

## Методология

УДК: 631.674.5:504.064.36

<https://doi.org/10.31857/S2500-26272019166-70>

### АЛГОРИТМ УЧЕТА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ИСХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОРОШАЕМОГО УЧАСТКА НА ОСНОВЕ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ

Н.Н. Дубенок<sup>1</sup>, В.В. Бородычев<sup>2</sup>, академики РАН,  
М.Н. Лытов<sup>2</sup>, кандидат сельскохозяйственных наук

<sup>1</sup> Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия  
им. К.А. Тимирязева, 127550, Москва, ул. Тимирязевская, 49

<sup>2</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации  
им. А.Н. Костякова, 127550, Москва, ул. Большая Академическая, 44  
E-mail: vkovniigim@yandex.ru

*Разработаны теоретические основы создания систем, позволяющие на основе последних достижений в области ГИС-технологий перейти к реализации концепции точного земледелия. Расширение принципов точного земледелия в область агромелиоративных технологий связано с необходимостью учета пространственной неоднородности исходных характеристик мелиорированных земель на основе специфического, отраслевого комплекса критериев и показателей. Предложена концептуальная схема выделения территориальных единиц управления на основе данных о внутрипольной неоднородности показателя, разработан алгоритм группировки пространственных данных для оценки границ и пространственного положения территориальных единиц управления на основе ГИС-технологий, рассмотрены две принципиальные схемы обследования участка для выделения территориальных единиц управления. Предложенный алгоритм, реализуемый на основе геоинформационных технологий, позволяет эффективно решать задачу выделения территориальных единиц управления, проблемы учета пространственной неоднородности исходных характеристик орошаемого участка и имеющей прямое прикладное значение для создания технологий точного орошения.*

### ALGORITHM TAKING INTO ACCOUNT THE SPATIAL INHOMOGENEITY OF THE INITIAL CHARACTERISTICS OF IRRIGATED LAND ON THE BASIS OF GIS-TECHNOLOGIES

Dubenok<sup>1</sup> N.N., Borodychev<sup>2</sup> V.V., Lytov<sup>2</sup> M.N.

<sup>1</sup> Russian state agrarian University - Moscow agricultural Academy  
im. K. A. Timiryazev, Moscow, Timiryazevskaya ul., 49

<sup>2</sup> All-Russian research Institute of hydraulic engineering and land reclamation  
them. A. N. Kostyakova, Moscow, Bolshaya akademicheskaya ul., 44  
E-mail: vkovniigim@yandex.ru

*The scientific direction within which the present research was carried out is the development of the theoretical foundations for the creation of real-time systems that allow, on the basis of the latest achievements in the field of GIS technologies, to move to the implementation of the concept of precise irrigation. The expansion of the principles of precision farming in the field of agromeliorative technologies is due to the need to take into account the spatial heterogeneity of the initial characteristics of reclaimed land on the basis of a specific, sectoral set of criteria and indicators. Based on the results of the research, a conceptual scheme for the allocation of territorial control units based on data on intra-field heterogeneity of the indicator is proposed, an algorithm for grouping spatial data to assess the boundaries and spatial position of territorial control units based on GIS technologies is developed, two principal schemes of the site survey for the allocation of territorial control units are considered. The proposed algorithm, implemented on the basis of last generation geographic information technologies, makes it possible to effectively solve the problem of allocation of territorial control units, which is a key problem of taking into account the spatial heterogeneity of the initial characteristics of the irrigated area and has a direct applied value for the creation of precision irrigation technologies.*

**Ключевые слова:** орошение, системы реального времени, ГИС-технологии, пространственная неоднородность, единицы управления

**Key words:** irrigation, real-time systems, GIS technology, spatial heterogeneity, control units

Мелиоративная сфера аграрного производства традиционно является одной из наиболее энерго- и ресурсоемких видов деятельности и потому характеризуется наиболее ожидаемым положительным эффектом внедрения геоинформационных технологий [1-3]. Геоинформационные технологии в мелиорации обеспечивают возможность оптимальной организации информационных потоков – контролирующей, мониторинговой и управляющего сектора с жесткой координатной привязкой и возможностью постоянного

контроля взаимного положения объекта и технических средств управления. Использование геоинформационных технологий на базе систем реального времени позволяет организовать онлайн контроль и управлять режимами работы мелиоративной техники в течение всего технологи-ческого цикла. Кроме того, использование геоинформационных технологий в составе систем реального времени позволяет поддерживать

принятие сложных, системно обоснованных управленческих решений.

Важнейшей задачей, решение которой возможно лишь на базе геоинформационных технологий, является адаптация элементов агрономелиоративных технологий к внутриполевому варьированию условий – пространственной неоднородности объекта и предмета управления.

Цель исследований заключается в концептуальном обосновании основных положений и разработке алгоритма учета пространственной неоднородности исходных характеристик орошаемого участка на основе ГИС-технологий.

**Методика.** Последовательный переход к реализации принципов точного земледелия в области агрономелиоративных технологий включает несколько неотъемлемых функциональных позиций:

- количественное описание пространственной неоднородности сельскохозяйственных угодий с определением границ и положения территорий, предмет управления в пределах которых характеризуется относительной (допустимой) степенью однородности;

- количественная оценка критериев управления в границах выделенных территорий;

- обоснование совокупности воздействий и выработка управляющих действий, дифференцированных для выделенных территорий;

- реализация агроприемов на основе дифференцированного подхода к определению интенсивности воздействий в границах выделенных территорий.

Выделенные территории, в составе технологий точного (прецизионного) земледелия принято называть «единицами управления» [4].

Методологической основой исследований являются основные положения теории объектно-ориентированных информационных систем и геоинформационных технологий [5, 6], теории пространственно-временного прогнозирования в геоинформатике [7], теории точного земледелия [4, 8] и др. В качестве материалов исследований используются основные положения теории и практики эксплуатации мелиоративных систем [9], включая оросительные системы нового поколения, а также материалы собственных исследований, проводимых в рамках разработки систем реального времени в области мелиорации земель [10].



Рис.1. Схема выделения территориальных единиц управления на основе данных о внутриполевой неоднородности показателя.

**Результаты и обсуждение.** В рамках реализуемой концепции геоинформационных систем мониторинга и управления орошением разработана следующая схема выделения территориальных единиц управления на основе данных о внутриполевой неоднородности показателя (рис. 1).

Ключевой исходной информацией для выделения относительно однородных территориальных образований – единиц управления, являются пространственно-организованные ряды количественных, либо качественных показателей-характеристик объекта управления. Эти данные позволяют оценить пространственное распределение показателей-характеристик объекта управления, а также наметить границы участков, где

вариация этих данных минимальна, отсутствует, максимальна, оценить основные закономерности вариативных рядов. Однако только на основе этих данных выделение территориальных единиц невозможно.

Помимо вариабельности – показателей-характеристик объекта управления – важно знать количественную меру этой вариабельности – границу, в пределах которой мы можем утверждать, что объект управления однороден, а за пределами – неоднороден. Следует понимать, что в реальности абсолютно однородных участков практически нет, а вариация показателей, характеризующих объект управления, имеет сплошной, неразрывный характер. Поэтому важно знать допустимую меру неоднородности показателей в границах территориальной единицы управления. Общие подходы к определению такой меры включают:

- определение дополнительного эффекта от учета внутрипольных неоднородностей показателя, для аграрных технологий этот эффект, прежде всего, выражается в получении дополнительной продукции (повышении урожайности, выхода товарной доли и др.). Важно также помнить и об экономии производственных ресурсов, возможно за счет точной, территориально-дифференцированной дозировки воздействий, – экономии оросительной воды, удобрений, пестицидов и др. Такую экономию производственных ресурсов следует также присовокупить к объему дополнительного эффекта; безусловно все показатели, складывающиеся в «дополнительный эффект» должны иметь одинаковую размерность, например, за счет приведения к его энергетической или экономической стоимости;

- определение дополнительных затрат на выполнение технологического процесса при учете внутрипольных неоднородностей показателей-характеристик объекта управления; имеются ввиду те дополнительные затраты на выполнение агроуправляющих операций, которые возникают исключительно при использовании принципов точного земледелия; сюда в первую очередь относятся и затраты на оценку внутрипольной вариабельности показателей-характеристик объекта управления, выделение территориальных единиц управления; кроме того, важно учитывать удорожание технической системы, основанной на использовании наукоемких технологий, включающей компоненты пространственно-разнесенной информационной системы и новые конструкции исполнительных комплексов;

- обоснование допустимых значений коэффициента вариации показателей-характеристик объекта управления в пределах территориальной единицы управления; проводится на основании сопоставления дополнительного эффекта и дополнительных затрат на выполнение технологического процесса в функции вариабельности показателей-характеристик объекта управления; допустимые значения коэффициента вариации лежат в области определения функции больше единицы; в общем случае решается оптимизационная задача на поиск экстремумов и наибольших значений функции в области ее определения больше единицы.

Определенные таким образом допустимые значения коэффициента вариации показателя являются основным критерием выделения территориальных единиц управления на основании последовательной группировки данных вариативного ряда. Последовательность обработки вариативных рядов показателей-характеристик объекта управления согласно предложенной схеме следующая:

- реализуется алгоритм перебора показателей-характеристик объекта управления; показатели выделяются те, которые в наибольшей степени характеризуют предмет управления, либо оказывают на него прямое или косвенное влияние в соответствии с известными методиками [5], показатели могут быть сгруппированы и разделяться на низкочастотные (макрокомпонента), среднечастотные (мезокомпонента) и высокочастотные (микрокомпонента); такая группировка позволяет организовать эффективные наложения показателей при анализе;

- реализуется алгоритм группировки данных последовательного ряда пространственных измерений; это один из ключевых моментов обработки вариативных рядов, ниже он будет раскрыт более подробно;

- вычисляются статистические характеристики сгруппированных данных последовательности; среди прочих статистических характеристик важно выделить те, которые позволяют дать количественную оценку вариационной изменчивости групп данных; коэффициент вариации позволяет количественно оценить нормированную вариационную изменчивость внутри групп данных.

Следующим этапом предложенной схемы выделения территориальных единиц управления является численное сравнение фактических и допустимых значений коэффициента вариации внутри групп данных. На основании результатов этого сравнения выбирается следующая последовательность расчетов.

Если фактическое значение коэффициента вариации для выборки пространственных данных меньше допустимого для территориальных единиц управления, то инициируется новый цикл расчетов, который начинается с выполнения алгоритма группировки данных последовательного ряда пространственных измерений. Алгоритм выполняется, учитывая результаты предыдущих расчетов и инструкции, соответствующие инициации нового цикла расчетов для выбранного показателя.

Если фактическое значение коэффициента вариации для выборки пространственных данных больше допустимого для территориальных единиц управления, то инициируется вывод группы данных предыдущего цикла расчетов. Из выделенной группы данных извлекается атрибутивная информация их пространственной привязки, что является основанием для определения пространственного положения территориальной единицы управления. Кроме того, на основании всей совокупности значений выделенной группы данных производится количественная оценка (осред-

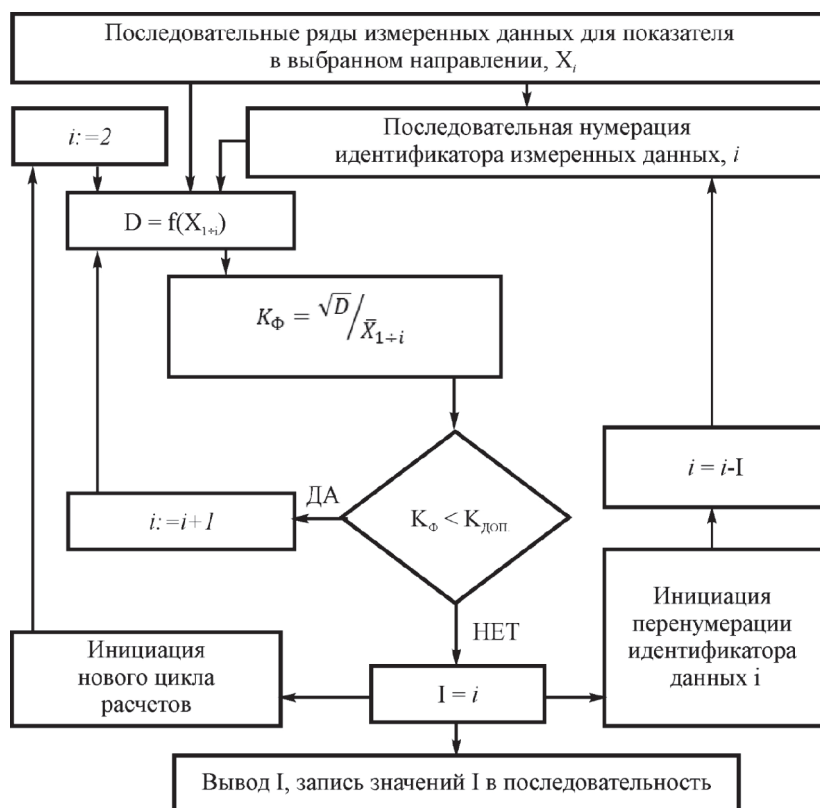


Рис.2. Алгоритм группировки пространственных данных для оценки границ и пространственного положения территориальных единиц управления.

нение) показателя для территориальной единицы управления. Пространственное положение территориальной единицы управления и результаты количественной оценки средней показателя являются результирующими решениями предложенной схемы выделения территориальных единиц управления на основе данных о внутрипольной неоднородности показателя.

Рассмотрим подробнее алгоритм группировки пространственных данных для оценки границ и пространственного положения территориальных единиц управления (рис. 2). Исходными данными для выполнения алгоритма являются последовательные ряды измеренных данных по показателю в выбранном направлении –  $X_i$ . Выбор направления в пространственном распределении измеренных данных имеет важное значение и является обязательным условием корректного определения линейного размера территориальной единицы управления в выбранном направлении. Выполнение алгоритма начинается с последовательной нумерации идентификатора измеренных данных  $i$ . Данные для выбранного направления нумеруются последовательно, начиная с единицы с целочисленным шагом. Корректная нумерация идентификатора важна для последующей группировки измеренных данных. Минимальный набор данных, для которого вычисляются статистические характеристики, принимается равным 2, для чего соответствующее значение присваивается идентификатору данных.

В общем случае статистика вычисляется для группы данных с интервалом идентификатора от 1 до присвоенного в данном цикле расчетов значения. Определяется внутригрупповая дисперсия численных значений выбранных данных, на основании которой ведется расчет коэффициента вариации. Вычисленное значение коэффициента вариации сравнивается с допустимым в модуле сравнения, решением которого может являться одно из двух значений – ДА или НЕТ. Если фактическое значение коэффициента вариации меньше допустимого, цикл расчетов продолжается с присвоением идентификатору измеренных данных очередного целочисленного значения. Если фактическое значение коэффициента вариации больше, либо равно допустимому уровню, выполняется три равнозначимых действия:

- иницируется новый цикл расчетов, целью которого является выделение новой группы данных для оценки следующей территориальной единицы управления;

- результирующему значению  $I$  присваивается текущее значение  $I$  минус единица; результат выводится на дисплей и записывается в последовательность  $I$ -значений;

- иницируется перенумерация идентификатора данных; перенумерация заключается в вычислении численной разности между исходными значениями идентификатора  $i$  и результирующим значением предыдущего цикла вычислений  $I$ .

а)

+	+	+	+	+	+	+
+	+	+	+	+	+	+
+	+	+	+	+	+	+
+	+	+	+	+	+	+

б)

+			+	+		+
	+	+			+	
	+	+		+	+	
+			+			+

Рис.3. Схемы обследования участка на предмет выделения территориальных единиц управления: а— сплошной метод, б— диагональный.



Выполнение вычислений согласно предложенного алгоритма позволяет выделить последовательные группы измеренных данных с заданными ограничениями по внутригрупповой вариабельности значений.

Как уже говорилось выше, выбор направления последовательного измерения показателя в границах орошаемого участка является необходимым условием корректного определения размерных характеристик и пространственного положения территориальных единиц управления. На практике выбор направления последовательного измерения показателя неразрывно связан с методом обследования орошаемого участка. Обследование может быть проведено сплошным методом (рис. 3), но также допускается использование специальных схем обследования участка, позволяющих сократить общее число измерений. На представленном рисунке в этом плане показан диагональный метод обследования орошаемого участка. Главным достоинством сплошного метода является возможность всестороннего учета вариабельности показателя, а также возможность проведения процедуры выделения территориальных единиц управления уже после обследования, на основании полученных ранее результатов. Недостатком метода является его высокая ресурсоемкость, необходимость проведения достаточно большого числа измерений для проведения расчетов с требуемой точностью.

Диагональный метод обследования орошаемого участка может использоваться для сокращения потребности в общем количестве проведенных измерений. Однако алгоритм выделения территориальных единиц управления в этом случае должен выполняться непосредственно в процессе обследования. При этом прямоугольные территориальные образования выделяются по результатам группировки проведенных диагональных измерений. Если очередное измерение выводит общую вариабельность числового ряда за допустимые пределы, выделение территориальной единицы управления осуществляется по результатам координатной привязки предыдущей группы измерений. Последнее измерение, не вошедшее в состав сгруппированных данных, идентифицируется как первое измерение новой группы численного ряда.

Таким образом, исходной информацией для выделения относительно однородных территориальных образований – единиц управления для целей орошения, являются пространственно-организованные ряды количественных, либо качественных показателей-характеристик объекта управления. Последовательность обработки вариативных рядов показателей-характеристик объекта управления согласно предложенной схемы включает алгоритм перебора показателей-характеристик объекта управления, алгоритм группировки данных последовательного ряда пространственных измерений, вычисление статистических характе-

ристик сгруппированных данных последовательности, численное сравнение фактических и допустимых значений показателей вариабельности внутри групп данных. Предложены два метода обследования участка на предмет выделения территориальных единиц управления, основанных на реализации технологии сплошного учета и диагональных измерений прямоугольных структур. Предложенный алгоритм, реализуемый на основе геоинформационных технологий последних поколений, позволяет эффективно решать задачу выделения территориальных единиц управления, являющуюся ключевой задачей проблемы учета пространственной неоднородности исходных характеристик орошаемого участка.

#### Литература.

1. Мельник М.А., Волкова Е.С., Фузелла Т.Ш. ГИС-технологии как эффективный инструмент для оценки негативных природно-климатических факторов, лимитирующих развитие аграрного природопользования // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. – 2016. – № 124. – С. 650-661.
2. Мукушева М.К., Спиридонов С.И., Глебаев М.Б., Баранов С.А., Березин С.А., Савакасов М.О. Применение ГИС-технологий для создания системы поддержки принятия решений // *Гидрометеорология и экология*. – 2006. – № 2 (41). – С. 126-138.
3. Дунаева Е.А. Методологические и информационные основы оценки водообеспеченности территорий средствами ДЗЗ и ГИС // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2017. – Т. 14. – № 3. – С. 173-181.
4. Якушев В.П., Буре В.М., Якушев В.В. Выделение однородных зон на поле по урожайности отдельных участков // *Российская сельскохозяйственная наука*. – 2007. – № 3. – С. 33-36.
5. Моор П.К., Моор А.П. *Объектно-ориентированные информационные системы*. – Тюмень: Издательство Тюменского государственного университета, — 2009. – 165 с.
6. Бышов Н.В., Бышов Д.Н., Бачурин А.Н., Олейник Д.О., Якунин Ю.В. *Геоинформационные системы в сельском хозяйстве*. – Рязань: ФГБОУ ВПО РГАУ, 2013 – 169 с.
7. Гитис В.Г., Ермаков Б.В. *Основы пространственно-временного прогнозирования в геоинформатике*. – М.: Физматлит, 2007. – 256 с.
8. Якушев В.В. *Точное земледелие: теория и практика*. – Санкт-Петербург: Агрофизический институт, 2016. – 364 с.
9. Щедрин В.Н., Колганов А.В., Васильев С.М., Чураев А.А. *Оросительные системы России: от поколения к поколению*. – Новочеркасск: Геликон, 2013. – Т1-Т2. – 590 с.
10. Бородычев В.В., Лытов М.Н., Головинов Е.Э. *Мониторинг и управление орошением в режиме реального времени. – Механизация и электрификация сельского хозяйства*. — 2017. – 154 с.

Поступила в редакцию 25.04.18  
После доработки 17.10.18  
Принята к публикации 19.10.18