

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ И КАДРОВ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ
ОРДЕНОВ ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ»

Т. Н. Мыслыва, О. А. Куцаева

**ФОРМИРОВАНИЕ ОДНОРОДНЫХ
ТЕРРИТОРИАЛЬНЫХ МЕНЕДЖМЕНТ-ЗОН
В ПРОЦЕССЕ ВНУТРИХОЗЯЙСТВЕННОГО
ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВА ПРИ ВНЕДРЕНИИ
СИСТЕМЫ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ**

Рекомендации

*для специалистов дочерних предприятий республиканского
унитарного предприятия «Проектный институт Белгипрозем»,
специалистов сельскохозяйственных предприятий
и агрохимической службы*

Горки
БГСХА
2021

УДК 332.3(083.13)

ББК 65.32-5я73

М95

*Рекомендовано Научно-техническим советом БГСХА.
Протокол № 9 от 10 сентября 2020 г.*

Авторы:

доктор сельскохозяйственных наук, доцент *Т. Н. Мыслыва*;
старший преподаватель *О. А. Куцаева*

Рецензенты:

доктор экономических наук, доцент *А. В. Колмыков*;
директор ГП «Проектный институт «Могилевгипрозем»
Г. Г. Барковский

Мыслыва, Т. Н.

М95

Формирование однородных территориальных менеджмент-зон в процессе внутрихозяйственного землеустройства при внедрении системы точного земледелия : рекомендации / Т. Н. Мыслыва, О. А. Куцаева. – Горки : БГСХА, 2021. – 60 с. ISBN 978-985-882-062-6.

Изложена методика формирования однородных территориальных менеджмент-зон в процессе внутрихозяйственного землеустройства при внедрении системы точного земледелия в условиях конкретного сельскохозяйственного предприятия.

Для специалистов дочерних предприятий республиканского унитарного предприятия «Проектный институт Белгипрозем», специалистов сельскохозяйственных предприятий и агрохимической службы.

УДК 332.3(083.13)

ББК 65.32-5я73

ISBN 978-985-882-062-6

© УО «Белорусская государственная
сельскохозяйственная академия», 2021

ВВЕДЕНИЕ

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 [14], а в Беларуси достигает 0,1–0,4 % [12].

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 [10]. 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 [6, 9, 11]. Данная система земледелия направлена на обеспечение проектируемого уровня продуктивности агроценозов с высоким коэффициентом полезного действия вложенных средств и использования ландшафтного потенциала [2].

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» [14]. Именно оптимизация всех производственных процессов является ключевым моментом и движущей силой прецизионного земледелия, конечный результат которого – оптимизация использования ресурсов, экономия затрат и снижение негативного воздействия на окружающую среду.

Технологию точного земледелия подразделяют на *три основные подсистемы* (рис. 1):

1) *навигационные технологии* (аппаратное и программное обеспечение, координирующее движение сельскохозяйственной техники на поле);

2) *регистрирующие технологии*, использующие функциональные возможности геоинформационных систем и позволяющие выполнять дистанционный мониторинг и визуализацию его результатов;

3) *реагирующие технологии* – инструменты, аппаратное и программное обеспечение, которые позволяют варьировать размещение и использование сельскохозяйственных ресурсов.

Мировой рынок технологий точного земледелия в среднем составляет 2,3 млрд. евро и, как ожидается, с каждым годом будет увеличиваться в среднем на 12 %.

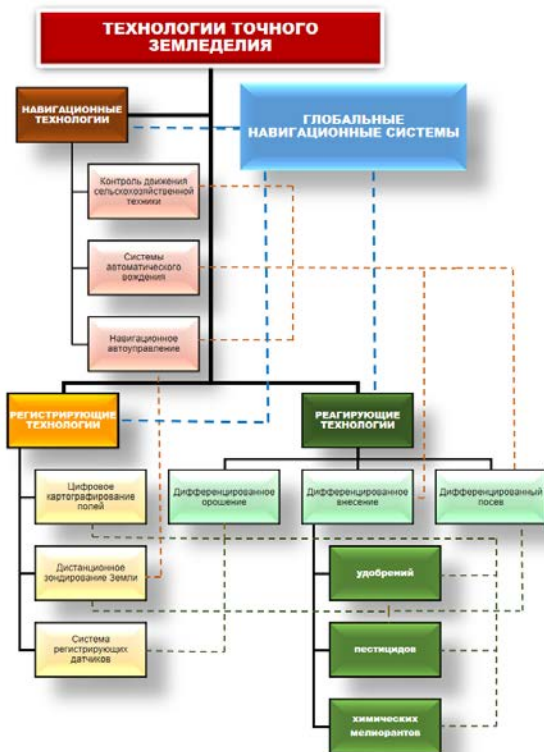


Рис. 1. Структура системы точного земледелия [5]

В частности, в ЕС рост доли использования сельскохозяйственной техники, оборудованной системами точного позиционирования, возрастет с 7,5 % в 2010 году до 35 % в 2020 году, а рост продаж такой техники составит от 100 тыс. ед/год в 2010 году до 500 тыс. ед/год в 2020 году [23].

Наиболее востребованными элементами технологии точного земледелия на современном этапе его внедрения являются цифровое картографирование (создание электронной карты полей) и параллельное вождение (не только использование автопилотируемой техники, но и автоматическое отключение механизмов и агрегатов на перекрытиях при посеве, внесении удобрений и агрохимикатов) [1, 3].

Одним из важнейших элементов системы точного земледелия является *дифференцированное применение* минеральных удобрений и агрохимикатов [7, 23]. Данный прием позволяет восполнить недостаток питательных веществ именно на тех участках поля, где это необходимо, и при этом не повысить содержание элементов питания выше оптимальных значений на тех участках, где его находится в достаточном количестве. 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 [4, 5].

Значительным препятствием на пути перехода к инновационным стратегиям ведения сельскохозяйственного производства 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 точного земледелия.

Следует отметить, что внутрихозяйственное землеустройство – элемент управления земельными ресурсами, сохранившийся в Республике Беларусь со времен СССР по причине сохранения как государственной собственности на земли сельскохозяйственного назначения, так и сельскохозяйственных предприятий, существовавших в советский период в форме колхозов и совхозов. Однако в настоящее время в Беларуси преобладают работы, связанные с межхозяйственным землеустройством, состоящие в обновлении данных земельно-информационной системы, разработке проектов отводов земельных участков, оформлении технической документации и установлении на местности границ земельных участков в связи с образованием сель-

скохозийственных и несельскохозяйственных землепользований. Вместе с тем необходимо отметить исключительную важность проведения внутрихозяйственного землеустройства в контексте перехода к внедрению инновационных технологий, в частности цифрового земледелия, поскольку именно данный вид землеустроительной деятельности создает территориальную основу эффективного использования земель, их охраны и внедрения прогрессивных систем хозяйствования (табл. 1).

Современное землеустройство неспособно обеспечить принятие комплексно верных решений по имплементации систем точного земледелия на основе неактуальной геопространственной информации о внутриполевой пестроте почвенного плодородия. Причиной этого является то, что в существующей 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. Способы составления почвенных картограмм, рекомендуемые в инструкциях 60–70-х годов прошлого века и до сих пор используемые в работе агрохимической службы, морально и технически устарели.

Таблица 1. **Функции внутрихозяйственного землеустройства при внедрении элементов системы точного земледелия в Беларуси**

Элемент системы точного земледелия	Функция внутрихозяйственного землеустройства	Степень реализации функции
Цифровые контуры полей севооборота	Создание векторных моделей и базы геопространственных данных о границах полей	Реализована частично
Мониторинг внутриполевой пестроты почвенного плодородия	Создание геопозиционированной сети мониторинговых наблюдений	Не реализована
Цифровое картографирование внутриполевой пестроты почвенного плодородия	Создание прогнозных моделей пространственного распределения агрохимических, физико-химических и агрофизических свойств почвы	Не реализована
Цифровое картографирование урожайности	Создание цифровых карт динамики внутриполевой продуктивности сельскохозяйственных культур	Не реализована
Создание карт-заданий для дифференцированного внесения минеральных удобрений	Идентификация и выделение однородных по агрофизическим и агрохимическим свойствам почв и агротехнологическим характеристикам зон	Не реализована

Из этого следует, что информация, полученная таким способом, не отражает реальную ситуацию и динамику изменения почвенных показателей на поле, что приводит к неверным результатам расчета доз удобрений и непосредственно сказывается как на экономической деятельности сельскохозяйственного предприятия, так и на экологической обстановке в пределах агроландшафта [13].

Создание актуальных карт 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 % [14], демонстрируя устойчивую тенденцию к увеличению.

Главная задача современного землеустройства в контексте внедрения точного земледелия заключается в разработке методики создания актуальных картографических материалов и дифференциации территории землепользования по комплексу показателей качества земель с одновременным созданием динамических картографических изображений и базы геопространственных данных об имеющихся показателях количественного и качественного состояния почв.

В настоящих рекомендациях приводится методика формирования однородных территориальных менеджмент-зон в процессе внутрихозяйственного землеустройства при внедрении элементов системы точного земледелия.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В технологии точного земледелия под *менеджмент-зоной* (зоной управления) понимается субрегион поля, который определяется относительной однородностью продуктивности выращиваемых в его пределах сельскохозяйственных культур и (или) почвенных параметров, требующий применения одинаковой нормы удобрений, дозы пестицидов [15, 16].

На сегодняшний день сложилось преимущественно *два подхода к определению менеджмент-зон*: 1) поля разделяются на зоны управления в соответствии со значениями одной или нескольких характеристик почвы или урожая; 2) менеджмент-зоны определяются по вели-

чине окупаемости затрат урожаем [20]. Менеджмент-зона, по мнению авторов рекомендаций, является подсистемой точного земледелия и представляет собой комбинацию входных параметров, являющихся базой для ее определения и формирующих отклик в виде экономического эффекта, проявляющегося в различных аспектах. Внутрихозяйственное землеустройство является универсальным механизмом для идентификации менеджмент-зон и обеспечения взаимодействия между их входными и выходными параметрами (рис. 2).

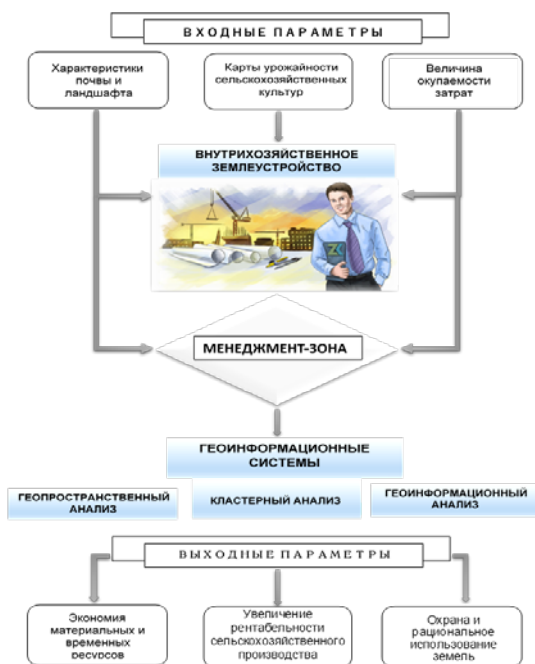


Рис. 2. Структура менеджмент-зоны как подсистемы точного земледелия

Реализацию же функций землеустройства по идентификации менеджмент-зон возможно осуществить посредством применения функциональных возможностей геоинформационных систем, в частности возможностей геопространственной статистики, кластерного анализа и геоинформационного анализа.

Именно менеджмент-зона является определяющим фактором, влияющим как на дальнейшую разработку системы точного земледелия для конкретного землепользования, так и на принятие решения о внедрении отдельных ее элементов в сельскохозяйственное производство, что является наиболее приемлемым для Беларуси, учитывая современную экономическую ситуацию, систему хозяйствования и отсутствие частной собственности на земли сельскохозяйственного назначения.

Следует отметить, что поскольку элементы технологии точного земледелия только начали внедряться в Беларуси, применение подхода, основанного на экономических характеристиках, не представляется возможным. Однако и определение зон по значениям почвенных параметров и показателям урожайности также имеет ряд ограничений. В частности, на сегодняшний день в сельскохозяйственных предприятиях Беларуси имеется незначительное количество комбайнов, оснащенных приспособлениями для точного учета урожая. Исходя из этого, при разработке методики определения менеджмент-зон для условий Республики Беларусь в качестве исходных показателей рекомендуются почвенные параметры, наиболее часто используемые агрономическими службами сельскохозяйственных предприятий [6, 19]:

- содержание в почве гумуса;
- содержание в почве подвижных фосфора и калия;
- рН почвенного раствора.

Перечень рекомендуемых почвенных параметров может быть расширен, исходя из наличия геопространственных данных о свойствах почвы и требований, предъявляемых к определению менеджмент зон.

При идентификации менеджмент-зон с соответствующим качеством земель в пределах конкретного сельскохозяйственного предприятия **в качестве исходных данных** целесообразно использовать:

- данные ЗИС на территории выполнения работ по разграничению менеджмент-зон;
- данные агрохимического обследования территории хозяйства областной проектно-изыскательской станцией агрохимизации.

При выполнении геостатистических исследований геопространственных данных и многофакторного геопространственного анализа, а также для визуализации идентифицированных менеджмент-зон целесообразно использовать функциональные возможности ArcGIS версии 10.3 и выше.

Блок-схема механизма выполнения идентификации менеджмент-зон также с соответствующим качеством земель представлена на рис. 3.

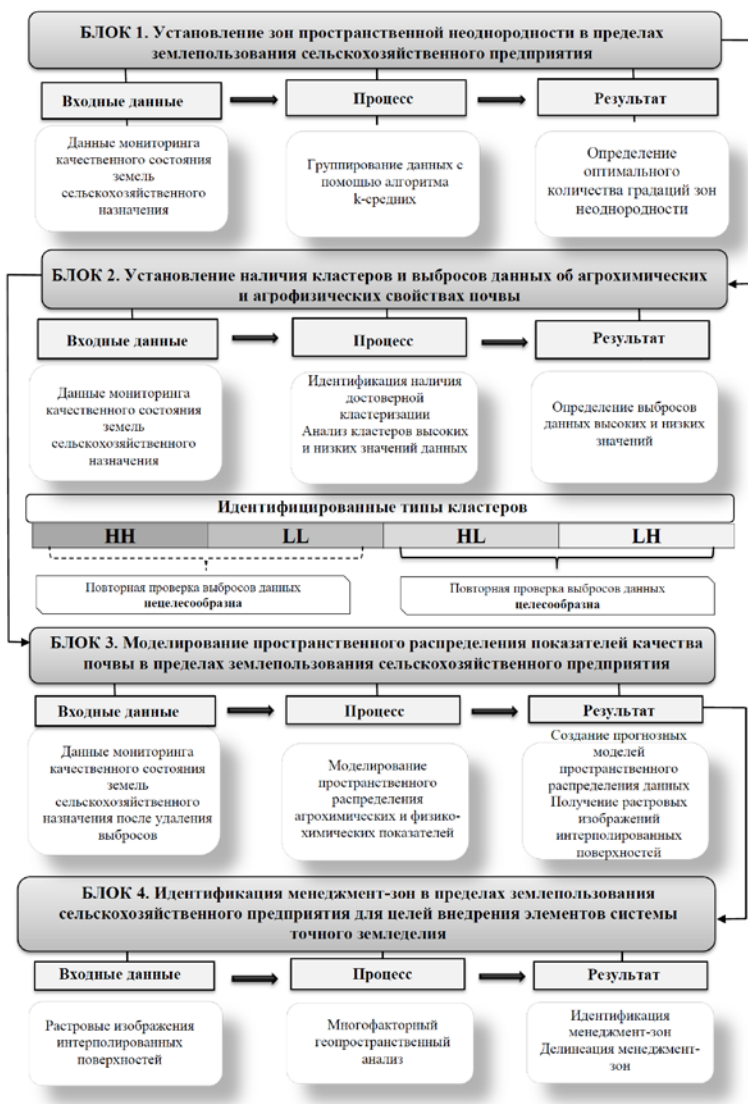


Рис. 3. Механизм идентификации менеджмент-зон с соответствующим качеством земель для целей точного земледелия

2. УСТАНОВЛЕНИЕ ЗОН ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ В ПРЕДЕЛАХ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Для определения оптимального числа градаций качества земель, а также установления факта наличия возможности выполнения классификации территории землепользования по комплексу требуемых признаков необходимо провести *анализ группирования геопространственных данных*, с помощью которого осуществляется процедура классификации. Целью ее является поиск естественных кластеров в данных.

Анализ группирования данных выполняется посредством использования функциональных возможностей набора инструментов «Пространственная статистика» ArcGIS версии 10.3 и выше. В данном наборе используется инструмент геообработки «Анализ группирования» поднабора инструментов «Расчет кластеризации», который группирует объекты на основе атрибутов.

В диалоговом окне инструмента необходимо выполнить следующие настройки (рис. 4):

- в поле «Входные объекты» указать шейп-файл полигональных либо точечных пространственных объектов с размещением земельных участков в пределах территории землепользования с соответствующими атрибутивными данными об основных физико-химических и агрохимических свойствах почвы;
- в поле «Поле уникального ID» выбрать «OBJECTID»;
- в поле «Выходной класс пространственных объектов» указать путь для сохранения полученных результатов;
- в поле «Число групп» указать требуемое число групп качества земель, на которые предполагается разделить территорию землепользования;
- в поле «Поля анализа» отметить параметры, по которым предполагается выполнить группирование;
- в поле «Пространственные ограничения» выбрать опцию «NO_SPATIAL_CONSTRAINT»;
- в поле «Метод определения расстояния» выбрать опцию «EUCLIDEAN»;
- в поле «Метод инициализации» выбрать «FIND_SEED_LOCATIONS»;

- в поле «Выходной файл отчета» задать путь для сохранения файла отчета, создаваемого по результатам группирования.

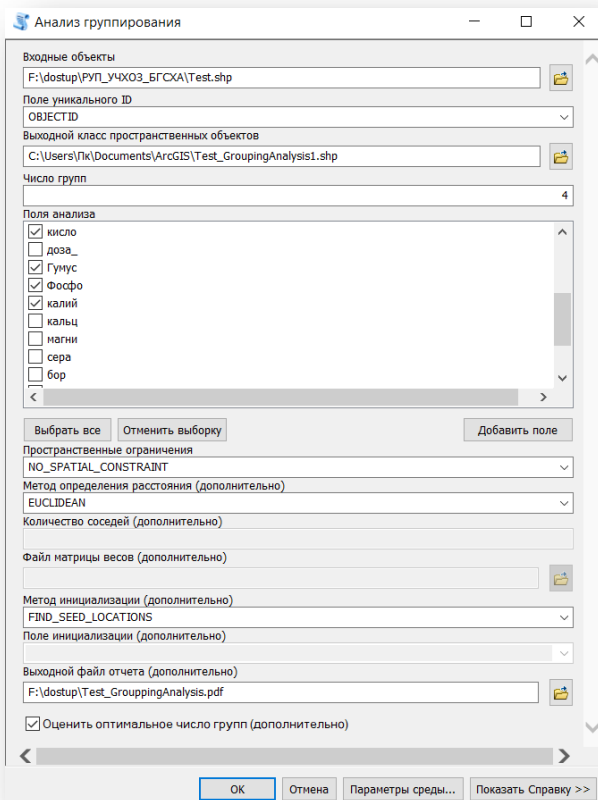


Рис. 4. Диалоговое окно настроек группирования

Если необходимо, чтобы полученные группы были пространственно близки, следует указать пространственное ограничение. Опции CONTIGUITY задаются для полигональных классов пространственных объектов и указывают на то, что объекты могут входить в одну группу, только если у них есть общее ребро (CONTIGUITY_EDGES_ONLY) или общее ребро или вершина (CONTIGUITY_EDGES_CORNERS) с

другим участником группы. Опции DELAUNAY_TRIANGULATION и K_NEAREST_NEIGHBORS указывают на то, что объект включается в группу, только если хотя бы один другой объект является естественным соседом (триангуляция Делоне) или k-ближайшим соседом. Если в исходных геопространственных данных имеются кластеры несмежных полигонов или полигоны без смежных соседей, пространственное ограничение не задается.

Если в поле «Число групп» указано значение более 15 групп либо в поле «Поля анализа» отмечено более 15 параметров, выходной файл отчета создаваться не будет.

Если установить отметку «Оценить оптимальное число групп», PDF-файл отчета будет содержать график значений псевдо-F-статистики (рис. 5). Обведенная на графике точка – это наибольшая F-статистика, указывающая наиболее эффективное число групп для различения указанных объектов и переменных. На приведенном графике наибольшее значение имеет F-статистика, связанная с тремя группами.

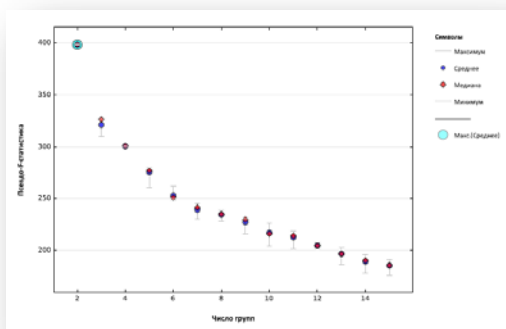


Рис. 5. График псевдо-F-статистики с определенным оптимальным количеством групп

В файл отчета, созданный в результате выполнения группирования данных, включены ящичковые диаграммы, графически отображающие девять сводных значений для каждого поля и группы анализа: минимальное значение данных, глобальный нижний квартиль, глобальная медиана, глобальный верхний квартиль, глобальное максимальное и минимальное значения данных, выбросы в данных (значения, которые

больше или меньше полуторного межквартильного размаха), минимальное, максимальное и среднее значения группы (рис. 6).

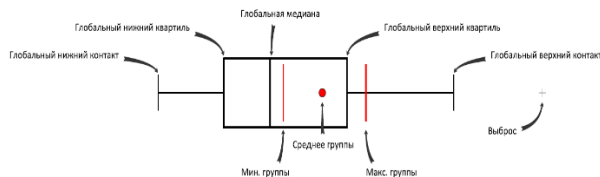


Рис. 6. Интерпретация результатов анализа группирования данных

На первой странице отчета переменные (параметры, по которым предполагается выполнить группирование) в каждой группе сравниваются друг с другом. Сводная статистика для каждой группы печатается с использованием разных цветов (синий, красный, зеленый и желтый). Первый набор сводной статистики печатается черным цветом, поскольку в нем представлены глобальное среднее, среднеквадратическое отклонение, минимум, максимум и значения R^2 для всех данных в каждом поле анализа (рис. 7).

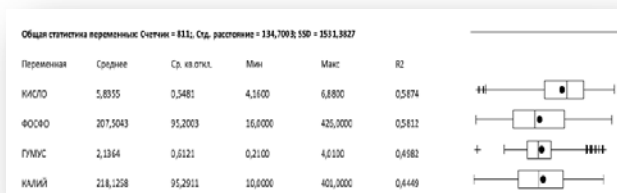


Рис. 7. Фрагмент отчета с результатами общей статистики переменных

Чем больше значение R^2 для определенной переменной, тем лучше переменная отличает выделенные группы (табл. 2).

Таблица 2. Значение R^2 для идентифицированных групп показателей

Идентифицированная группа показателей	Наименование показателя			
	pH _{KCl}	P ₂ O ₅ , мг/кг	K ₂ O, мг/кг	Гумус, %
1	0,5857	0,6634	0,8721	0,5331
2	0,5086	0,8960	0,9514	0,9901
3	0,5257	0,6881	1,0000	0,9901
4	0,6886	0,9282	0,7289	0,6225
Общее значение	0,6166	0,5782	0,4573	0,4460

В приведенной таблице величина R^2 свидетельствует о том, что доминирующим показателем при определении группы 1 выступает содержание подвижного калия ($R^2 = 0,87$), группы 2 – содержание гумуса ($R^2 = 0,99$), группы 3 – содержание подвижного калия ($R^2 = 1,0$), группы 4 – содержание подвижного фосфора ($R^2 = 0,93$). В целом же величина r_{NKCl} наиболее сильно отличает группы в пределах исследуемой территории.

Выполнение анализа группирования может быть использовано и в случае, если имеется большой набор переменных (более 15) для того, чтобы определить наиболее значимые из них и установить критерии, по которым следует группировать территорию землепользования.

После глобальных сводных значений для каждой переменной в группе указываются среднее значение, среднеквадратическое отклонение, минимум, максимум и общие значения. В ящичковой диаграмме справа от сводной статистики каждой идентифицированной группы показано, как значения группы связаны с глобальными значениями того же поля анализа. Например, в группе 2 среднее значение переменной «Кислотность» больше медианного значения, переменной «Фосфор» – находится на уровне верхнего квартиля, для переменной «Гумус» минимальное и максимальное значения находятся за пределами глобального верхнего и нижнего квартиля, а среднее значение переменной «Калий» больше величины верхнего глобального квартиля (рис. 8).



Рис. 8. Фрагмент отчета с результатами статистики отдельных идентифицированных групп переменных

На второй странице отчета сравниваются диапазоны переменных для каждой по одному полю анализа (переменной) за раз. Это дает возможность определить, у какой группы наибольший и наименьший диапазон значений для каждой переменной. Минимальное, среднее и максимальные значения группы наложены в верхней части ящичковой диаграммы, отражающей все значения (рис. 9).

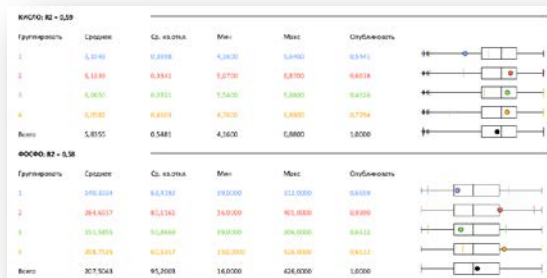


Рис. 9. Фрагмент отчета с результатами статистики отдельных переменных в различных идентифицированных группах

Например, для переменной «Кислотность» в группе 1 фиксируется самое низкое значение, а в группе 2 – самое высокое, тогда как показатели в группах 3 и 4 имеют минимальные различия.

Далее в файле отчета на параллельной ящичковой диаграмме представлена сводная информация по идентифицированным группам и переменным, содержащимся в них (рис. 10).

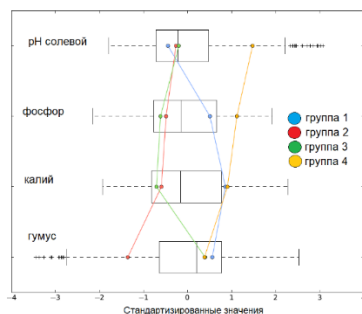


Рис. 10. Сводная статистическая характеристика идентифицированных групп данных

На представленном рисунке группа 1 отражает участки в пределах землепользования, характеризующиеся средним значением содержания подвижного фосфора и гумуса, средней величиной рН почвы и максимальным значением содержания подвижного калия. В группу 2 входят участки, характеризующиеся средним значением содержания подвижных фосфора и калия, средним значением рН солевого и минимальным значением содержания гумуса. Для группы 3 характерны участки со средними значениями всех анализируемых показателей, а для группы 4 – участки со средними значениями содержания фосфора и максимальными значениями величины рН, содержания калия и гумуса.

Результатом работы инструмента геообработки «Анализ группирования» по умолчанию является новый выходной класс пространственных объектов, содержащий поля, используемые в анализе, а также новое целочисленное поле SS_GROUP, обозначающее, к какой группе принадлежит каждый объект. Этот выходной класс пространственных объектов добавляется в таблицу содержания рабочего окна проекта с уникальной цветовой схемой отображения, которая применяется к полю SS_GROUP. На рис. 11 показана пространственная локализация идентифицированных групп показателей.

Выполнение анализа группирования геопространственных данных о физико-химических и агрохимических (либо любых иных) свойствах почвы позволяет:

- установить наличие в пределах землепользования однородных зон с определенным набором параметров (переменных);
- получить общее представление о характере пространственного распределения параметров внутри идентифицированных групп;
- установить точное количество градаций качества земель, которое соответствует количеству идентифицированных групп.

Однако следует учитывать тот факт, что идентифицированные группы лишь свидетельствуют о наличии кластеризации данных, позволяют глубже исследовать их структуру посредством определения статистических параметров, однако являются непригодными для установления четких границ менеджмент-зон.

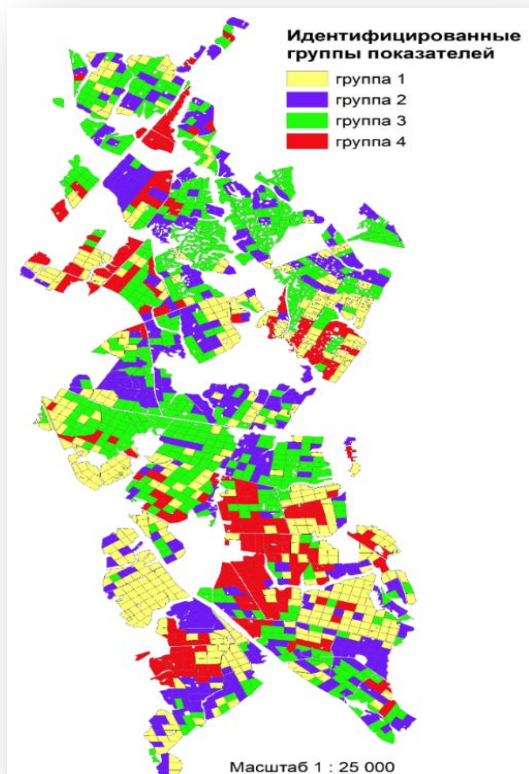


Рис. 11. Фрагмент землепользования с пространственной локализацией идентифицированных групп показателей

3. УСТАНОВЛЕНИЕ НАЛИЧИЯ КЛАСТЕРОВ И ВЫБРОСОВ ДАННЫХ ОБ АГРОХИМИЧЕСКИХ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ ПОЧВЫ

После установления наличия однородных зон с определенным набором параметров (переменных) необходимо выполнить *исследование данных* посредством геопространственного анализа с помощью поднаборов инструментов «Анализ структурных закономерностей» и

«Расчет кластеризации» набора инструментов «Пространственная статистика» ArcGIS версии 10.3 и выше (рис. 12).

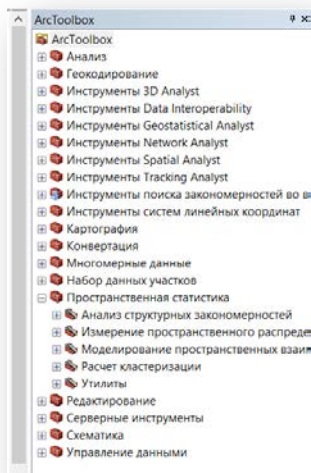


Рис. 12. Набор инструментов «Пространственная статистика»

С этой целью определяются [8]:

1) *минимальное и максимальное расстояния окрестности поиска* ближайшего соседства, дающие возможность подобрать оптимальную величину окрестности поиска при пространственном моделировании (инструмент геообработки «Пошаговая пространственная автокорреляция»);

2) *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 (инструмент геообработки «Пространственная автокорреляция»);

3) *общий индекс Getis-OrdG* для оценки общей структуры и тренда геоданных, а также степени кластеризации высоких и (или) низких значений выборки (инструмент геообработки «Высокая/Низкая кластеризация»);

4) индекс *Getis-OrdG**, позволяющий установить наличие кластеризации данных с высокими и низкими значениями и выполнить анализ кластеров и выбросов для установления отличий атрибутивных значений каждого рабочего участка от его окрестности, а окрестности рабочего участка – от остальной территории (инструмент геообработки «Анализ горячих точек»).

Для определения величины фиксированного расстояния или минимального расстояния окрестности поиска соседства между значениями того или иного почвенного показателя используется инструмент геообработки «Пошаговая пространственная автокорреляция», в диалоговом окне которого задаются величина начального (расстояние, на котором необходимо начать анализ пространственной автокорреляции) и приращенного (расстояние, на которое необходимо увеличивать начальное расстояние при каждой последующей итерации) расстояний. Данные показатели устанавливаются эмпирическим путем посредством подбора.

При выполнении пошаговой пространственной автокорреляции выделяются десять интервалов расстояний, равномерно распределенных по всему экстенду. Для каждого интервала рассчитывается глобальный индекс Морана и интервал, для которого данный индекс будет наибольшим, рекомендуется как оптимальное расстояние для окрестности поиска. В результате создается граф, на котором отмечены минимальное и максимальное расстояния окрестности поиска ближайшего соседства для того либо иного параметра (рис. 13).

Для того чтобы определить, имеет ли место явление кластеризации по отношению к исследуемым геопространственным данным, рассчитывают величину глобального индекса Морана (I). Для нормально распределенных данных его значения находятся в диапазоне от -1 до 1 : 1) величина индекса $+1$ означает детерминированную прямую зависимость – группировку сходных (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.

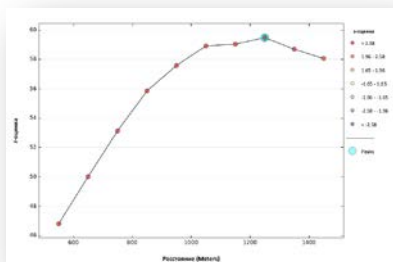


Рис. 13. Графическая интерпретация величины минимального расстояния окрестности поиска соседства между значениями

Индекс Морана (I) является мерой пространственной автокорреляции и характеризует наличие или отсутствие достоверной пространственной автокорреляции геоданных. По результатам его определения генерируется графический отчет, в котором приводится величина индекса (I), рассчитанная для выборки данных по значениям атрибута, а также величина z-оценки, позволяющая судить о характере распределения данных. В диалоговом окне инструмента геообработки «Пространственная автокорреляция» необходимо выполнить следующие настройки (рис. 14):

- в поле «Входной класс пространственных объектов» указать шейп-файл полигональных либо точечных пространственных объектов с размещением земельных участков в пределах территории землепользования с соответствующими атрибутивными данными об основных физико-химических и агрохимических свойствах почвы;

- в поле «Входное поле» выбрать параметр, для которого будет выполняться анализ кластеризации;

- в поле «Определение пространственных взаимоотношений» указать «FIXED_DISTANCE_BAND»;

- значения в полях «Метод определения расстояния» и «Стандартизация» оставить по умолчанию;

- в поле «Диапазон расстояний или пороговое расстояние» необходимо указать максимальное значение величины окрестности поиска, определенное для параметра (рис. 14).

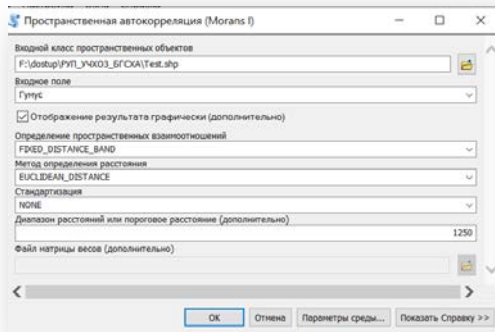


Рис. 14. Диалоговое окно инструмента «Пространственная автокорреляция»

В результате будет создан графический файл отчета (рис. 15).

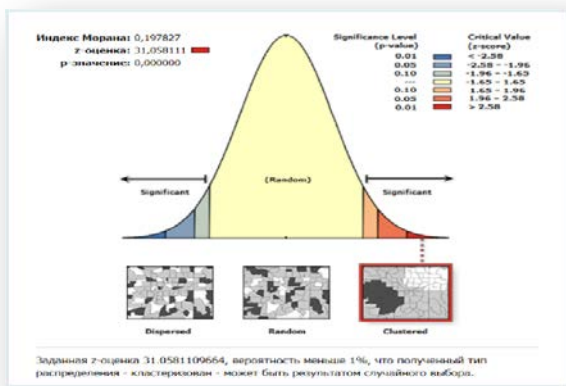


Рис. 15. Графическая интерпретация величины глобального индекса Морана

После установления факта наличия кластеризации геопространственных данных определяют степень кластеризации значений для каждой выборки данных посредством вычисления общего индекса Getis-OrdG. В диалоговом окне инструмента геообработки «Высо-

кая/Низкая кластеризация» необходимо выполнить следующие настройки (рис. 16):

- в поле «Входной класс пространственных объектов» указать шейп-файл полигональных либо точечных пространственных объектов с размещением земельных участков в пределах территории землепользования с соответствующими атрибутивными данными об основных физико-химических и агрохимических свойствах почвы;
- в поле «Входное поле» выбрать параметр, для которого будет выполняться анализ кластеризации;
- в поле «Определение пространственных взаимоотношений» указать «FIXED_DISTANCE_BAND»;
- значения в полях «Метод определения расстояния» и «Стандартизация» оставить по умолчанию;
- в поле «Диапазон расстояний или пороговое расстояние» необходимо указать максимальное значение величины окрестности поиска, определенное для параметра (см. рис. 14).

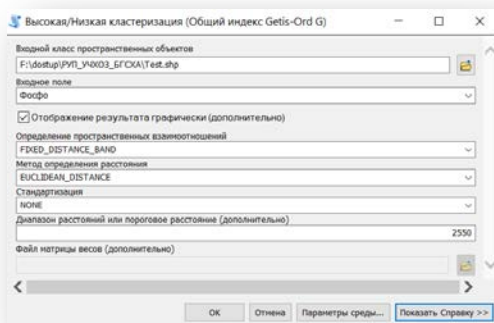


Рис. 16. Диалоговое окно инструмента «Высокая/Низкая кластеризация»

В процессе выполнения оценки степени кластеризации определяют фактическую и ожидаемую величины общего индекса Getis-OrdG, рассчитанные для выборки по значениям атрибута, а также величину z-оценки и p-значения, позволяющие судить о характере распределения геопространственных данных. Если фактическая величина общего индекса Getis-OrdG больше ожидаемой – наблюдается кластеризация данных с высокими значениями атрибута (рис. 17), если меньше –

имеет место кластеризация данных с низкими значениями атрибута (рис. 18).

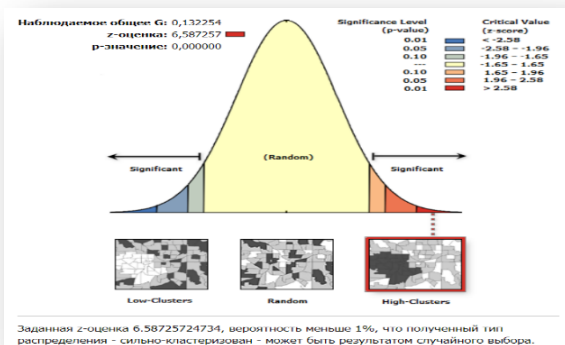


Рис. 17. Графическая интерпретация величины общего индекса Getis-OrdG, превышающей ожидаемое значение

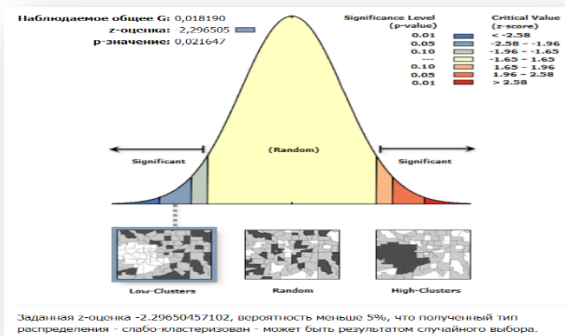


Рис. 18. Графическая интерпретация величины общего индекса Getis-OrdG ниже ожидаемого значения

После установления факта наличия кластеризации высоких либо низких значений посредством анализа горячих точек определяют статистически значимые пространственные кластеры высоких значений (горячих точек) и низких значений (холодных точек). Данный вид ана-

лиза выполняется посредством определения величины индекса Getis-Ord G_i^* – статистического показателя, рассчитываемого для каждого пространственного объекта в наборе данных. Данная информация дает возможность визуально идентифицировать, где именно в пределах территории землепользования будут наблюдаться максимальные и минимальные значения изучаемых показателей почвы.

Следует отметить, что при расчете индекса Getis-Ord G_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. При этом выполняется анализ каждого объекта в контексте соседних объектов (в рассматриваемом примере – элементарных участков).

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 (рис. 19). Для определения границ менеджмент-зон целесообразно учитывать горячие и холодные точки с 95 и 99%-ными уровнями значимости. Территория, обозначенная как «незначимые точки», вероятнее всего содержит определенное количество выбросов высоких и низких значений.

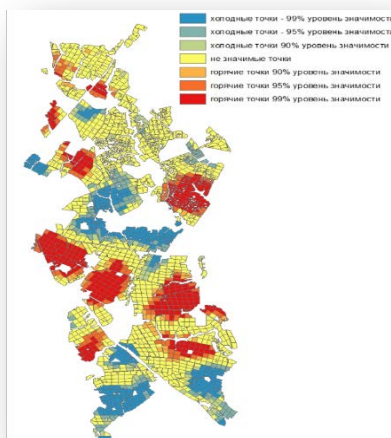


Рис. 19. Результаты анализа горячих точек пространственных данных

Анализ кластеров и выбросов, который является следующим этапом выполнения анализа, идентифицирует концентрации высоких значений, концентрации низких значений и пространственные выбросы геоданных (рис. 20).



Рис. 20. Схема интерпретации результатов анализа кластеров и выбросов данных

Он помогает установить, где проходят наиболее четкие границы между контурами с высоким и низким содержанием того либо иного элемента в почве и есть ли в пределах исследуемой территории аномально высокие или аномально низкие значения показателей, которые можно отнести к пространственным выбросам. Если значения попадают в диапазон HH – имеет место достоверная концентрация данных с высокими значениями, если в диапазон LL – с низкими значениями, если же данные относятся к диапазонам HL и LH – присутствуют выбросы высоких и низких значений соответственно.

Пространственные выбросы 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 обусловлено и объективными факторами, например применением различных доз минеральных удобрений в пределах отдельных участков. При обнаружении выбросов высоких и низких значений необходимо про-

вести дополнительное их исследование и исключить неподтвержденные выбросы из набора данных при последующем выполнении моделирования пространственного распределения того либо иного показателя посредством методов интерполяции. На рис. 21 представлены результаты выполнения анализа кластеров и выбросов.

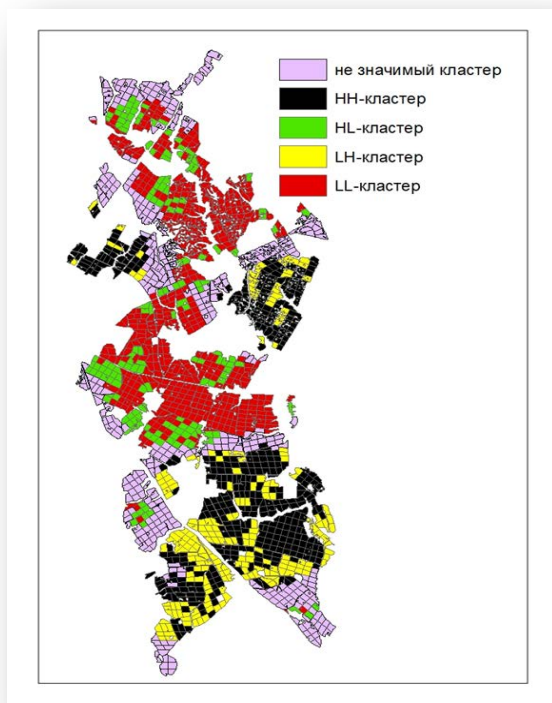


Рис. 21. Результаты анализа кластеров и выбросов пространственных данных

Выполнение анализа кластеризации данных предусматривает прохождение пяти этапов, а его схема имеет следующий вид (рис. 22).



Рис. 22. Схема выполнения анализа кластеризации данных

Кластерный анализ данных, в отличие от группирования, позволяет установить наиболее четкие границы между участками с высокими и низкими значениями того либо иного показателя, что может быть использовано при определении менеджмент-зон для целей точного земледелия, в пределах которых будут осуществляться те или иные землеустроительные мероприятия.

Данный анализ может быть окончательным этапом исследования геопространственных данных, если необходимо выполнить зонирование территории по одному признаку, например величине рН почвенного раствора для расчета норм извести и их дифференцированного внесения.

Однако с его помощью невозможно идентифицировать и отнести к какой-либо группе те участки, для которых наличие кластеров определено как незначимое. Для «заполнения» таких участков в пределах землепользования необходимо выполнить моделирование пространственного распределения геоданных методами интерполяции.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ПОЧВЫ В ПРЕДЕЛАХ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

4.1. Создание растровых изображений пространственного распределения свойств почвы

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. Для выполнения прогноза и визуализации пространственного распределения агрохимических и физико-химических показателей почвы используются как *детерминированные*, так и *геостатистические методы* интерполяции (рис. 23).

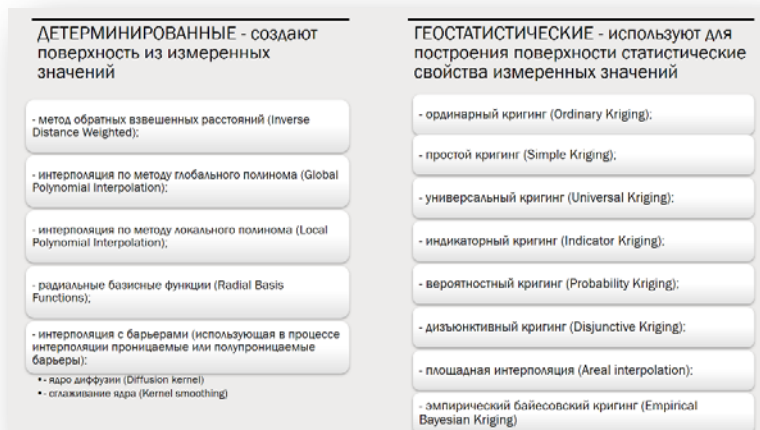


Рис. 23. Методы интерполяции, используемые для моделирования пространственного распределения почвенных параметров

Выполнение моделирования пространственного распределения данных об агрохимических и физико-химических свойствах почв пахотных земель предусматривает обязательное проведение их исследования на предмет пригодности для целей моделирования. Анализ производится по следующей схеме:

- 1) построение частотных гистограмм и исследование распределения и суммарной статистики набора данных;
- 2) построение графика КК и проверка нормальности распределения набора данных;
- 3) визуальное исследование пространственной вариабельности и стационарности набора данных посредством построения карт Вороного;
- 4) визуализация и исследование пространственных трендов в наборе данных;
- 5) оценка пространственной зависимости, существующей в наборе данных, посредством создания облака вариограммы.

Разведочный анализ данных проводится с использованием функциональных возможностей модуля «Geostatistical Analyst», состоящего из трех основных компонентов:

- набора графиков для исследовательского анализа пространственных данных (ESDA);
- мастера операций геостатистики Geostatistical Wizard;
- набора инструментов ArcGIS Geostatistical Analyst Extension с инструментами геообработки, разработанного для расширения возможностей мастера Geostatistical Wizard и позволяющего анализировать создаваемые поверхности (расположен в наборе инструментов ArcToolbox) (рис. 24).

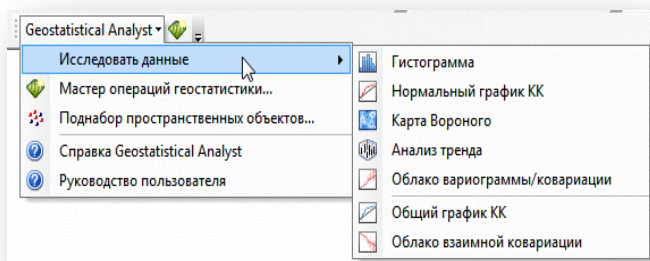


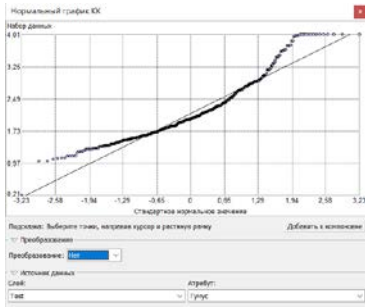
Рис. 24. Рабочая панель модуля «Geostatistical Analyst»

Методы интерполяции, применяемые для создания поверхности, дают наилучшие результаты, если данные распределены по нормальному закону. В случае асимметричного распределения данных (скошенность, бимодальность, наличие нескольких пиков) необходимо провести их нормирование (логарифмическое преобразование). Построение частотных гистограмм позволяет проанализировать одномерное распределение для каждого атрибута в наборе данных и установить необходимость выполнения их преобразования. На рис. 25 показана частотная гистограмма данных до и после выполнения их логарифмического преобразования, где четко прослеживается, что выполнение логарифмического преобразования данных приближает их распределение к нормальному, нивелируя скошенность вправо.

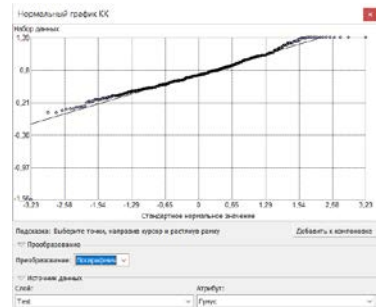


Рис. 25. Гистограмма распределения данных о содержании гумуса в почве без преобразования данных (*a*) и после их логарифмического преобразования (*б*)

Используя опцию «Нормальный график КК» модуля «Geostatistical Analyst», проверяют нормальность распределения набора данных. Точки нормального графика КК дают представление об одномерной нормальности набора данных. Если данные распределены нормально, точки выстроятся на базовой линии, проходящей под углом 45° . Если данные не распределены нормально, точки будут отклоняться от базовой линии. Значения квантилей стандартного нормального распределения нанесены на ось X нормального графика КК, а соответствующие значения квантилей набора данных – на ось Y (рис. 26).



a



б

Рис. 26. Нормальный график распределения данных о содержании гумуса в почве без преобразования данных (*a*) и после их логарифмического преобразования (*б*)

Карты Вороного позволяют идентифицировать глобальные и локальные выпадающие значения и оценить стационарность геопространственных данных (рис. 27).

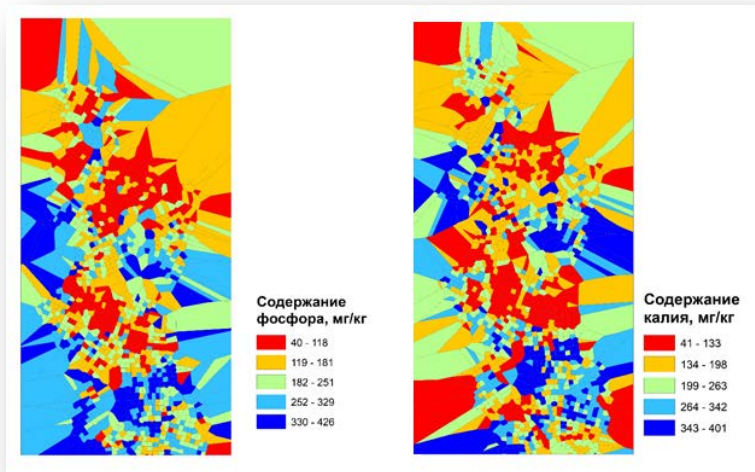


Рис. 27. Карты Вороного, иллюстрирующие неоднородность содержания подвижных фосфора и калия в почве

Под глобальными выпадающими значениями подразумевают точки с очень высоким или очень низким значением по сравнению со всеми значениями в наборе данных, а под локальными выпадающими значениями – измеренные опорные точки, которые имеют значение в пределах нормы для всего набора данных, но если посмотреть на окрестные точки, то это значение будет чрезвычайно высоким или низким по сравнению с ними. Выпадающие значения важно идентифицировать, поскольку они могут быть как реальными аномалиями в явлении, так и причиной неправильного измерения значения. В случае, если выпадающие значения вызваны ошибками во время ввода очевидно неправильных данных, они должны быть исправлены или удалены перед созданием интерполяционной поверхности.

Отдельные методы интерполяции, в частности кригинг, требуют удаления тренда из набора геопространственных данных перед выполнением пространственного моделирования. Инструмент «Анализ тренда» модуля «Geostatistical Analyst» позволяет отображать данные в трехмерной перспективе. Местоположения опорных точек наносятся на плоскость x, y . Уникальной особенностью данного инструмента является то, что значения проецируются на перпендикулярные плоскости x, z и y, z в виде диаграмм рассеивания. Затем на проецируемых плоскостях выполняется подгон полиномов с помощью диаграмм рассеивания. Линия наилучшего соответствия (полином), проведенная через проецируемые точки, показывает тренды в определенных направлениях (рис. 28).

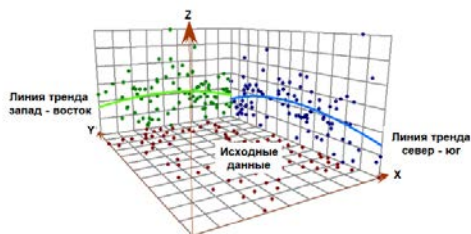


Рис. 28. Тренд пространственного распределения содержания гумуса в почве

В данном примере наблюдается тренд в направлении север – юг. Поскольку тренд имеет U-образную форму, при проведении интерполяции целесообразно использовать полином первого порядка в качестве глобальной модели тренда.

В Первом законе Тоблера говорится о том, что все со всем связано, а объекты, находящиеся в непосредственной близости, связаны сильнее, чем удаленные [22]. Именно он лежит в основе моделирования отношений между геопространственными объектами. Анализ исходных данных помогает лучше понять пространственную автокорреляцию между измеренными значениями. Это позволяет принимать более эффективные решения при выборе моделей для пространственной интерполяции. С этой целью создаются и анализируются вариограммы, показывающие значения для всех пар местоположений в наборе данных и отображающие их графически как функцию разделяющего расстояния между двумя точками. Вариограмма количественно характеризует предположение о том, что объекты, расположенные близко друг к другу, больше похожи между собой, чем удаленные друг от друга на некоторое расстояние, и измеряет степень статистической корреляции как функцию расстояния. Путем измерения расстояния между двумя местоположениями и отображения на графике квадрата разницы между значениями в этих местоположениях создается облако вариограммы. По оси x откладывается расстояние между местоположениями, а по оси y – квадрат разницы соответствующих значений. Каждая точка на вариограмме представляет пару местоположений, а не отдельные местоположения.

Инструменты геостатистического анализа позволяют анализировать автокорреляцию в наборе данных. Однако если количество данных в выборке превышает 500, то для корректной работы необходимо создать поднабор данных из случайной выборки точек, по которому будет построено облако вариограммы (рис. 29).

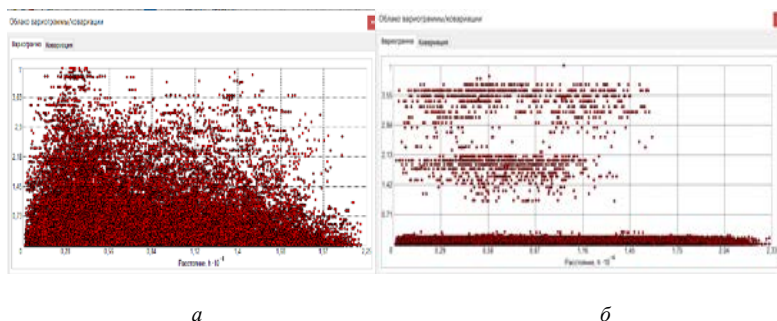


Рис. 29. Вариограммы пространственной структуры данных, пригодных для применения геостатистических (а) и детерминированных (б) методов интерполяции

Построение вариограмм помогает точно определить, какие методы целесообразно использовать для пространственного моделирования: детерминированные или геостатистические. Если облако вариограммы имеет вид, как на рис. 29, б, то для моделирования пространственного распределения следует использовать только детерминированные методы интерполяции, поскольку в данном случае отсутствует пространственная автокорреляция данных. В случае, если облако вариограммы имеет вид, как на рис. 29, а (как бы выдувается из точки пересечения осей графика, расширяясь с удалением от нее), представляется возможным использовать как геостатистические, так и детерминированные методы интерполяции, однако следует отдавать предпочтение первым, как наиболее точным. Детерминированные методы могут быть использованы для выполнения пространственной интерполяции в случае, когда не предъявляются высокие требования к точности полученных интерполяционных поверхностей.

В целом исследовательский анализ геопространственных данных позволяет проверить их на соответствие требованиям того или иного метода интерполяции и лучше понять феномен исследования, в результате чего можно принять более взвешенное и обоснованное решение при выборе адекватной модели интерполяции.

Для создания интерполяционных поверхностей пространственного распределения агрохимических и физико-химических свойств почвы, используемых в последующем для определения границ менеджмент-зон, среди детерминированных методов интерполяции целесообразно использовать метод обратных взвешенных расстояний (IDW), метод радиальных базисных функций (RBF) и метод локальных полиномов (LPI), а среди геостатистических – ординарный (OK), простой (SK), универсальный (UK) и эмпирический байесовский кригинг (ЕВК). Выбор для исследований именно этих методов интерполяции обусловлен такими требованиями, как объем выборки данных и ее геостатистические характеристики, простота метода, его точность и скорость обработки данных.

IDW является одним из наиболее часто применяемых детерминированных методов интерполяции, если не предъявляются особые требования к точности интерполированной поверхности, а необходимо получить общее представление о характере распространения того либо иного показателя. Его целесообразно использовать тогда, когда набор данных достаточно плотный, чтобы фиксировать степень локального изменения поверхности, необходимую для анализа. Это быстрый детерминированный интерполятор, который является точным (минимальные и максимальные значения на интерполированной поверхно-

сти могут встречаться только в опорных точках) и не требует принятия небольшого количества решений относительно параметров модели. Он хорошо подходит для первичной оценки интерполированной поверхности, однако не оценивает ошибку прогнозирования и может породить «бычьи глаза» вблизи точек данных. При использовании этого метода на данные не накладываются никакие ограничения.

Метод обратных взвешенных расстояний однозначно предполагает, что объекты, находящиеся поблизости, более подобны, чем объекты, удаленные друг от друга. Чтобы проинтерполировать значение показателя в неизмеренном положении, IDW использует измеренные значения вокруг интерполируемого местоположения, предполагая, что наиболее близкие к интерполируемому местоположению измеренные значения оказывают большее влияние на прогнозируемое значение, чем удаленные от него на значительные расстояния. Это придает больший вес точкам, расположенным ближе всего к интерполируемому местоположению. Поскольку вес точки уменьшается как функция от расстояния, метод носит название обратных взвешенных расстояний. Веса, назначенные точкам с данными, представлены на рис. 30.

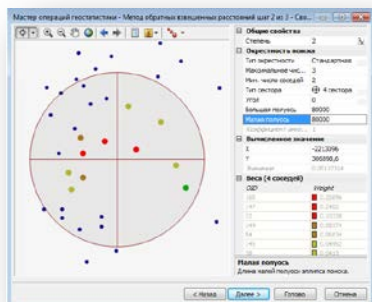


Рис. 30. Иллюстрация окрестности поиска с весами соседних точек

Веса пропорциональны обратным расстояниям, возведенным в степень p , от которой зависит степень уменьшения веса точки при увеличении расстояния. По умолчанию в мастере настроек установлено значение p , равное двум. Если возникла необходимость, можно изменить значение степени, сравнить полученные поверхности и выбрать значение, создаваемое поверхностью с наименьшей ошибкой.

Метод локальных полиномов (LPI) – это умеренно быстрый интерполятор, который является сглаженным (неточным). Он обеспечивает построение поверхности прогнозируемых значений, поверхности стандартной ошибки прогнозирования и числа обусловленности, которые сравнимы с ординарным кригингом с погрешностями измерения. Метод локальных полиномов не позволяет исследовать автокорреляцию данных, что делает его менее гибким и более автоматизированным, чем кригинг. На данные не накладываются никакие ограничения, однако более целесообразно использовать этот метод при наличии данных, полученных при отборе образцов по равномерной сетке опробования. Применение метода LPI целесообразно и в случае, когда присутствует территория с изменчивой формой рельефа, а величина интерполируемого показателя прямо пропорционально связана с характером рельефа, изменяясь в соответствии с его изменением.

В случае равномерно распределенных данных для полиномов нулевого порядка оптимальным будет выбор функции Епанечникова, для полиномов второго порядка – функции «Биквадратная». В случае неравномерного распределения данных выбор лучшего ядра функции целесообразно осуществлять, основываясь на диагностике проверки и перекрестной проверки и значениях пространственного числа обусловленности.

Радиальные базисные функции (RBF) – это умеренно быстрые интерполяторы, которые являются точными. Существует пять различных базисных функций: плоский сплайн, сплайн с натяжением, полностью регуляризованный сплайн, функция мультиквадриков, функция обратных мультиквадриков. Они гораздо более гибкие, чем IDW, поскольку позволяют прогнозировать значения выше и ниже максимального и минимального соответственно, но требуют принятия большего количества решений относительно параметров и не позволяют оценивать прогнозируемые ошибки. Интерполяция по методу RBF приближается к построению поверхности по измеренным значениям, минимизируя общую кривизну поверхности, и неэффективна, когда происходит резкое изменение значений показателя на коротких расстояниях. Радиальные базисные функции используют для создания сглаженных поверхностей из значительного количества исходных данных, которые не подвержены значительным изменениям в пределах коротких расстояний. Радиальные базисные функции не накладывают никаких ограничений на данные.

Наиболее оптимальным при интерполировании является выбор радиальной базисной функции мультиквадриков, однако возможно ис-

пользовать и другие функции, определив наиболее оптимальную посредством выполнения перекрестной проверки. Каждая радиальная базисная функция содержит параметр, управляющий сглаженностью поверхности – параметр ядра (рис. 31).

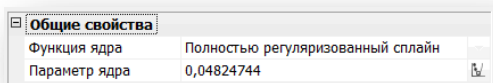


Рис. 31. Иллюстрация параметра, управляющего сглаженностью интерполяционной поверхности

Для всех радиальных базисных функций, кроме обратных мультиквадриков, чем выше значение параметра, тем более сглаженной будет поверхность; обратное верно для метода мультиквадриков.

При применении геостатистических методов интерполяции в качестве основного инструмента для изучения структуры пространственного распределения данных используются семивариограммы. Основываясь на региональной теории вариаций и внутренних гипотезах [18], семивариограмма выражается следующим образом:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2, \quad (1)$$

где $\gamma(h)$ – полувариантность;

h – расстояние запаздывания;

$N(h)$ – количество пар мест, разделенных расстоянием лага h ;

Z – параметр свойства почвы;

$Z(x_i)$ и $Z(x_i + h)$ – значения Z в положениях x_i и $x_i + h$.

Эмпирические семивариограммы, полученные из экспериментальных данных, сравниваются с теоретическими вариограммами для получения таких геостатистических параметров, как дисперсия самородка (C_0), структурированная дисперсия (C_1), дисперсия порогов ($C_0 + C_1$) и параметр расстояния (λ). Для характеристики пространственной зависимости значений показателей рассчитывалось отношение дисперсии самородка к дисперсии порога $C_0 / (C_0 + C_1)$. Величина данного отношения менее 25 % указывает на сильную пространственную зависимость, более 75 % – на слабую пространственную зависимость; при $25 \% > C_0 / (C_0 + C_1) < 75 \%$ пространственная зависимость является умеренной [17].

Ординарный кригинг (ОК) целесообразно использовать для данных, которые имеют ярко выраженный тренд. Универсальный кригинг (УК) используется тогда, когда предполагается, что в данных имеется какая-либо доминирующая тенденция (тренд), которую можно смоделировать с помощью детерминированной полиномиальной функции.

Эмпирический байесовский кригинг (ЕВК) отличается от других методов кригинга использованием внутренней случайной функции в качестве модели кригинга. Это метод геостатистической интерполяции, автоматизирующий наиболее трудоемкие аспекты построения корректной модели кригинга. Для каждого местоположения интерполяция рассчитывается с использованием новой вариограммы распределения, которая сгенерирована посредством базирующейся на подобию выборки из индивидуальных вариограмм спектров вариограмм в окрестности точки [18]. Среди бесспорных преимуществ эмпирического байесовского кригинга следует отметить возможность выполнения точной интерполяции умеренно нестационарных данных, чего не позволяют сделать другие виды кригинга. Его недостатком является то, что обработка данных происходит медленнее, чем в других методах кригинга, особенно при выводе результатов в растр.

Если пользователь не знаком с геостатистикой, интерполированные поверхности можно создавать с использованием ординарного кригинга и значений параметров по умолчанию, установленных в мастере операций. Также следует использовать этот метод для создания первоначальной поверхности, чтобы иметь возможность проследить влияние различных параметров на выходную поверхность.

При наличии выборки данных менее 100 значений применение геостатистических методов интерполяции считается нецелесообразным; в этом случае для создания интерполированных поверхностей следует использовать только детерминированные методы.

Для оценки и сопоставления характеристик различных методов интерполяции используется **метод кросс-валидации**. Точность детерминированных методов интерполяции определяется по величине только средней ошибки (ME) и среднеквадратической ошибки (RMSE), геостатистических – средней ошибки (ME), среднеквадратической ошибки (RMSE), средней нормированной ошибки (MSE), средней стандартизированной ошибки (ASE) и среднеквадратической нормированной ошибки (RMSS).

При выборе лучшей модели следует принимать во внимание такие моменты:

- интерполированные значения должны быть несмещенными (центрированными относительно истинных значений); если значения, полученные посредством интерполяции несмещенные, то значение средней ошибки интерполяции (ME) должно стремиться к нулю;

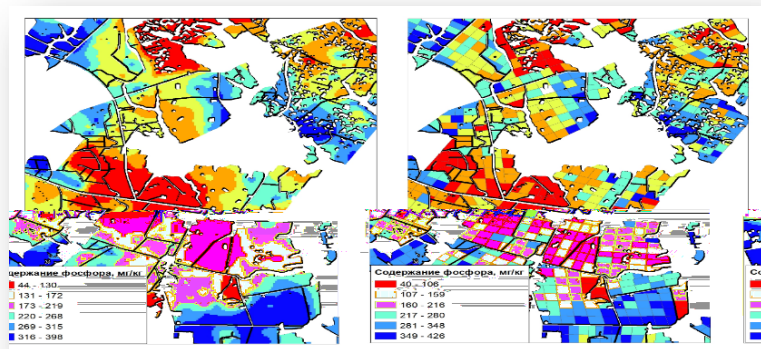
- средняя нормированная ошибка интерполяции (MSE) также должна быть как можно ближе к нулю;

- среднеквадратическая нормированная ошибка интерполяции близка к единице, что указывает на точность стандартных погрешностей;

- среднеквадратическая ошибка (RMSE) и средняя стандартизированная ошибка (ASE) должны быть близкими по значениям; если средняя стандартизированная ошибка больше, чем среднеквадратическая ошибка интерполяции, интерполяция выполнена с переоценкой значений данных, если меньше – с недооценкой;

- значение среднеквадратической нормированной ошибки (RMSS) должно быть как можно ближе к единице; если оно больше единицы – интерполированные значения занижены, если меньше – завышены.

На рис. 32 приведены фрагменты картограмм, отображающих содержание в почве подвижного фосфора, созданных с применением метода интерполяции (а) и традиционным способом, принятым в системе агрохимслужбы (б).



а

б

Рис. 32. Фрагменты картограмм, отображающих содержание в почве подвижного фосфора

4.2. Определение границ менеджмент-зон для целей внутрихозяйственного землеустройства при внедрении точного земледелия

Растровые изображения, созданные с помощью метода интерполяции, дают возможность четко проследить внутривополевую неоднородность почвы в пределах каждого отдельно взятого поля, что является базисной основой для планирования всех мероприятий в рамках внедрения системы точного земледелия.

Функциональные возможности поднабора инструментов «Зональные» набора инструментов «Spatial Analyst» дают возможность определить площадь каждого из идентифицированных в пределах отдельного поля контуров с тем либо иным значением показателя. Это позволяет планировать дифференцированное внесение минеральных удобрений и средств химической мелиорации, обеспечивая экономию ресурсов и оптимизацию использования пахотных земель. Однако специфика землепользования и существование преимущественно государственного права собственности на земли сельскохозяйственного назначения определяют и специфику внедрения системы точного земледелия либо ее отдельных элементов в сельскохозяйственное производство.

В этой связи наиболее *оптимальным решением* является определение менеджмент-зон, более или менее однородных не по одному, а по целому комплексу показателей. Причем такие зоны могут устанавливаться в зависимости от конкретных потребностей сельхозпроизводителей:

- поиск и точное определение границ наиболее (наименее) плодородных участков в пределах землепользования;
- поиск и точное определение в пределах землепользования границ участков, наиболее пригодных для выращивания высокопродуктивных культур (рапс, соя);
- поиск и точное определение границ участков, пригодных для внедрения органического земледелия;
- поиск и точное определение границ участков, в пределах которых будет получена максимальная окупаемость урожаем внесенных минеральных макро- и (или) микроудобрений.

Для определения зон с наилучшим и наихудшим комплексом показателей качества почвы (либо других показателей, например, рельефа

территории, агрофизических свойств, карт урожайности, карт вегетационных индексов) целесообразно использовать функциональные возможности многофакторного геопространственного анализа.

Исходя из современных реалий наиболее оптимальным представляется разграничение менеджмент-зон по четырем показателям: величине содержания в почве гумуса, подвижных фосфора и калия, а также pH почвенного раствора. Выбор именно этих показателей обусловлен тем, что это наиболее широко используемые и часто определяемые агрохимические и физико-химические показатели, сведения о которых всегда имеются в наличии как в областных агрохимслужбах, так и непосредственно в агрономических службах отдельных сельскохозяйственных организаций. Кроме того, именно значения этих показателей учитываются как при расчете необходимых для внесения норм минеральных удобрений, так и при расчете доз извести при выполнении химической мелиорации почв.

Собственно, процесс идентификации менеджмент-зон довольно прост и не требует какой-либо специальной квалификации от пользователя любого ГИС-софта, аналогичного проприетарному ArcGIS либо оупенсорсному QGIS. Однако для их определения необходимо наличие растровых изображений пространственного распределения тех показателей, по комплексу которых предполагается осуществлять разграничение менеджмент-зон. Именно получение достоверных растровых изображений является наиболее трудоемким и наукоемким процессом, поскольку требует детального изучения показателей, выбора оптимального метода интерполяции и его обоснования. Тем не менее, используя предлагаемые в предыдущих разделах рекомендации, процесс получения растров можно значительно упростить и ускорить, не теряя при этом точности и достоверности.

На рис. 33 показан пример исходных данных, необходимых для выполнения идентификации менеджмент-зон (растры получены для поля площадью 286,5 га).

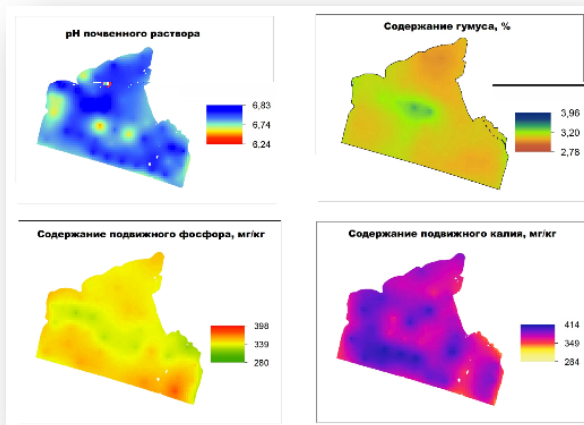


Рис. 33. Пример исходных данных для выполнения идентификации менеджмент-зон

Если для исходных растров выбран способ отображения «Растяжка», следует изменить его на способ отображения «Классификация», выбрав необходимое количество классов градаций того либо иного показателя в пределах растра (рис. 34).

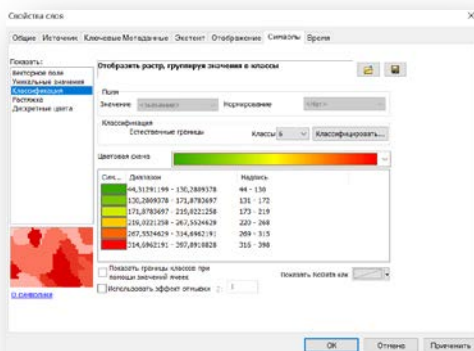


Рис. 34. Диалоговое окно настроек свойств слоя

Количество классов зависит от цели, с которой выделяются ме-неджмент-зоны, а также степени дисперсности исходных геопростран-ственных данных: чем больше их стандартное отклонение от среднего значения, тем больше классов следует выделять. Однако количество классов не может быть меньше, чем количество градаций качества почвы. Если конкретные требования к градации показателей не предъ-являются, целесообразно выполнить градацию, принятую в системе агрохимслужбы (рис. 35–38).

ГРУППА ПО СОДЕРЖАНИЮ ГУМУСА	ИНТЕРВАЛ СОДЕРЖАНИЯ ГУМУСА, %	ЗАПАС ГУМУСА В ПАХОТНОМ ГОРИЗОНТЕ, т/га
I  Очень низкое	менее 1,0	менее 30
II  Низкое	1,01 - 1,5	31 - 50
III  Недостаточное	1,51 - 2,0	51 - 70
IV  Среднее	2,01 - 2,5	71 - 90
V  Повышенное	2,51 - 3,0	91 - 110
VI  Высокое	более 3,0	более 110

Рис. 35. Градации содержания в почве гумуса

ГРУППА ПО СОДЕРЖАНИЮ ФОСФОРА	ИНТЕРВАЛ СОДЕРЖАНИЯ ФОСФОРА, мг/кг	ЗАПАС ФОСФОРА В ПАХОТНОМ ГОРИЗОНТЕ, т/га
I  Очень низкое	менее 60	менее 200
II  Низкое	61 - 100	201 - 300
III  Среднее	101 - 150	301 - 500
IV  Повышенное	151 - 250	501 - 800
V  Высокое	251 - 400	801 - 1200
VI  Очень высокое (избыточное)	более 400	более 1200

Рис. 36. Градации содержания в почве подвижного фосфора


ГРУППА ПО СОДЕРЖАНИЮ КАЛИЯ	ИНТЕРВАЛ СОДЕРЖАНИЯ КАЛИЯ, мг/кг	ЗАПАС КАЛИЯ В ПАХОТНОМ ГОРИЗОНТЕ, т/га
I  Очень низкое	менее 80	менее 300
II  Низкое	81 - 140	301 - 400
III  Среднее	141 - 200	401 - 700
IV  Повышенное	201 - 300	701 - 1000
V  Высокое	301 - 400	1001 - 1300
VI  Очень высокое (избыточное)	более 400	более 1300

Рис. 37. Градации содержания в почве подвижного калия

ГРУППА КИСЛОТНОСТИ	СТЕПЕНЬ КИСЛОТНОСТИ	ИНТЕРВАЛ ЗНАЧЕНИЙ pH _{ксл}
I	Сильнокислые	менее 4,5
II	Среднекислые	4,51 - 5,0
III	Кислые	5,01 - 5,5
IV	Слабокислые	5,51 - 6,0
V	Близкие к нейтральным	6,01 - 6,5
VI	Нейтральные	6,51 - 7,0

Рис. 38. Градации pH почвенного раствора

Полученные в результате растровые изображения необходимо переклассифицировать, для чего используются функциональные возможности набора инструментов «Переклассификация» (рис. 39).

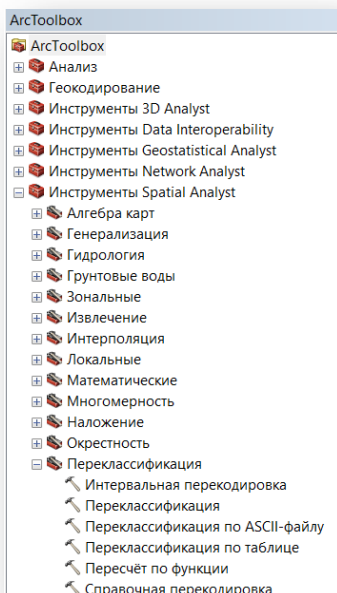


Рис. 39. Набор инструментов «Переклассификация»

В диалоговом окне инструмента необходимо выполнить следующие настройки (рис. 40):

- в поле «Входной растр» указать имя растрового слоя, который будет переклассифицироваться;
- в поле «Поле переклассификации» указать поле атрибутивной таблицы, в котором хранятся переклассифицируемые значения;
- в поле «Новые значения» указать необходимое количество классов для каждого интервала показателей (по умолчанию количество классов задается равным количеству классов входного классифицированного растра);
- в поле «Выходной растр» указать путь для сохранения растра, полученного при переклассификации.

Важным условием является выбор одинакового количества классов для каждого из растров, участвующего в определении границ менеджмент-зон, поскольку в случае несовпадения классов растров идентификация зон выполнена не будет.

На рис. 41 представлен растр до и после выполнения переклассификации.

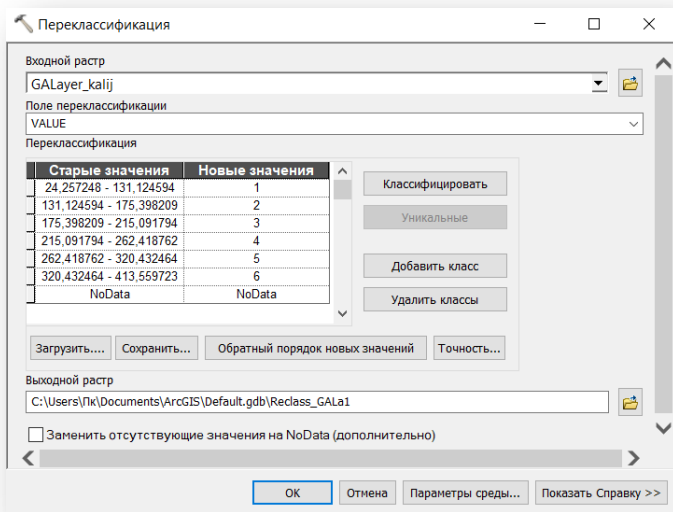


Рис. 40. Диалоговое окно настроек переклассификации растра

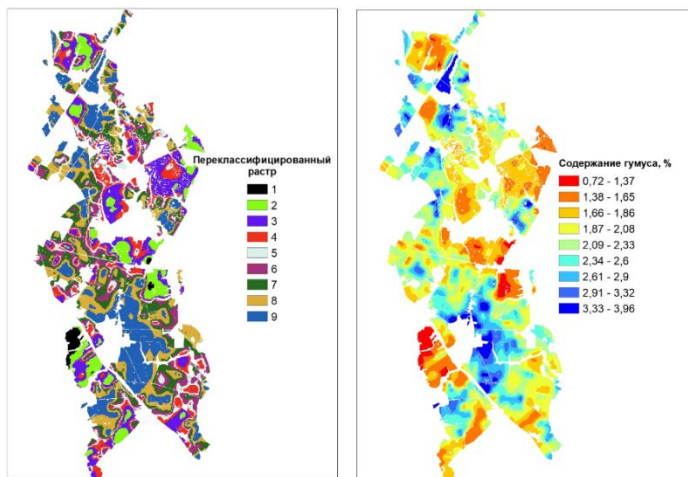


Рис. 41. Соответствие выделенных при переклассификации классов градиациям содержания гумуса

Для идентификации менеджмент-зон используют функциональные возможности инструмента «Калькулятор растра» утилиты «Алгебра карт» (рис. 42).

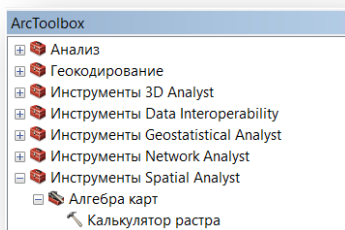


Рис. 42. Набор инструментов «Алгебра карт»

В диалоговом окне инструмента необходимо выполнить следующие настройки (рис. 43):

- в поле «Выходной растр» указать путь для сохранения полученного результирующего растра;

- в поле для выражения написать требуемое выражение (в представленном примере это среднее арифметическое из четырех переклассифицированных растров).

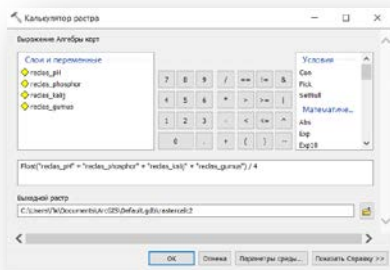


Рис. 43. Диалоговое окно настроек инструмента «Калькулятор растра»

Полученный результирующий растр следует снова переклассифицировать, задав в поле «Новые значения» количество классов, соответствующее количеству градаций качества земель (в предлагаемом примере таких градаций 4) (рис. 44).

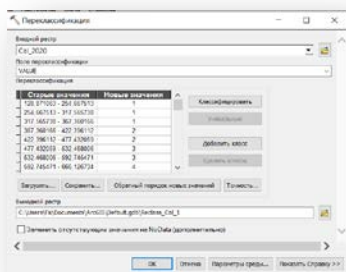


Рис. 44. Диалоговое окно настроек повторной переклассификации растра

Полученный после переклассификации растр преобразовывается в векторный слой с помощью функциональных возможностей инструмента «Растр в полигоны» поднабора инструментов «Из растра» набора инструментов «Конвертация» (рис. 45).

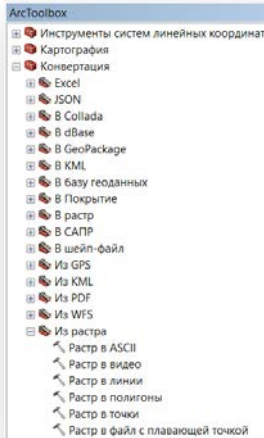


Рис. 45. Набор инструментов «Конвертация»

В диалоговом окне инструмента необходимо выполнить следующие настройки (рис. 46):

- в поле «Входной растр» указать имя растрового слоя, полученного после переклассификации результирующего растра;
- в поле «Выходной растр» указать путь для сохранения полученного результирующего растра;
- активировать опцию «Упростить полигоны».

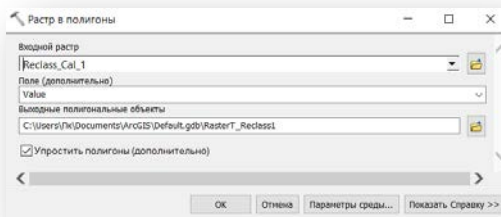


Рис. 46. Диалоговое окно настроек конвертации растра в векторный полигональный слой

В результате выполнения преобразования будет создан новый векторный слой полигональных пространственных объектов, в атрибутивной таблице которого содержатся сведения о длине периметра и площади образованных после конвертации из растра площадных объектов, а также указана принадлежность каждого из объектов к той либо иной группе качества земель (поле gridcode) (рис. 47).

OBJECTID *	Shape *	Id	gridcode	Shape Length	Shape Area
1	Полигон	1	2	146	1332,25
2	Полигон	2	2	146	1332,25
3	Полигон	3	2	146	1332,25
4	Полигон	4	2	146	1332,25
5	Полигон	5	2	146	1332,25
6	Полигон	6	2	146	1332,25
7	Полигон	7	2	146	1332,25
8	Полигон	8	2	146	1332,25
9	Полигон	9	3	634,590142	17897,619576
10	Полигон	10	2	146	1332,25
11	Полигон	11	2	136,86872	853,157246
12	Полигон	12	2	146	1332,25
13	Полигон	13	2	137,709248	912,135318
14	Полигон	14	1	136,868688	853,156829
15	Полигон	15	2	146	1332,25
16	Полигон	16	2	146	1332,25
17	Полигон	17	1	2009,331841	100025,457198
18	Полигон	18	1	2076,217858	107214,943778
19	Полигон	19	1	137,709277	912,135705
20	Полигон	20	3	1127,292538	43527,798292
21	Полигон	21	1	137,709277	912,135705
22	Полигон	22	1	272,873588	3579,616678
23	Полигон	23	3	137,709219	912,13493
24	Полигон	24	2	137,709219	912,13493
25	Полигон	25	2	137,709219	912,13493
26	Полигон	26	1	272,873559	3579,615809
27	Полигон	27	1	137,709188	912,134495
28	Полигон	28	3	6756,648851	1286203,083587
29	Полигон	29	3	925,21582	45317,763695
30	Полигон	30	2	739,863035	21420,569916
31	Полигон	31	2	623,971285	16254,288449
32	Полигон	32	3	272,873329	3579,609597
33	Полигон	33	2	137,710362	912,150367
34	Полигон	34	2	255,135894	2919,387038
35	Полигон	35	2	279,347533	4154,631464
36	Полигон	36	2	137,709188	912,134495
37	Полигон	37	2	938,015896	19954,229027

Рис. 47. Атрибутивная таблица векторного слоя

Полученные полигоны следует сохранить как отдельные слои с тем либо иным качеством земель. Для этого используют кнопку «Выбрать по атрибуту», находящуюся в панели инструментов атрибутивной таблицы слоя, и в появившемся диалоговом окне задать выражение с соответствующим запросом (рис. 48).

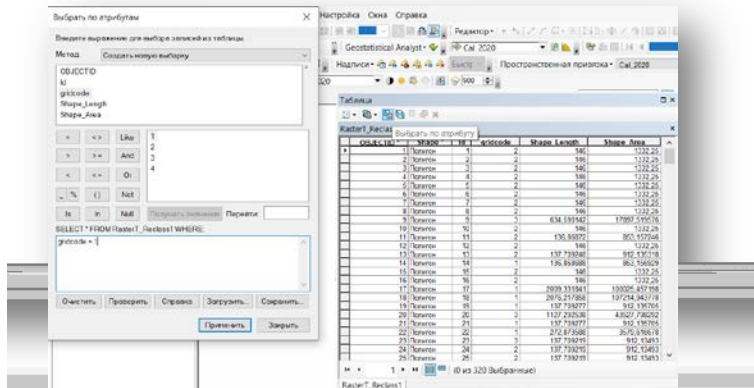


Рис. 48. Атрибутивная таблица слоя и диалоговое окно опции «Выбор по атрибуту»

В результате выполненных действий в атрибутивной таблице векторного слоя выделяются искомые объекты (в приведенном примере – полигоны, относящиеся к классу качества 1) (рис. 49).

OBJECTID	Shape	Id	gridcode	Shape_Length	Shape_Area
10	Полигон	10	2	146	1332,25
11	Полигон	11	2	136,86872	853,157246
12	Полигон	12	2	146	1332,25
13	Полигон	13	2	137,709283	912,135118
14	Полигон	14	1	136,868680	853,156929
15	Полигон	15	2	146	1332,25
16	Полигон	16	2	146	1332,25
17	Полигон	17	1	2009,331841	100025,457188
18	Полигон	18	1	2076,217858	107214,943778
19	Полигон	19	1	137,709277	912,135705
20	Полигон	20	3	1127,292538	43527,798292
21	Полигон	21	1	137,709277	912,135705
22	Полигон	22	1	272,873588	3579,616678
23	Полигон	23	3	137,709219	912,13493
24	Полигон	24	2	137,709219	912,13493
25	Полигон	25	2	137,709219	912,13493
26	Полигон	26	1	272,873589	3579,616809
27	Полигон	27	1	137,709188	912,134496
28	Полигон	28	3	6756,648851	1286203,083587
29	Полигон	29	3	925,215682	45317,763895
30	Полигон	30	2	739,863095	21429,626916
31	Полигон	31	2	623,971285	16254,288449
32	Полигон	32	3	272,873209	3579,609597
33	Полигон	33	2	137,710362	912,150387
34	Полигон	34	2	265,138894	2919,387038

Рис. 49. Атрибутивная таблица с выделенными полигонами

Все выделенные полигоны следует пересохранить как отдельный векторный слой. Такие же действия следует выполнить и в отношении оставшихся классов качества земель.

Выделенные менеджмент-зоны (рис. 50) посредством использования функциональных возможностей ГИС могут быть разбиты на рабочие участки, сформированные под ширину захвата применяемой высокоточной сельскохозяйственной техники для дифференцированного внесения минеральных удобрений, химических мелиорантов, а полученные картографические изображения – использоваться в качестве карт-заданий для ее эффективной работы.

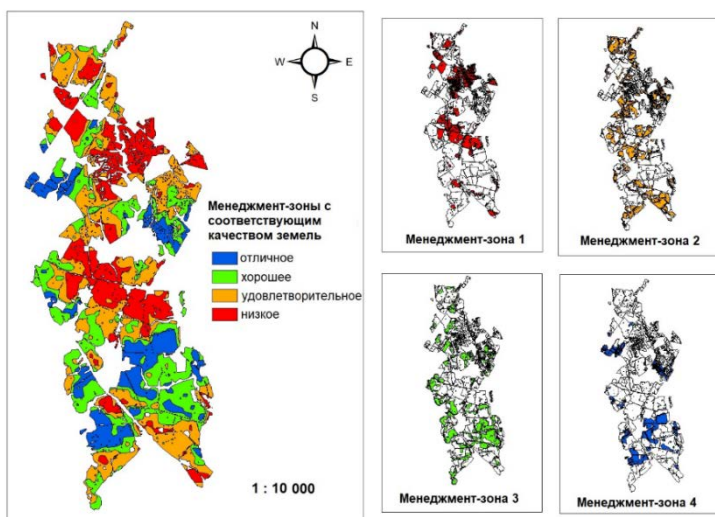


Рис. 50. Менеджмент-зоны с соответствующим качеством земель, идентифицированные в пределах землепользования

В пределах каждой из идентифицированных менеджмент-зон необходимо определить средние значения изучаемых показателей почвы, которые целесообразно использовать в качестве входных данных для расчета норм минеральных удобрений и химических мелиорантов при дифференцированном их внесении.

Карты-задания составляются на базе идентифицированных менеджмент-зон с использованием функциональных возможностей ГИС-технологий и состоят из элементарных участков, цвет которых соот-

ветствует заданной норме внесения удобрений в физическом весе. Каждый из элементарных участков должен иметь размер, равный ширине захвата разбрасывателя минеральных удобрений, и свою географическую привязку.

Используя функциональные возможности инструмента «Таблица площадей» набора инструментов «Зональные», можно вычислить площадь каждой из идентифицированных менеджмент-зон в пределах отдельного поля либо земельного участка (рис. 51).

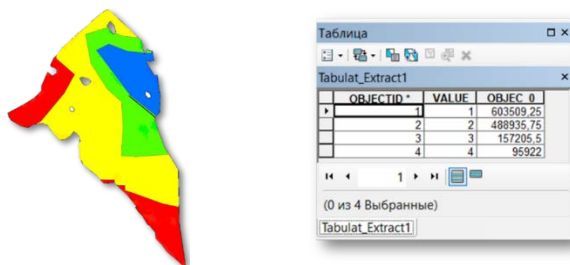


Рис. 51. Площадь идентифицированных менеджмент-зон в пределах отдельного поля, определенная методом зональной статистики

Внедрение *offline* технологии дифференцированного внесения удобрений в конкретном сельскохозяйственном предприятии должно предусматривать прохождение четырех последовательных этапов (рис. 52).

Этапы внедрения *off-line* дифференцированного внесения минеральных удобрений

- **ЭТАП 1** - создание базы геопроостранственных данных, содержащей сведения об основных почвенных параметрах полей и отдельных элементарных участков, и цифровых карт полей севооборотов;
- **ЭТАП 2** - идентификация и делинеация менеджмент-зон в пределах отдельных полей севооборота;
- **ЭТАП 3** - разработка электронных карт-заданий для дифференцированного внесения минеральных удобрений;
- **ЭТАП 4** - дифференцированное внесение удобрений в режиме *off-line*, когда бортовой компьютер агрегата считывает информацию с карты-задания и управляет положением дозирующих заслонок, увеличивая или уменьшая подачу удобрений.

Рис. 52. Этапы внедрения дифференцированного внесения удобрений на основе идентифицированных менеджмент-зон

Несмотря на то, что применение минеральных удобрений традиционно относят к сфере деятельности агрохимиков, а разработку технологий выращивания сельскохозяйственных культур и их практическую реализацию – к сфере деятельности растениеводов, внедрение технологий точного земледелия либо их отдельных элементов приводит к перераспределению ролей, выводя на первый план специалистов в сфере геоинформационных систем и технологий, каковыми являются инженеры-землеустроители.

Из четырех этапов практической реализации *offline* технологии дифференцированного внесения удобрений на трех должны быть задействованы специалисты-землеустроители, поскольку без получения актуальной геопространственной информации применение высокоточной техники, как и любого из элементов технологии точного земледелия, является неосуществимым.

Расчеты показывают, что за счет экономии средств при дифференцированном внесении фосфорных и калийных минеральных удобрений с использованием менеджмент-зон возможно повысить рентабельность выращивания озимых зерновых культур на 2,2 %, сахарной свеклы – на 1,3, рапса на маслосемена – на 1,1 и пивоваренного ячменя – на 0,8 % по сравнению с выращиванием данных сельскохозяйственных культур с применением традиционной системы удобрения (рис. 53).

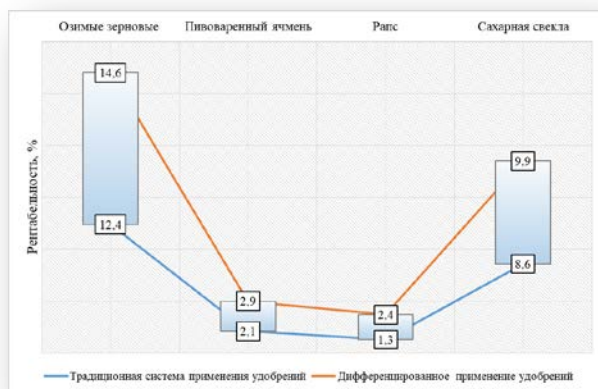


Рис. 53. Рентабельность выращивания отдельных сельскохозяйственных культур в полях севооборотов РУП «Учебно-опытное хозяйство БГСХА» при различных системах применения удобрений

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Внедрение инновационных систем хозяйствования в аграрной сфере производства невозможно без внедрения цифрового землеустройства, базирующегося на принципах точного земледелия и адаптивно-ландшафтных подходах и позволяющего рационально использовать земельные ресурсы и принимать эффективные проектные и управленческие решения. Существующая система внутрихозяйственного землеустройства, традиционно ориентированная на энерго- и ресурсозатратное земледелие и не учитывающая существующих неоднородностей в пределах отдельного поля либо земельного участка, является одним из значительных препятствий на пути перехода к инновационным стратегиям развития сельскохозяйственной отрасли и требует модернизации.

Важнейшей задачей современного землеустройства при внедрении инновационных технологий в сельскохозяйственном производстве является разработка методики создания актуальных, динамических, цифровых картографических материалов как основы информационного обеспечения рационального использования земель и методических подходов к осуществлению дифференциации территории по комплексу агрофизических и агрохимических свойств почв и агротехнологических характеристик участков пахотных земель для оптимизации сельскохозяйственного землепользования с учетом требований высокорентабельных сельскохозяйственных культур.

Геоинформационные системы являются действенным инструментом эффективной реализации функций внутрихозяйственного землеустройства по оптимизации землепользования и трансформации земельных угодий, обеспечивая получение оперативных и точных данных о количественном и качественном составе земель и их правовом статусе, тогда как геостатистика и геопространственный анализ представляют собой эффективные инструменты для изучения пространственного распределения характеристик почвы и их несогласованности и уменьшения дисперсии ошибок оценки и затрат на выполнение агрохимических исследований.

Методы геопространственной статистики позволяют с вероятностью 99 % идентифицировать неоднородности в пределах как отдельного поля, так и всего землепользования по одному или нескольким параметрам, и установить четкие границы между плодородными и мало плодородными землями, что может быть использовано при опреде-

лении менеджмент-зон для целей точного земледелия, в пределах которых планируется осуществлять те или иные землеустроительные мероприятия.

Алгоритм идентификации менеджмент-зон предусматривает: выполнение разведочного геостатистического анализа; определение необходимого числа градаций качества земель; оценку кластеризации данных и их анализ, поиск выбросов данных; построение интерполированных растров для определенного набора почвенных параметров; переклассификацию растров и выполнение многофакторного анализа; конвертирование итогового растра в векторные слои и определение площадей выделенных зон.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Внедрение системы точного земледелия / К. П. Андреев [и др.] // Вестник РГАУ. – 2019. – № 2 (42). – С. 74–80.
2. Денисов, К. Е. Повышение экономической эффективности растениеводства на основе дифференцированного внесения удобрений в системе точного земледелия / К. Е. Денисов, К. А. Петров, Н. С. Григорьев // Наука вчера, сегодня, завтра: сб. ст. по матер. XXXIV Междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск: СибАК, 2016. – № 5 (27). – Ч. 2. – С. 72–76.
3. Измайлов, А. Ю. Точное земледелие: проблемы и пути решения / А. Ю. Измайлов, Г. И. Личман, Н. М. Марченко // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2010. – № 5. – С. 9–14.
4. Координатное внесение удобрений на основе полевого мониторинга / Ж. В. Даниленко [и др.] // Вестник Рязан. гос. агротехнол. ун-та им. П. А. Костычева. – 2018. – № 4 (40). – С. 167–172.
5. 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.
6. Куцаева, О. А. Создание менеджмент-зон для целей землеустройства при внедрении элементов системы точного земледелия / 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. – 2020. – № 8. – С. 55–66.
8. Мысльва, Т. Н. Геостатистический анализ как инструмент оценки пространственного распределения свойств почв земель сельскохозяйственного назначения / Т. Н. Мысльва, О. А. Куцаева // Вестник ПГУ. – Сер. Ф. – 2019. – № 16. – С. 105–112.
9. 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 Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти ученых А. И. Горбылевой, Ю. П. Сиротина и В. И. Тюльпанова. – Горки: БГСХА, 2019. – С. 101–103.
10. Мысльва, Т. Н. Практические аспекты использования методов геопространственного анализа в землеустройстве и земельном кадастре / Т. Н. Мысльва, О. А. Куцаева // Земля Беларуси. – 2018. – № 3. – С. 14–18.
11. Мысльва, Т. Н. Создание менеджмент-зон для целей землеустройства при внедрении элементов системы точного земледелия / Т. Н. Мысльва, О. А. Куцаева // Вестник БГСХА. – 2020. – № 1. – С. 144–153.
12. Национальная система мониторинга окружающей среды Республики Беларусь: результаты наблюдений, 2018 год / под общ. ред. Е. П. Богодаж. – Минск: Респ. центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды, 2019. – 476 с.
13. Якушев, В. В. Точное земледелие: теория и практика: монография / В. В. Якушев. – Санкт-Петербург: ФГБНУ АФИ, 2016. – 364 с.
14. 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.
15. Doerge, T. A. Management zone concepts. The site-specific management guidelines /

- T. A. Doerge // Potash and Phosphate Institute: South Dakota State University, 1999. – P. 1–4.
16. Edge, B. An economic-theory-based approach to management zone delineation / B. Edge. – In: Poster Proceedings of the 12th European Conference on Precision Agriculture, July 8–11, 2019, Montpellier, France. – P. 56–57.
17. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils / C. A. Cambardella [at al.] // Soil Sci. Soc. Am. J. – 1994. – Vol. 58. – P. 1501–1511.
18. Gouri, S. B. Comparison of GIS-based interpolation methods for spatial distribution of soil organic carbon (SOC) / S. B. Gouri, P. K. Shit, R. Maiti // Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences. – 2016. – Vol. 2. – P. 1–13.
19. Kutsayeva, A. Creation of management zones for the purposes of land development at the implementation of precision farming in Belarus / A. Kutsayeva, T. Myslyva // International scientific journal: Baltic surveying. – 2020. – Vol. 12. – P. 19–27.
20. Management zone delineation using a modified watershed algorithm / P. Roudier [at al.] // Precision Agriculture. – 2008. – Vol. 9 (5). – P. 233–250.
21. Precision agriculture technologies positively contributing to ghg emissions mitigation, farm productivity and economics / A. Balafoutis [at al.] // Sustainability. – 2017. – Vol. 9. – P. 2–28.
22. Tobler, W. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region / W. Tobler // Economic Geography. – 1970. – Vol. 46 (2). – P. 234–240.
23. 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. – Brussel: Joint Research Centre of the European Commission, 2014. – 57 p.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. Общие сведения	7
2. Установление зон пространственной неоднородности в пределах землепользования сельскохозяйственного предприятия	11
3. Установление наличия кластеров и выбросов данных об агрохимических и физико-химических свойствах почвы	18
4. Моделирование пространственного распределения показателей качества почвы в пределах землепользования сельскохозяйственного предприятия	29
4.1. Создание растровых изображений пространственного распределения свойств почвы	29
4.2. Определение границ менеджмент-зон для целей внутрихозяйственного землеустройства при внедрении точного земледелия	41
Заключение	55
Библиографический список	57

Практическое издание

Мысльва Тамара Николаевна
Куцаева Олеся Алексеевна

**ФОРМИРОВАНИЕ ОДНОРОДНЫХ ТЕРРИТОРИАЛЬНЫХ
МЕНЕДЖМЕНТ-ЗОН В ПРОЦЕССЕ
ВНУТРИХОЗЯЙСТВЕННОГО ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВА
ПРИ ВНЕДРЕНИИ СИСТЕМЫ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ**

Рекомендации

Редактор *Е. В. Ширалиева*
Технический редактор *Н. Л. Якубовская*

Подписано в печать 31.03.2021. Формат 60×84¹/₁₆. Бумага офсетная.
Ризография. Гарнитура «Таймс». Усл. печ. л. 3,49. Уч.-изд. л. 3,11.
Тираж 100 экз. Заказ .

УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия».
Свидетельство о ГРИИРПИ № 1/52 от 09.10.2013.
Ул. Мичурина, 13, 213407, г. Горки.

Отпечатано в УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия».
Ул. Мичурина, 5, 213407, г. Горки.