

# **Геостатистический анализ неоднородностей агрометеорологических факторов продуктивности полей в системе точного земледелия**

## **Geostatistical analysis of agrometeorologic factors heterogeneity of field productivity in precision agriculture**

**Захарян / Zaharyan Y.**

Юрий Гайказович

([office@agophys.ru](mailto:office@agophys.ru))

кандидат технических наук, профессор.

ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»,

ведущий научный сотрудник.

г. Санкт-Петербург

**Ключевые слова:** геостатистика – *geostatistics*; вариограмма – *variogram*; пространственная переменная – *spatial variable*; дифференцированная стратегия – *differentiated strategy*; точное земледелие – *precision agriculture*.

Геостатистический анализ неоднородностей агрометеорологических факторов в системе точного земледелия дал возможность, пользуясь ковариацией в рамках дополнительного предположения о стационарности второго порядка, характеризовать степень похожести данных. Показано, что в ряде случаев существенный экономический выигрыш может быть получен за счет перехода от планирования хозяйственных мероприятий на средние условия к решениям с учетом пространственной статистики варьирующих агрометеорологических факторов.

*Geostatistical analysis of agrometeorologic heterogeneity in precision agriculture using the covariance under an additional proposal for a second stationary order made it possible to characterize the degree of data similarity. It is shown that in some cases, substantial economic profit can be obtained by switching from business planning to average conditions for solutions based on spatial statistics varying agrometeorological factors.*

### **Введение**

Геостатистические подходы показывают, что различные агрометеорологические факторы, влияющие на рост и развитие растений и определяющие особенности агроприемов или отдельных агротехнических воздействий, существенно варьируют во времени и в пространстве [1]. Климат – глобальный пространственно-временной процесс, требующий геостатистического обобщения. Геостатистические показатели, интегрирующие проблемные сельскохозяйственные и экологические принципы описания пространственно-временной целостности, необходимы крупному плани-

рованию агротехнологических приемов с учетом варьирующих почвенно-климатических факторов.

В глобализирующемся действительности возрастает важность проведения фундаментальных научных исследований по развитию геостатистической науки и практики на базе новых источников информации. Экономическая статистика еще не полностью выполняет аналитическую функцию – не располагает комплексом интегральных показателей на локальном, региональном и глобальном уровнях организации геоэкономического пространства для эффективного планирования стратегических решений агротехнологических воздействий. Геостатистика является мощным орудием познания и анализа пространственно-временных особенностей реального глобального мира, которое упорядочивает изменчивости почвенно-климатических элементов.

### **Методические аспекты, проблемы, объекты**

Геостатистический анализ неоднородности агрометеорологии в системе точного земледелия (ТЗ) включает достаточно широкий набор методов интерполяции, которые можно объединить в две группы: детерминированные и геостатистические.

Детерминированные методы интерполяции базируются на известных значениях в отдельных точках.

Предметом анализа геостатистики в сельском хозяйстве является учет пространственной изменчивости почвенно-климатических характеристик или регионализованная вариабельность. В качестве примера можно привести количество осадков, плотность микроэлементов, температуру в некоторой географической области.

Методика изучения геостатистического анализа пространственной неоднородности сельскохозяйственных территорий, оценки ее влияния на урожай и экономической эффективности агротехнических мероприятий в системе ТЗ включает в себя несколько аспектов, которые показаны на рис. 1. Этот рисунок одновременно иллюстрирует информационную связь

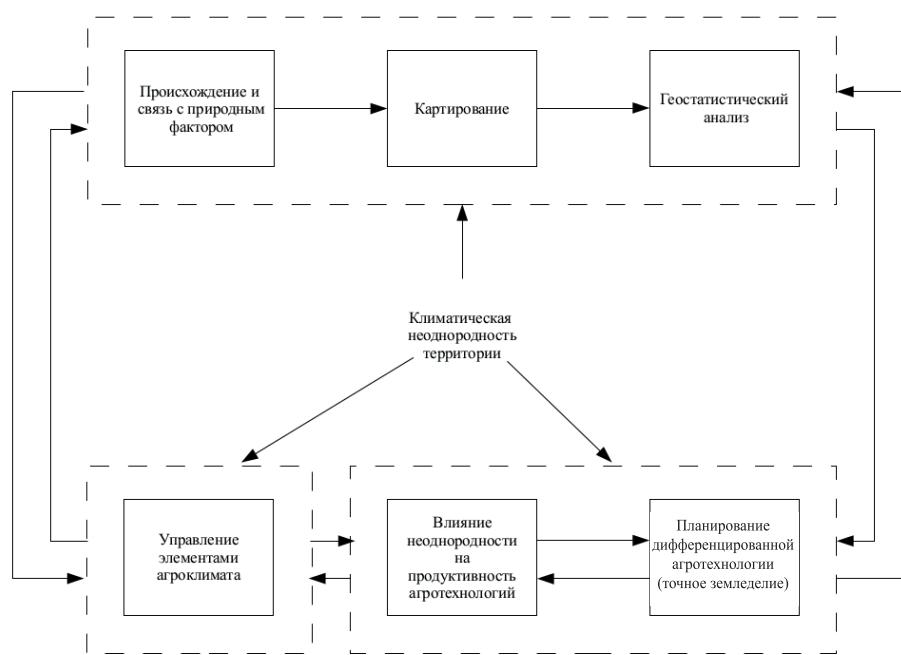


Рис. 1. Геостатистическое описание неоднородности

между отдельными направлениями исследования и указывает их место и роль в общей проблеме влияния климатической неоднородности на урожай.

В рассматриваемой многоплановой и сложной области могут быть выделены следующие основные стороны, составляющие ее содержание:

- Микроклиматическое и почвенно-карографическое представление результатов геостатистического исследования для принятия управленческих решений. Построение территориальных комплексных карт.

- Влияние природы наблюдаемой пространственной изменчивости агрометеорологических и почвенных параметров, установление их зависимости от различных причинообуславливающих факторов, например от особенностей рельефа местности и ландшафтных характеристик.

- Геостатистический анализ пестроты территории.
- Статистический анализ пространственного варьирования отдельных агрометеорологических показателей.

- Изучение влияния неоднородности сельскохозяйственных территорий на урожай и эффективность отдельных агротехнических мероприятий с учетом геостатистического подхода.

- Принятие решений по оптимизации принимаемых агроприемов и обобщенный учет дифференциации агротехнологии в соответствии с пространственным варьированием тех или иных агрометеорологических факторов [9].

Первые три аспекта рассматриваемой проблемы относятся к области изучения и описания пространственной неоднородности сельскохозяйственных территорий [5, 6]; четвертый касается управления неоднородностью агрометеоусловий с целью ее выравнивания.

И.П. Сердобольским [7, 8] и позже другими авторами была выявлена значительная пространственная изменчивость химических свойств солонцовых почв. В ряде работ изучались закономерности пространственного варьирования кислотности, содержания фосфора, калия, обменного кальция и других элементов [3]. В частности, в последнем исследовании, выполненном на черноземных почвах Воронежской области, на участке 0,25 га содержание азота в пахотном горизонте варьировало в пределах от 14 до 20 мг на 100 г почвы, и коэффициент варьирования составлял около 20%. Еще большая изменчивость наблюдалась по магнию, для которого коэффициент вариации превосходил 30%.

Геостатистика по французскому математику Ж. Матерону отличается от математической статистики тем, что там варьирующий фактор – не случайная величина, а пространственная переменная, свойства которой при известных условиях могут быть описаны при помощи вариограмм.

Вариограмма – статистический момент второго порядка, использующийся в геостатистике для анализа и моделирования пространственной корреляции. Полувариограмма (semivariogram) или просто вариограмма – для значений пространственной переменной в двух точках [2] или вариация разницы значений переменной между выбранной парой точек как функция расстояния и направлена между ними.

## Результаты и обсуждение

Для обсуждения конкретных результатов при переходе планирования агротехнических решений с ориентацией не на усредненные значения пространственно-

варьирующего фактора, а на характер этой изменчивости, ограничимся в дальнейшем рассмотрением только непрерывного случая. В частности, будем считать, что геостатистические закономерности пространственной изменчивости  $x$  хорошо аппроксимируются нормальным законом распределения, т.е.:

$$g(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma_x^2}}$$

где  $\bar{x}$  – среднее значение  $x$ , а  $\sigma_x$  – среднее квадратичное отклонение  $x$ , оба эти параметра считаются известными.

Для оценки эффективности при дифференцированных агротехнологиях будем использовать полученные ранее следующие соотношения [5]:

$$U_g = (C_y - \frac{C_d}{b})y_{\max} + \frac{C_d}{b}l\bar{x}$$

где  $U_g$  – эффективность при дифференцированных агроприемах,  $C_y$  – стоимость урожая,  $C_d$  – стоимость затрат на агроприемы,  $b$  – коэффициент, скорость возрастания урожая,  $l$  – коэффициент, определяющий зависимость урожая от варьирующего фактора  $x$ .

$$\Delta U_1 = C_y(1+\eta) \frac{l\sigma_x}{\sqrt{2\pi}} \quad (1)$$

где  $\Delta U_1$  – выигрыш при переходе от среднего  $\bar{x}$  к дифференциированной стратегии агротехнологий,

$$\eta = \frac{b'}{b},$$

$b'$  – скорость падения урожая в области превышения оптимума управляющего воздействия,  $b$  – коэффициент, характеризующий скорость возрастания урожая с ростом интенсивности проводимых агротехнических мероприятий (увеличением дозы вносимого удобрения). Характеризующий выигрыш  $\Delta U_2$ , который теоретически может быть получен за счет перехода от ориентации на средние условия к оптимальной недифференцированной стратегии, выбираемой с учетом статистических закономерностей пространственного варьирования  $x$ , определяется выражением (2).

Отметим, что для нахождения такой стратегии и для ее реализации нет необходимости знать значения  $x$  в отдельных точках рассматриваемой неоднородной территории – достаточно иметь лишь сведения о законе распределения  $x$  как пространственно варьирующей величины.

$$\Delta U_2 = C_y l \sigma_x (1+\eta) \left[ \frac{1}{\sqrt{2\pi}} - \phi(t_0) \right] \quad (2)$$

где  $t_0 = (a_0 - \bar{x}) / \sigma_x$  – корень уравнения

$$\phi(t) = \frac{\mu + \eta}{1 + \eta} - \frac{1}{2} \quad (3)$$

из уравнения (3) при выполнении соотношения следует, что значение параметра  $\mu = \frac{1-\eta}{2}$ ,

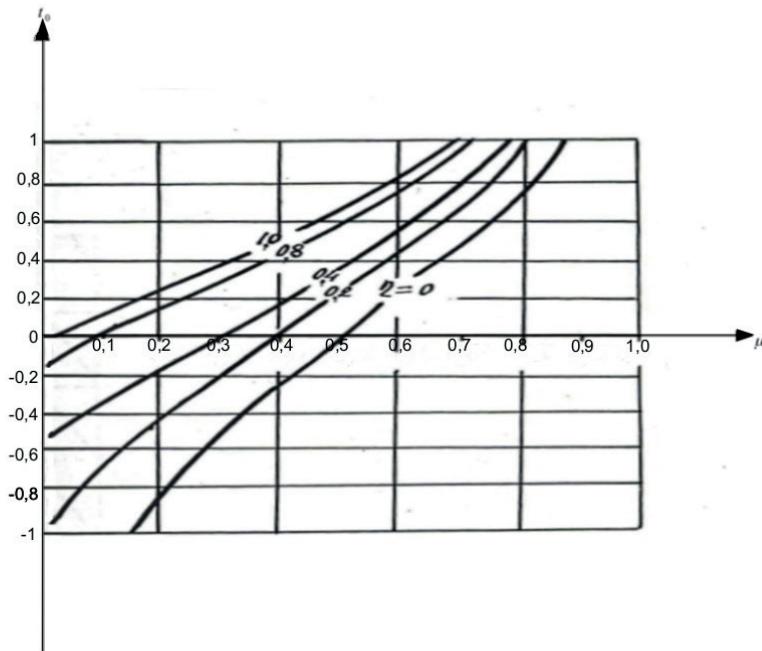


Рис. 2. Зависимость параметра  $t_0 = (a_0 - \bar{x}) / \sigma_x$  от показателей  $\mu$  и  $\eta$

$\Phi$  – стандартная нормальная плотность, определяемая функцией

$$\phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}}$$

На рис. 2 изображено семейство кривых, иллюстрирующих зависимость параметра сдвига  $t_0 = (a_0 - \bar{x}) / \sigma_x$  от  $\mu$  при разных  $\eta$ . Оптимальную недифференцированную стратегию имеет смысл использовать, когда  $t_0$  значительно отличается от 0. В частности, как следует из уравнения (3), при выполнении соотношения величина  $t_0$  оказывается равной нулю и  $a_0 = \bar{x}$ . Таким образом, при условии

$$\mu = \frac{1 - \eta}{2}$$

не существует вообще никакой недифференцированной агротехнологии, которая была бы предпочтительнее, чем ориентация на средние условия. Единственной возможностью компенсации отрицательного влияния неоднородности является в данном случае пространственная дифференциация агротехнических мероприятий.

Проанализировав полученные результаты, легко убедиться, что средний на единицу площади эффект  $U_g$  при дифференциации решений по конкретным значениям пространственно варьирующего агрометеорологического фактора  $x$  совпадает с величиной  $U_{Hg}$  (эффективность при недифференцированной стратегии, т.е.  $x = \bar{x}$ ), которую мы получили бы, если бы фактор  $x$  не менялся и во всех точках рассматриваемой территории был бы равен  $\bar{x}$ .

Второе интересное обстоятельство состоит в том, что выигрыш, который получается при переходе от ориентации на средние условия  $\bar{x}$  к дифференцированной стратегии, т.е. величина  $\Delta U_l$  оказывается тем больше, чем больше параметр  $\eta$ . Иными словами, при наличии участка снижения продуктивности, отвечающего «избыточному» управляемому воздействию, эффект от дифференциации будет выше, чем при отсутствии такого участка.

## Заключение

Согласно полученным результатам, с точки зрения пространственной статистики [4], легко убедиться, что в рассматриваемой модели неоднородность территории влияет только на потери продуктивности, что хорошо видно из формулы (1), а также подтверждает рис. 2, где изображено семейство кривых, иллюстрирующих зависимость  $t_0$  от  $\mu$  при разных  $\eta$ , что есть целесообразность перехода к точному земледелию. Нет сомнения, что потенциальная эффективность (теоретически достижимая) точного земледелия при вариабельности пространственно-временного фактора, разумеется, возрастает.

Интересное обстоятельство состоит в том, что выигрыш  $\Delta U_l$ , который получается при переходе от ориентации

на средние условия  $\bar{x}$  к дифференцированной стратегии агротехнологических решений, т.е. величина  $\Delta U_l$  оказывается тем больше, чем больше параметр  $\eta$ .

## Литература

1. Journal, A.G. Mining Geostatistics / A.G. Journal, Ch.J. Huijbregts. – Acad. Press, London, UK, 1978. – 600 p.
2. Геостатистика: теория и практика / В.В. Демьянов, Е.А. Савельева ; под ред. Арутюняна Р.В. – М: Наука, 2010. – 327 с.
3. Дмитриев, Е.А. Об использовании теории случайных функций при изучении почвенного покрова / Е.А. Дмитриев, В.П. Самсонова, В.А. Рожков // Вестник МГУ. Сер. биол., почвоведение. – 1974. – № 3. – С. 43–53.
4. Статистический анализ случайных процессов в приложении к агрофизике и агрометеорологии / Жуковский Е.Е. [и др.]. – Л: Гидрометеоиздат, 1978. – 408 с.
5. Закарян, Ю.А. Об учете пространственной неоднородности характеристик сельскохозяйственных полей при планировании агротехнологии / Ю.А. Закарян, Е.Е. Жуковский // Научно-техн. бюл. по агроном. физике «Агрометеорологические аспекты программирования урожая». – 1984. – № 58. – С. 20–24.
6. Захарян, Ю.Г. Методика выделения технологических контуров полей в системах точного земледелия / Ю.Г. Захарян, И.Б. Усков // Физические, химические и климатические факторы продуктивности полей. – СПб.: АФИ, 2007. – С. 295–305.
7. Зданевич, И.И. Исследование статистической структуры влажности полей для автоматизации полива почвы в теплицах / И.И. Зданевич // Сборник докл. ВАСХНИЛ. – 1974. – № 9. – С. 45–46.
8. Сердобольский, И.П. Варьирование химических свойств компонентов солонцового комплекса почв / И.П. Сердобольский // Труды комиссии по ирригации АН СССР. – М., Вып. 9, 1937. – С. 31–194.
9. О методах агрохимического обследования сельскохозяйственных угодий в точном земледелии / В.П. Якушев [и др.] // Вестн. РАСХН. – 2004. – № 3. – С. 32–34.