйство, точное (координатное) земледелие, органическое сельское хозяйство [3]. Таким образом, точное земледелие рассматривается как неотъемлемая часть ресурсосберегающего и экологичного аграрного производства.

Цель данного исследования – применение математических моделей (в частности, положения теории множеств) для оценки состояния сельскохозяйственных земель.

Основная часть

Основы прецизионного (точного) земледелия были заложены в XX веке. В 1988 г. начались первые опыты по использованию принципиально новых мобильных агрегатов для смешивания и внесения удобрений. Однако в тот период системы спутниковой навигации не были настолько точными, как сейчас. Для ускорения соответствующих работ страны Европейского Союза в 1992 г. разработали план финансирования перспективных проектов автоматизации сельхозтехники. Первопроходцем в деле внедрения прецизионного земледелия является Великобритания.

Внедрение подобной системы в Беларуси позволит:

выявлять специфику почвенного состава и принимать во внимание ее влияние на искусственные экосистемы;

прогнозировать продуктивность конкретных культур в определенных условиях (в том числе с учетом реакции растений на удобрения).

Положительного эффекта также стоит ожидать при решении агрометеорологических и агрохимических задач.

Результатами внедрения точного земледелия станут:

минимизация негативного влияния аграропромышленного комплекса на окружающую среду;

сокращение расходов сельхозпроизводителей;

повышение урожайности ряда культур;

рост качества получаемой из них продукции;

улучшение состояния посевных площадей;

интенсификация процесса информатизации структур аграрного сектора;

более полный контроль за посевами;

составление разнотипных карт полей с расширенным спектром возможностей;

мониторинг заданных участков почв для определения точных доз удобрений.

Современные аграрные технологии представляют собой комплексы операций по управлению ведущимися в агроценозах продукционными процессами с целью достижения планируемой урожай-

ности и заданного качества продукции, обеспечения экологической безопасности, увеличения экономической эффективности сельхозпроизводства. Данные технологии относятся к категории точного земледелия, которое предполагает гибкое управление всеми процессами с максимально возможным пространственным разрешением.

Основой технологии точного земледелия является дифференцированное воздействие на систему «почва–растение», обеспечивающее высокую эффективность использования наделов. Учет их пространственной неоднородности и использование современных систем позиционирования позволяют в реальном времени и в любой точке поля осуществлять управление аграрными технологиями с обратной связью, а благодаря этому, более рационально использовать ресурсы и уменьшить негативное воздействие на окружающую среду. В основе точного земледелия лежит управление продуктивностью посевов, основанное на учете изменений параметров среды обитания растений в пределах одного поля.

Для оценки и детектирования этих неоднородностей используются:

позиционирование с использованием систем спутниковой навигации GPS, ГЛОНАСС и Galileo;

специальные датчики;

данные, полученные в ходе фотосъемки с самолетов и спутников;

программы для агроменеджмента на базе ГИС (геоинформационных систем).

Собранные данные применяются для планирования высева, расчета норм внесения удобрений и средств защиты растений, более точного предсказания урожайности, осуществления финансового планирования. Описываемая концепция требует обязательно принимать во внимание локальные особенности почв и климатические условия.

За рубежом точное (координатное) аграрное производство ассоциируется не с концепцией устойчивого земледелия, а со стремлением агробизнеса сократить расходы и максимизировать прибыль путем внесения удобрений исключительно на тех участках, где они действительно необходимы.

Для улучшения состояния полей может применяться точное (координатное) земледелие следующих видов:

агрономическое (проводимое с учетом реальных потребностей культур в удобрениях);

техническое (совершенствование тайм-менеджмента на уровне хозяйств, в том числе для улучшения качества планирования технологических операций);

экологическое (сокращение негативного воздействия сельхозяйственного производства на окружающую среду благодаря более точной оценке потребностей культур в азотных удобрениях, позволяющей ограничивать объемы их использования и потерь);

экономическое (рост производительности и/или уменьшение расходов для повышения эффективности агробизнеса, в том числе путем сокращения затрат на внесение азотных удобрений).

Осуществляемые в цифровой форме запись и хранение историй полевых работ и урожаев могут помочь как в процессе принятия решений, так и при составлении специальной отчетности о производственных циклах.

Пространственные неоднородности сельскохозяйственных земель изменяются во времени в связи с тем, что они формируются под неоднородным воздействием физико-химических и биологических свойств почвы, внешних климатических возмущений, а также аграрных технологий. В связи с изначальным разнообразием посевного материала пространственная неоднородность сельскохозяйственных посевов является результирующей по отношению к состоянию почвенного покрова и микроклимата.

Изменения состояния посевов и почвенной среды могут быть зафиксированы благодаря выявлению участков полей с различными уровнями плодородия. Следовательно, необходимо использовать комплекс показателей, обеспечивающих достаточно полное дифференцирование земель на относительно однородные рабочие участки для последующего выбора для них оптимальных методов точного земледелия. В данный комплекс должны входить показатели, относящиеся к агрохимическим и экологическим свойствам почвенной среды, климатическим условиям, агрономической эффективности земельных участков [4, 5].

Для оценки степени неоднородности наделов с применением комплекса упомянутых показателей целесообразно использовать некоторые положения теории множеств [6, 7]. Применительно к рассматриваемой проблеме множество представляет собой совокупность точек, в которых производятся наблюдения за показателями. Фиксированное множество *T*, из точек которого состоят множества A_1, A_2, … A_n, называется пространством. Точка *t,* содержащаяся во множестве A_i или принадлежащая ему, обозначается как $t \in A_i$, находящаяся вне A_i – как $t \notin A_i$.

Множество точек, одновременно принадлежащих как A_1, так и A_2, представляется как $A_1 \cap A_2$. Операция объединения множеств *A* и *B* во множество *C* отображается как $C = A \cup B$. Множество, состоящее из множеств, называется классом.

Задачу комплексной оценки однородности земельных участков по многим показателям можно решить, основываясь на анализе распределения точек в многомерном пространстве, элементами которого являются результаты наблюдений. Для этого в качестве математической модели изучаемого земельного участка рассматривается многомерное пространство C_t – дискретное множество *T*, состоящее из точек *t*, на котором задано *m* мерных случайных векторов. Для описания данного пространства используется формула:

$$C_t = \lambda_{t1}, \lambda_{t2}, \dots \lambda_{ti}, \dots \lambda_{tmi}, \tag{1}$$

где λ_{t1} – компонента вектора 1, λ_{t2} – компонента вектора 2, λ_{ti} – компонента вектора *i* (одномерная случайная величина, соответствующая одному из показателей *t*-го объекта), λ_{tmi} – компонента вектора *m*, соответствующая комбинации из *m* показателей.

Задача решается в предположении, что λ_{ti} распределена с математическими ожиданиями M_{ti} приблизительно нормально и равными дисперсиями σ^2 для всех $t \in T$. Пространство C_t считается однородным, если для любой пары множеств C_s и C_k, содержащих n_s и n_k элементов, будет иметь место равенство:

$$\frac{1}{n_s}\sum_{t\in s} M_{ti} - \frac{1}{n_k}\sum_{t\in k} M_{ti} = \{0, 0, \dots, 0\}, \tag{2}$$

где M_{ti} – математическое ожидание случайных величин для оценки пространственной однородности земель.

Для всех $s\ k \in T$, то есть если любое представление в виде двух множеств не приведет к существенным различиям в математических ожиданиях случайных величин M_{ti}. Равенство (2) рассматривается в качестве проверяемой нулевой гипотезы. Статистический анализ однородности заключается в установлении правила для проверки данной гипотезы.

Оценка однородности земель по многим показателям может производиться с использованием приведенного в формуле (3) критерия и его сравнения с теоретическим $\chi^2_{1-\alpha}(m)$ распределением Пирсона:

$$v(T_s, T_k) = \frac{(n_s + n_k - 1)}{n_s} n_k (n_s + n_k) \left\{ \frac{\sum_{i=1}^{m}\left(n_k \sum_{t\in T_s} x_{tj} - n_s \sum_{t\in T_k} x_{tj}\right)^2}{\sum_{t\in T_k} x_{tj}^2 - \frac{1}{(n_s + n_k)}\left(\sum_{t\in T_k \cup T_s} x_{tj}\right)^2} \right\}, \tag{3}$$

где $v(T_s, T_k)$ – функция, заданная на множестве T_{sk}, x_{tj} – значение *j*-го показателя y_t-го опыта, принадлежащего множеству T_{sk}, n_{sk} – число повторностей (лет наблюдений), причем $n_{sk} \geq 2$, то есть формула (2) применима тогда, когда на конкретном объекте имеются 2 и более повторности определения показателей; *m* – количество показателей, измеряемых на объекте (земельном участке), или так называемое число степеней свободы, то есть число классов, значения которых можно задать произвольно; λ – уровень значимости.

Физический смысл параметров n_{sk} и m состоит в том, что они характеризуют степень агрохимической, микроклиматической и агрономической изученности земельных участков.

С использованием формулы (3) для каждой из пар объектов (земельных участков) определяются значения критерия. Результаты записываются в виде матрицы:

$$\begin{matrix} v(T_1,T_2),\ v(T_1,T_3),\ ...,\ v(T_1,T_k) \\ v(T_2,T_3),\ ...,\ v(T_2,T_k) \\ v(T_s,T_k) \end{matrix} \quad (4)$$

Если проверяемая гипотеза об однородности множеств верна, то критерий (4) представляет собой значение случайной величины, распределенной по закону $\chi^2_{1-\alpha}(m)$ – при уровне значимости α и m степеней свободы. В матрице (4) из всех значений критериев выбирается минимальное, которое сравнивается с $\chi^2_{1-\alpha}(m)$. Если $min\ \nu(T_s,T_k) > \chi^2_{1-\alpha}(m)$, то проверка прекращается, а все объекты рассматриваются как существенно различающиеся между собой.

Гипотеза об однородности земельных участков принимается, если $\nu(T_s,T_k) \le \chi^2_{1-\alpha}(m)$ и отклоняется, если $\nu(T_s,T_k) > \chi^2_{1-\alpha}(m)$.

Значение $\chi^2_{1-\alpha}(m)$ устанавливается в зависимости от уровня значимости α и степени свободы m, то есть от количества показателей, измеряемых на земельном участке. Какой уровень значимости α принять, зависит от характера рассматриваемой задачи. Обычно при обработке результатов измерений значение α устанавливается в пределах от 0,05 до 0,1 [5].

Таблица функции χ^2 имеет 2 показателя – вероятность и число степеней свободы. Модель позволяет использовать до 30-ти показателей потому, что в таблицах допустимых значений χ^2 имеются данные $m \le 30$, хотя χ^2 можно рассчитать и в случае, если $m > 30$.

Приведем пример определения возможности объединения земельных участков s и k в единый рабочий участок по 6-ти показателям ($m = 6$).

Земельный участок s представлен темно-серой лесной несмытой почвой, а участок k – среднесмытой. Перечень соответствующих показателей представлен в таблице 1.

Статистические характеристики земельных участков s и k приведены в таблице 2.

Таблица 1. **Почвенно-климатические условия возделывания зерновых**

Индексы земельных участков	Повторности определения показателей на участках	Показатели					
		Содержание гумуса в слое почвы 0–20 см, (Г.), %	Отношение гуминовых и фульво-кислот, ($С_{г.}$ / $С_{ф.}$)	Продуктивные влагозапасы в период посева (W), мм	Осадки с учетом испарения в период вегетации (X_0), мм	Суммарное водопотребление (В.), мм	Урожайность, (У.), ц/га
s	1	3,2	0,87	112,0	248,0	327,0	16,0
	2	3,1	0,84	113,0	248,0	326,0	15,5
	3	3,0	0,86	111,0	247,0	325,0	15,0
k	1	2,3	0,65	88,0	248,0	346,0	13,5
	2	2,4	0,68	89,0	248,0	349,0	14,0
	3	2,5	0,69	90,0	248,0	348,0	13,9

Подставив данные таблицы 2 в формулу (2), получаем значение критерия:

$$\nu(T_s,T_k) = 0,092(51,2 + 52,6 + 53,7 + 10,8 + 53,5 + 47,1) = 24,7.$$

Интегральная функция имеет вид, $\chi^2_{1-0,05}(6) = 12,6$.

Поскольку $\nu(T_s,T_k) > \chi^2_{1-0,05}(6)$, то земельные участки s и k неоднородны. Следовательно, в этом случае технологии точного земледелия для них должны быть различными.

В вышеприведенных расчетах (6) означает количество показателей m на измеряемом объекте (земельном участке).

Таблица 2. **Статистические характеристики земельных участков**

Индексы земельных участков	Число повторностей (лет наблюдений)	Содержание гумуса в слое почвы 0–20 см, (Г.), %	Отношение гуминовых и фульво-кислот, ($С_{\cdot г.}$ / $С_{\cdot ф.}$)	Продуктивные влагозапасы в период посева (W), мм	Осадки с учетом испарения в период вегетации (X_0), мм	Суммарное водопотребление (В.), мм	Урожай-ность, (У.), ц/га
$\sum_{t=1}^{n_s} x_{tj}$							
s	3	9,3	2,6	336,0	743,0	978,0	46,5
$к$	3	7,2	2,0	267,0	744,0	1043,0	41,4
$\sum_{t \in T_k \cup T_s}^{n_s} x_{tj}^2$							
$\boldsymbol{s}$	3	28,9	2,2	37634,0	184017,0	318830,0	721,3
$к$	3	17,3	1,4	23765,0	184512,0	362621,0	571,5

Рассмотрим степень однородности земельных участков s и k по 8-ми показателям (m = 8) на оподзоленном среднесуглинистом черноземе для повторностей определения показателей на участках 1 и 2 (см. табл. 3).

Таблица 3. **Данные для определения степени однородности земельных участков**

Индексы земельных участков	Повторности определения показателей на участках	Показатели							
		Г., %	$pH_{кcl}$	Гидролитическая кислотность, $Н_{г.}$, мг-экв/100 г	мг/кг почвы			X_0, мм	У., ц/га
					N	P_2O_5	K_2O		
s	1	4,1	4,8	5,0	110,0	148,0	70,0	248,0	40,0
	2	3,3	4,9	5,0	101,0	142,0	72,0	248,0	39,5
k	1	4,0	5,0	5,5	120,0	143,0	79,0	247,0	42,0
	2	4,2	5,1	5,3	119,0	140,0	80,0	247,0	42,5

На основании приведенных показателей выполнены расчеты, которые показывают, что критерий $\nu(T_s, T_k) = 15,3$, а значение $\chi^2_{1-0,05}(8) = 15,5$, то есть в данном случае $\nu(T_s, T_k) < \chi^2_{1-0,05}(8)$.

В вышеприведенных расчетах (8) означает количество показателей m на измеряемом объекте (земельном участке).

Следовательно, рассматриваемые земельные участки однородны и их следует объединить для технологического управления [8, 9, 10].

Заключение

Точное земледелие, требующее эффективной информационной и технической поддержки, обеспечивает рациональное ведение сельского хозяйства.

Основным элементом данной технологии является программное обеспечение, позволяющее получить достоверные сведения о земельных участках для реализации агротехнических мероприятий с учетом вариабельности характеристик почв в пределах отдельных полей.

Для оценки степени однородности земельных участков по комплексу показателей используются положения теории множеств.

Внедрение точного земледелия дает возможность составить карты с выделением типов и разностей почв, а также содержания гумуса и микроэлементов. Кроме того, данная технология позволяет вести мониторинг сельскохозяйственных земель с определением границ участков и составлять кадастры угодий.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Состояние природной среды Беларуси: экол. бюл. 2015 г. – Минск, 2016. – 323 с.

2. Программа социально-экономического развития Республики Беларусь на 2016–2020 годы: утв. Указом Президента Респ. Беларусь, 15 дек. 2016 г., № 466: в ред. Указа Президента Респ. Беларусь от 30 нояб. 2017 г. // Консультант Плюс: Беларусь [Электронный ресурс] / ООО «ЮрСпектр». – Минск, 2018.

3. Дубачинская, Н. Н. Проблемы и перспективы экономического развития производства растениеводства в адаптивно-ландшафтных системах земледелия / Н. Н. Дубачинская, М. И. Андронова // Известия ОГАУ. – 2012. – № 4 (36). – Ч. 1. – С. 42–45.

4. Якушев, В. П. Статистический анализ опытных данных. Непараметрические критерии / В. П. Якушев, В. М. Буре. – СПб.: АФИ, 2001. – 61 с.

5. Метрология, стандартизация и сертификация: учебник / А. И. Аристов [и др.]. – М.: Академия, 2006. – 378 с.

6. Коломейченко, А. С. Повышение эффективности использования земельных ресурсов на основе методов математического моделирования / А. С. Коломейченко, Н. В. Польшакова // Научное мнение. – 2013. – № 5. – С. 179–184.

7. Справочник по теории вероятностей и математической статистике / В. С. Королюк [и др.]. – М.: Наука, 1985. – 640 с.

8. Польшакова, Н. В. Концептуальные основы формирования эффективного и устойчивого землепользования / Н. В. Польшакова // Вопросы образования и науки: теоретический и методический аспекты: сб. науч. тр. по материалам Международной заочной научно-практической конференции: в 7 ч. – Тамбов, 2012. – Ч. 3. – С. 91–93.

9. Долматова, Л. Г. Социо-эколого-экономические аспекты территориального планирования использования и охраны земельных ресурсов: монография / Л. Г. Долматова. – Ростов-на-Дону: СКНЦ ВШ ЮФУ, 2012. – 260 с.

10. Якушев, В. В. Точное земледелие: теория и практика / В. В. Якушев. – СПб.: ФГНБУ АФИ, 2016. – 364 с.

РЕЗЮМЕ

В статье рассмотрены элементы точного земледелия, а также программно-аппаратное обеспечение, используемое для получения пространственно ориентированных данных о сельскохозяйственных полях.

Пространственные неоднородности земель непостоянны, они формируются в результате изменения физико-химических и биологических показателей почвенной среды.

Пространственная неоднородность сельскохозяйственных посевов является результирующей по отношению к состоянию почвенного покрова и микроклимата, связанной с изначальным разнообразием посевного материала. Вариации состояния посевов и почвенной среды обусловлены наличием участков с неодинаковым уровнем плодородия.

Необходимо использовать показатели, которые позволяют получить информацию для дифференцирования земель на относительно однородные рабочие участки с целью выбора для последних оптимальных технологических решений в области точного земледелия.

SUMMARY

The article considers the elements of exact farming, as well as software and hardware used to obtain spatially oriented data on agricultural fields.

Spatial heterogeneity of lands is not permanent, they are formed as a result of changes in physico-chemical and biological indicators of the soil environment.

The spatial heterogeneity of agricultural crops is the resultant in relation to the state of the soil cover and the microclimate associated with the initial variety of seed material. Variations in the state of crops and soil environment are due to the presence of areas with unequal levels of fertility.

It is necessary to select indicators that allow obtaining information for differentiating land on relatively homogeneous work areas in order to choose the optimal technological solutions for precision farming for the latter.

Поступила 30.05. 2018