

## Геоинформационное обеспечение прецизионных экспериментов в земледелии

### Geoinformation support of precise experiments in agriculture

#### Якушев / Yakushev V.

Виктор Петрович  
(Vyakushev@agrophys.ru)  
академик РАН,  
доктор сельскохозяйственных наук.  
ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт» (ФГБНУ АФИ),  
директор.  
г. Санкт-Петербург

#### Якушев / Yakushev V.

Вячеслав Викторович  
(mail@agrophys.com)  
доктор сельскохозяйственных наук.  
ФГБНУ АФИ,  
заведующий лабораторией информационного обеспечения точного земледелия.  
г. Санкт-Петербург

#### Конев / Konev A.

Алексей Владимирович  
(com@agrophys.com)  
кандидат сельскохозяйственных наук.  
ФГБНУ АФИ,  
заведующий сектором ГИС и дистанционного зондирования.  
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: точное земледелие – precision agriculture; прецизионный эксперимент – precise experiment; агрохимические показатели почвы – agrochemical soil properties; пространственная неоднородность поля – spatial field variability; геоинформационные системы – GIS.

В статье представлены результаты использования геоинформационных и технических средств точного земледелия, обеспечивающих автоматизацию и процессы планирования и проведения прецизионных экспериментов по оценке влияния агрохимических показателей на продуктивность сельскохозяйственных земель.

The paper presents the results of the precision agriculture technology application for providing automation, planning and carrying out of precise experiments to determine the influence of agrochemical soil properties on farmland efficiency.

#### Введение

Общепризнано, что главным методом научных исследований в агрономии был и остается натурный полевой эксперимент. Традиционно к опытному полю предъявляются два основных требования – это однородность почвенного покрова и однородность пахотного горизонта по агрофизическим и агрохимическим характеристикам. По этой причине внутрипольная пестрота основных характеристик

опытного участка – одна из основных проблем в процессе закладки опыта. Обычно преобладающей в принятой на сегодня методике опытного дела является тенденция, заключающаяся не столько в изучении и учёте неоднородности почвы, сколько в нейтрализации ее влияния на результаты опытов [1]. Вместе с тем, современные технологии точного земледелия открывают большие возможности для совершенствования методики проведения полевых прецизионных опытов в условиях неоднородности почв. С помощью систем глобального позиционирования, комбайнов с пространственным учетом урожайности и геоинформационных систем (ГИС) стало возможным изучение функции продуктивности от внутривидовой неоднородности. В условиях точного земледелия прецизионные полевые опыты могут представлять собой подробное описание наблюдений, осуществляемых в рамках производственного процесса в каком-либо хозяйстве без существенного варьирования управляющих воздействий. Такие эксперименты, пассивного характера, представляют большой интерес и дают важную информацию ввиду наличия произвольно варьирующихся факторов, обеспечивающих уникальность полученной информационной базы. Кроме того, прецизионные полевые эксперименты могут носить принципиально иной, активный характер, то есть допускать возможность существенного варьирования различных управляющих воздействий. Цель таких опытов заключается в попытке выяснения характера зависимости результирующего показателя от разнообразных факторов и выбора наилучших

значений управляющих факторов. В обоих случаях при осуществлении наблюдений необходимо фиксировать пространственно-временную динамику максимального количества атрибутивных и результирующих характеристик. В частности, исключительно только с помощью методологии и технических средств точного земледелия можно организовать прецизионные опыты по совершенствованию нормативной базы определения доз удобрений для почвенно-климатических условий конкретного хозяйства [2, 3].

### Автоматизация процесса планирования и проведения прецизионных агрохимических экспериментов

Разрабатываемый в Агрофизическом НИИ (АФИ) программный комплекс включает в себя уже созданный функционал, обеспечивающий автоматизированную поддержку планирования и проведения прецизионных экспериментов для оценки влияния агрохимических показателей на продуктивность земель [4]. В качестве основных агрохимических показателей, определяющих продуктивность заданного сельскохозяйственного поля, будем рассматривать содержание потенциально доступного азота ( $N$ ), фосфора ( $P$ ) и калия ( $K$ ) в почве.

На первом этапе создается электронный контур опытного поля с помощью мобильного комплекса и установленного на нем GPS/GLONASS оборудования, которое работает в связке с программным обеспечением АФИ. Полученный контур сельскохозяйственного поля разбивается на участки одинаковой площади (в рассматриваемом примере 50 м на 50 м) с фиксацией точных географических границ каждого элементарного участка и производится их агрохимическое обследование (рис. 1).

Многофакторные прецизионные эксперименты целесообразно проводить на поле большой площади, тогда можно ожидать, что количество относительно однородных участков каждого класса (типа), которые соответствуют одной и той же комбинации пространственно распределенных факторов, окажется довольно большим. На этапе планирования необходимо заранее задать диапазоны изменения факторов на градации. Количество градаций для каждого фактора может быть разным и зависит от целей постановки прецизионного эксперимента [5]. Отбор почвенных проб проводится с применением автоматического пробоотборника, установленного на мобильном комплексе, после чего образцы поступают в агрохимическую лабораторию для анализа по изучаемым показателям ( $NPK$ ) с последующим построением тематических карт пространственного распределения зарегистрированных параметров. По итогам агрохимического анализа и в соответствии с выбранными исследователем диапазонами градации факторов поле разделяется на относительно однородные классы, каждый из которых в дальнейшей работе рассматривается как отдельный объект управления (левая часть рис. 2).

Приступая к созданию схемы эксперимента, необходимо заранее задать градации изменения изучаемых показателей ( $NPK$ ). Пусть  $m_1$  – количество градаций показателя  $N$ ,  $m_2$  – количество градаций показателя  $P$ ,  $m_3$  – количество градаций показателя  $K$ . Тогда по правилу комбинаторики общее количество возможных вариантов  $m = m_1 \cdot m_2 \cdot m_3$ . Вычислив  $m$  и зная площади однородных участков по каждому классу, можно начинать планирование самой схемы проведения, например полного факториального эксперимента на заданном поле. Далее для примера положим, что  $m_1 = m_2 = m_3 = 3$  и рассмотрим процедуру планирования и проведения прецизионного эксперимента с применением

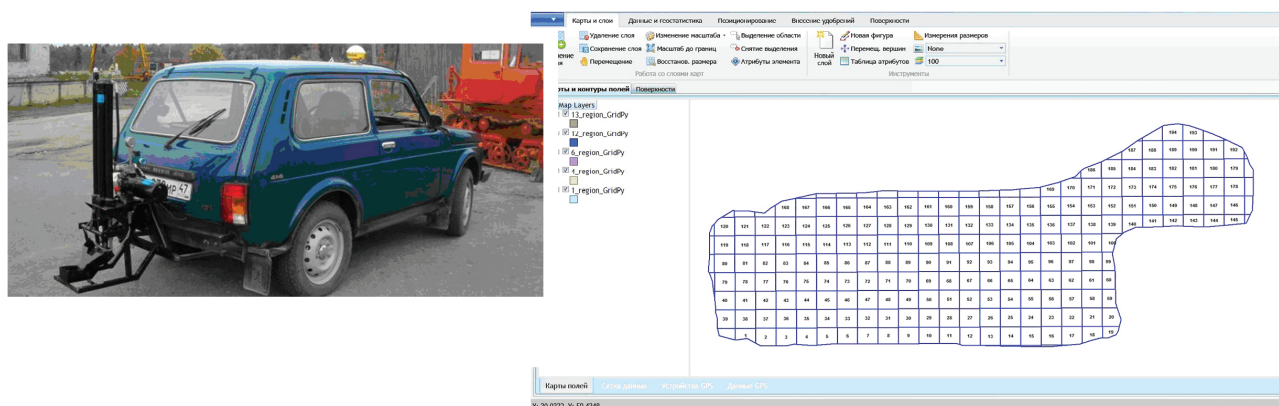


Рис. 1. Сетка агрохимического обследования

созданного нами программного комплекса. Для этого однородный сегмент (правая часть рис. 2), выделенный на поле по результатам агрохимического обследования, разделим на кратное величине  $m$  количество фиксированных участков, каждому из которых будет назначена доза удобрений из набора запланированных 27 вариантов опыта. С применением программного комплекса, для повышения уровня объективности и достоверности проводимого исследования, следует рандомизировать процедуру назначения конкретной дозы удобрений для конкретного участка фиксированного типа из заранее определенного набора доз. При этом количество участков внутри совокупности участков данного типа, на которых реализуется некоторая определенная доза удобрений, должно быть примерно таким же, как количество участков, на которых реализуется другая доза удобрений.

Рис. 3 иллюстрирует работу программного комплекса АФИ при планировании схемы прецизионного эксперимента. Каждый из 27 вариантов прецизионного эксперимента реализуется как минимум в четырех повторностях со случайным пространственным распределением. В приведенном примере однородный участок поля делится на делянки опыта размером 32х32 метра.

Сгенерированная на данном этапе схема прецизионного эксперимента является одновременно и картой-заданием на проведение операции дифференцированного внесения удобрений. При движении трактора по полю на основании карты-задания и данных GPS/GLONASS-приёмника удобрения вносятся в нужных количествах и в нужном месте, таким образом, схема прецизионного эксперимента с максимальной точностью в автоматическом режиме реализуется на поле.

В ходе проведения прецизионного эксперимента целесообразно организовать сбор данных, характеризующих динамику почвенно-растительного комплекса на заданном сельскохозяйственном поле. Для указанных целей в АФИ применяются собственные физико-технические разработки, обеспечивающие

мониторинг посевов и среды их обитания. Мобильное информационно-измерительное устройство для определения комплекса агрофизических характеристик позволяет выявлять и пространственно фиксировать следующие виды неоднородностей пахотного слоя почвы: объемную влажность, электропроводность, температуру, сопротивление горизонтальной пенетрации. Беспилотный летательный аппарат обеспечивает съемку опытных полей в видимой и ближней инфракрасной областях спектра. Вся собираемая в ходе мониторинга информация фиксируется в программном комплексе в виде тематических карт с пространственной привязкой географических объектов.

Уборка урожая с помощью специализированного комбайна позволяет автоматически получить электронную карту заданного поля, где фиксируется продуктивность каждого небольшого участка поля примерно одинаковой площади (5х5 м). Карта импортируется в программный комплекс из бортового компьютера комбайна и является набором точечных объектов с фиксированным географическим положением (рис. 4).

Любой прецизионный эксперимент должен заканчиваться созданием обширной информационной базы, включающей в себя динамику атрибутивных и результирующих показателей, а также управляющих воздействий во времени и пространстве. При информационном обеспечении прецизионных экспериментов необходимо учитывать большой объем информации, генерируемой в результате их проведения. К примеру, полю 50 га будет сопоставлена информационная база, составляющая 20 000 записей, т.е. каждый гектар площади поля будет охарактеризован 400 наборами данных. Слои геоинформационной базы, участвующие в работе, представляют собой пространственное распределение параметров, выявленных на этапе почвенно-растительного мониторинга и уборки урожая. В ходе эксперимента могут

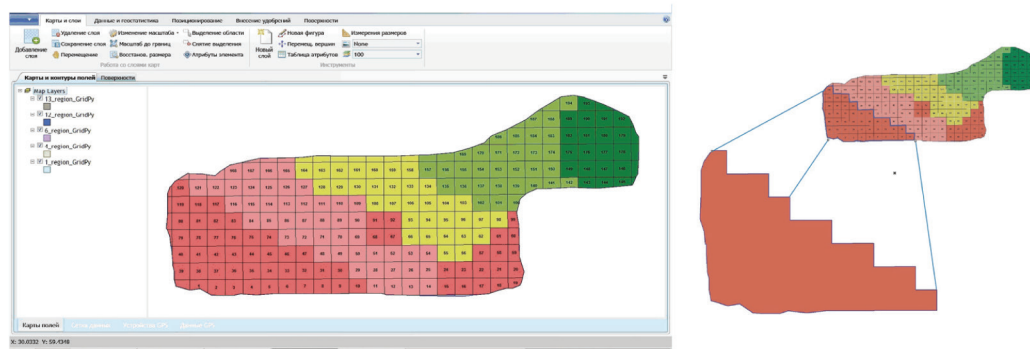


Рис. 2. Выделение однородных зон

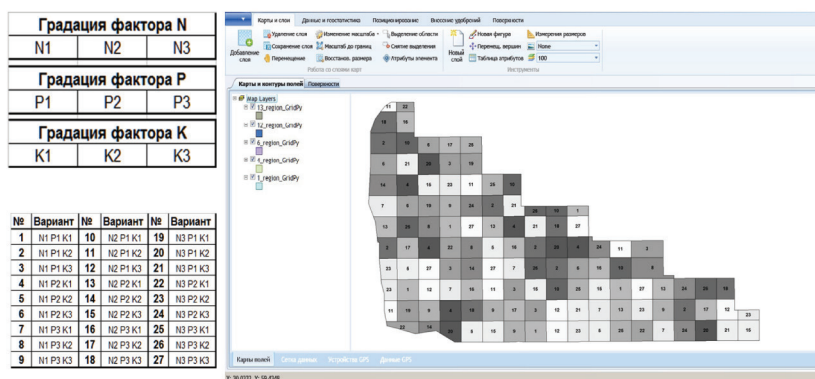


Рис. 3. Компьютерное планирование схемы прецизионного эксперимента

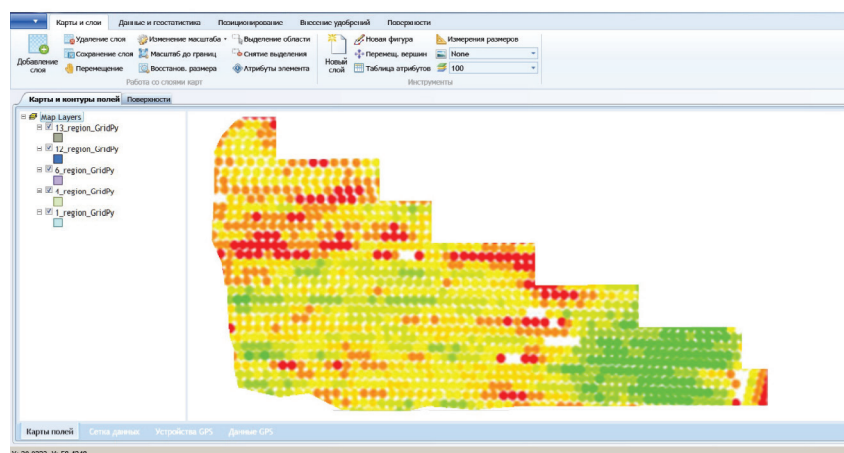


Рис. 4. Карта урожайности

формироваться десятки–сотни слоев, численно описывающих пространственную и временную неоднородность поля.

Объединение атрибутивной информации в единую базу данных производится на основе сравнения географических координат объектов, участвующих в работе слоев. Так как слои карты могут содержать различные типы географических объектов с произвольной геометрической конфигурацией, осуществление операции по объединению атрибутивной информации требует предварительного проведения пространственной интерполяции, применяемой к слоям карты. В ходе выполнения данной процедуры на каждый тематический слой карты накладыва-

ется единая сетка пространственной интерполяции. Размер ячейки сетки зависит от набора полученных в ходе эксперимента данных. Для предотвращения потери информации размер ячейки сетки интерполяции не должен превышать размер наименьшего элементарного участка или наименьшего расстояния между точечными объектами участвующих в обработке слоев карты. Обычно при проведении прецизионных экспериментов такой границей выступает размер ячейки карты урожайности (5 м на 5 м).

Заложенный в программный комплекс функционал позволяет осуществлять пространственную интерполяцию следующими методами:

- кригинг (Kriging);

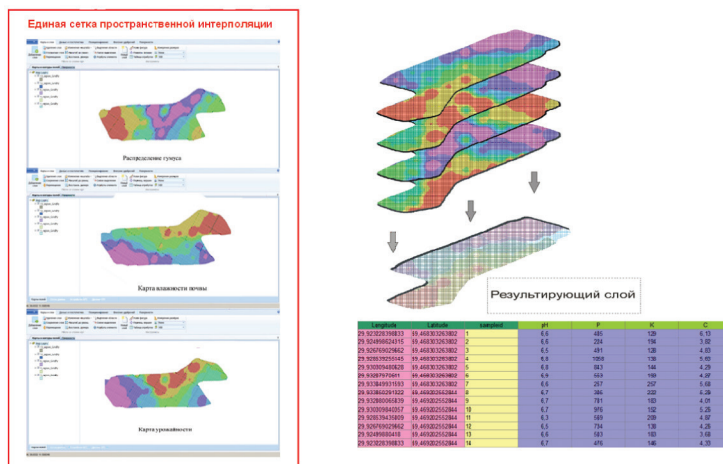


Рис. 5. Генерация информационной базы прецизионного эксперимента

- обратного расстояния (Inverse Distance to a Power);
- минимальной кривизны (Minimum Curvature);
- натуральных соседей (Natural Neighbor);
- ближайших соседей (Nearest Neighbor);
- полиномиальной регрессии (Polynomial Regression);
- радиальных базисных функций (Radial Basis Function);
- триангуляция с линейной интерполяцией (Triangulation with Linear Interpolation);
- скользящего среднего (Moving Average).

Автоматическое построение базы данных по проведенному прецизионному эксперименту осуществляется путем вертикального среза информации по каждой ячейке интерполяционной сетки, что позволяет произвести отображение всей изучаемой информации на единый результирующий слой, хранящий всю информацию по проведенному эксперименту. В программном комплексе реализован функционал, осуществляющий генерацию подобных информационных баз как сразу по всему полю, так и по интересующим исследователя конкретным участкам (рис. 5).

### Заключение

В результате компьютерного планирования прецизионного эксперимента, его осуществления с помощью технических средств точного земледелия, включая получение карты урожайности, характеризующей пространственное распределение продуктивности по всем возможным вариантам, будет получена обширная пространственно-атрибутивная база данных. Последующая ее обработка приведет к возможности установления четких соответствий между наиболее целесообразными дозами удобрений, условиями произрастания культуры и продуктивностью на каждом изучаемом участке.

Для статистического анализа полученной информационной базы может использоваться весь спектр возможных статистических методов: параметрических и непараметрических методик, логического, дисперсионного и регрессионного анализов, методов бинарной регрессии, анализ таблиц сопряженности, а также дискриминантный и кластерный анализы. В результате применения этих методик появляется возможность проверить правильность сделанных предположений и увидеть характер общих тенденций в проведенном прецизионном эксперименте [6].

Прецизионные эксперименты, осуществляемые с помощью методологии точного земледелия, открывают новые возможности по совершенствованию информационного обеспечения сельскохозяйственного производства как на опытных полях научных учреждений, так и на полях конкретных хозяйств. Следует особо подчеркнуть, что предлагаемая для проведения схема полного факториального эксперимента призвана наиболее грамотно решать конкретную оптимизационную задачу – выбор оптимальных доз удобрений для повышения продуктивности данной культуры в условиях известных значений основных факторов (NPK) для каждого элементарного участка. Каждое поле, в определенном смысле, становится опытным для самого себя, так как с течением времени происходит накопление ценных данных. Такой подход, несомненно, повысит уровень обоснованности агрохимических решений, так как выявленные зависимости будут максимально объективно отражать процессы, происходящие именно на этом конкретном участке. Сама идея проведения подобных экспериментов, также как и практическая их реализация, могла появиться только в рамках точного земледелия, что является ещё одним веским аргументом в пользу этой современной технологии.

## Литература

1. Доспехов, Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследования) / Б.А. Доспехов. – М.: Агропромиздат, 1985. – 351 с.
2. Прецизионные эксперименты в информационном обеспечении систем земледелия / В.В. Якушев [и др.] // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2011. – № 3. – С. 11–13.
3. Якушев, В. В. Информационно-технологические основы прецизионного производства растениеводческой продукции : автореф. дис. ... докт. с.-х. наук : 06.01.03 : защищена 11.12.2013 : утв. 24.04.2014 / В.В. Якушев. – СПб.: АФИ, 2013. – 50 с.
4. Часовских, С. Г. Специализированное программное обеспечение для реализации систем точного земледелия / С.Г. Часовских, Б.А. Телал, В.В. Якушев // Материалы научной сессии Агрофизического института по итогам 2012 г. – СПб: АФИ, 2013. – С. 16–32.
5. О методах агрохимического обследования сельскохозяйственных угодий в точном земледелии / В.П. Якушев [и др.] // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2004. – № 3. – С. 32–34.
6. Буре, В. М. Методология и программно-математический инструментарий информационного обеспечения точного земледелия: автореф. дис. ... докт. техн. наук : 05.13.18 : защищена 23.09.2009 : утв. 22.01.2010 / В.М. Буре. – СПб.: АФИ, 2009. – 49 с.