

## Применение методов геостатистики для анализа целесообразности перехода к технологиям дифференцированного внесения агрохимикатов\*

*В. П. Якушев<sup>1</sup>, В. М. Буре<sup>1,2</sup>, О. А. Митрофанова<sup>1,2</sup>, Е. П. Митрофанов<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Агрофизический научно-исследовательский институт, Российская Федерация, 195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., 14

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

**Для цитирования:** *Якушев В. П., Буре В. М., Митрофанова О. А., Митрофанов Е. П.* Применение методов геостатистики для анализа целесообразности перехода к технологиям дифференцированного внесения агрохимикатов // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2020. Т. 16. Вып. 1. С. 31–40. <https://doi.org/10.21638/11702/spbu10.2020.103>

В последние годы особенно актуальными и перспективными представляются задачи точного земледелия, в том числе и технологии дифференцированного внесения агрохимикатов, позволяющие существенно экономить ресурсы, увеличивать урожайность и качество продукции, при этом снижая вредное воздействие на окружающую среду. Однако для каждой конкретной сельскохозяйственной территории необходима оценка перспективности перехода к таким технологиям, не всегда она будет оправдана. В работе предлагается метод решения этой задачи, основанный на применении вариограммного анализа. В основе идеи лежит геостатистическая модель неоднородности территории, где пространственная вариабельность исследуемого параметра  $Z$  представляется в виде суммы трех составляющих:  $m$  — макрокомпонента, отражающая глобальные пространственные вариации параметра, вызванные, например, особенностями ландшафта;  $s$  — мезокомпонента, описывающая изменчивость параметра в пределах масштаба сельскохозяйственного поля;  $\varepsilon$  — микрокомпонента, характеризующая случайную микромасштабную вариабельность параметра. Предполагается, что для эффективности перехода к дифференцированному внесению агрохимикатов на конкретной сельскохозяйственной территории необходимо, чтобы внутриполевое варьирование агроэкологических показателей вносило существенный вклад в общую картину неоднородности поля. Также приведен вычислительный эксперимент, демонстрирующий работоспособность предложенного метода, с использованием аэрофотоснимков, ГИС-программ и языка программирования R.

*Ключевые слова:* вариограммный анализ, точное земледелие, прецизионные технологии, геостатистическая модель.

**1. Введение.** Дифференцированное внесение агрохимикатов является одним из основных направлений точного земледелия, позволяющего существенно экономить ресурсы, снижать вредное воздействие на почвенные характеристики, обеспечивая увеличение урожайности и качества продукции [1–3]. Данная задача относится к актуальным и перспективным направлениям цифровизации сельского хозяйства. Дифференциация заключается в определении потребности растений в агрохимикатах на каждом элементарном участке сельскохозяйственного поля, при этом площадь такого участка устанавливается исходя из технических характеристик разбрасывающей техники [4].

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 19-29-05184 мк).

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2020

В последние годы проводили исследования, связанные с оценкой перспективности перехода к технологиям точного земледелия на конкретной сельскохозяйственной территории [5, 6]. В Агрофизическом научно-исследовательском институте (АФИ) для решения этой задачи предлагается воспользоваться методами геостатистики на основе данных дистанционного зондирования [7].

**2. Объекты и методы.** Исходными данными рассматриваемой задачи служили карты вегетационного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) сельскохозяйственного поля, полученные с помощью аэрофотоснимков в ближнем инфракрасном и видимом диапазонах. Для анализа применяется случайный набор точек  $Z(x_i)$  — значения индекса NDVI, необходимо оценить перспективность перехода к технологиям дифференцированного внесения агрохимикатов на конкретной сельскохозяйственной территории. Для решения задачи предлагается использовать методы геостатистики.

В основе задачи рассматривается геостатистическая модель неоднородности территории. Пространственная вариабельность исследуемого параметра  $Z$  на заданной территории представляется в виде суммы трех составляющих [7]:

$$z(\mathbf{r}) = m(\mathbf{r}) + s(\mathbf{r}) + \varepsilon(\mathbf{r}), \quad (1)$$

где  $z(\mathbf{r})$  — поле экспериментальных значений параметра  $Z$  радиуса-вектора  $\mathbf{r}$ ;  $m = m(\mathbf{r})$  — макрокомпонента, которая отражает глобальные пространственные вариации параметра, вызванные, например, особенностями ландшафта;  $s = s(\mathbf{r})$  — мезокомпонента, которая описывает изменчивость параметра в пределах масштаба сельскохозяйственного поля;  $\varepsilon = \varepsilon(\mathbf{r})$  — микрокомпонента, которая характеризует случайную микромасштабную вариабельность параметра. Микрокомпонента по сути отражает пространственно некоррелированный случайный шум с нулевым средним и неизменной в пределах поля конечной дисперсией, известной в геостатистике как наггет-дисперсия.

Для анализа статистической структуры изучаемого параметра  $Z$  используется вариограмма [8]

$$\gamma(\mathbf{h}) = \frac{1}{2} \text{Var}[Z(x) - Z(x + \mathbf{h})] = \frac{1}{2} E[Z(x) - Z(x + \mathbf{h})]^2,$$

где  $\mathbf{h}$  — вектор расстояния между двумя точками. Для ее оценки применяется экспериментальная вариограмма

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

в которой  $N(\mathbf{h})$  — число пар экспериментальных точек, разделенных вектором  $\mathbf{h}$ . Для упрощения допустим отсутствие анизотропии, т. е. вариограммный анализ будем проводить без учета направления, тогда векторная величина  $\mathbf{h}$  заменяется на ее абсолютное значение  $h = |\mathbf{h}|$ .

На следующем этапе осуществляется построение теоретической модели на основе экспериментальной вариограммы. Приведем основные аппроксимационные модели.

1. Сферическая модель:

$$\gamma(h) = \begin{cases} c_0 + c_1 \left[ \frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right], & 0 \leq h \leq a, \\ c_0 + c_1, & h > a. \end{cases} \quad (2)$$

Следует упомянуть об основных компонентах вариограммы на примере сферической модели: самородок  $c_0$  — величина вариограммы при  $h = 0$ , порог  $c = c_0 + c_1$  — предельное значение вариограммы (если оно достигается), ранг  $a$  — расстояние, на котором оно достигается. Для других аппроксимационных моделей прослеживается аналогия.

2. Экспоненциальная модель:

$$\gamma(h) = c_0 + c_1[1 - e^{-\frac{h}{a}}]. \quad (3)$$

3. Гауссова модель:

$$\gamma(h) = c_0 + c_1[1 - e^{-\frac{h^2}{a^2}}].$$

4. Модель с эффектом дырок (скважинный эффект):

$$\gamma(h) = c_0 + c_1 \left[ 1 - \frac{\sin(h/a)}{h/a} \right].$$

Далее рассмотрим предлагаемый метод, позволяющий осуществить оценку перспективности перехода к технологиям дифференцированного внесения агрохимикатов с помощью аэрофотосъемки, основанный на описанных методах геостатистики.

**3. Результаты и их обсуждение.** Метод базируется на геостатистической модели (1). Для того чтобы переход к дифференцированному внесению агрохимикатов на конкретной сельскохозяйственной территории был эффективен, необходимо, чтобы внутриполевое варьирование агроэкологических показателей вносило существенный вклад в общую картину неоднородности поля.

Представим приводимую методику на примере аппроксимации вариограммы сельскохозяйственного поля сферической моделью (2). Для других моделей аппроксимации все расчеты проводятся по аналогии.

Разделим обе части выражения (2) на  $c$ , тем самым осуществив переход от абсолютных значений вариограммы  $\gamma(h)$  к нормированной полудисперсии  $\nu(\mu)$ :

$$\nu(\mu) = \begin{cases} \xi + (1 - \xi)T(\mu), & 0 \leq \mu \leq 1, \\ 1, & \mu > 1, \end{cases}$$

где  $\xi = c_0/c$  — относительная нагетт-дисперсия;  $\mu = h/a$  — расстояние, выраженное в единицах ранга  $a$ ;  $T(\mu)$  — полином, определяемый равенством

$$T(\mu) = \frac{3}{2}\mu - \frac{1}{2}\mu^3.$$

В данном случае  $\mu$  можно условно назвать масштабом поля, который зависит не только от физических размеров поля, но и от особенностей статистической структуры исследуемого параметра (а именно от ранга  $a$ ). При этом в качестве  $h$  здесь выступает не шаг построений, а характерный размер конкретного поля, которому соответствует максимальная величина расстояния между двумя экспериментальными точками.

Введем еще один важный показатель:

$$\theta = \frac{c_0}{\gamma}(h) = \frac{\xi}{\nu}(\mu), \quad (4)$$

характеризующий долю случайной микрокомпоненты в суммарной изменчивости варьирующего параметра в пределах конкретного поля.

Переход к дифференцированному внесению агрохимикатов может быть целесообразен, когда значение нормированной вариограммы  $\nu = \nu(\mu, \xi)$  не слишком мало. Выполнение этого условия гарантирует, что масштабы рассматриваемого поля достаточно велики. Кроме того, эффективность перехода к технологиям точного земледелия на конкретной территории обеспечивается также малой величиной микрокомпоненты  $\varepsilon$ , что эквивалентно малости  $\theta$ .

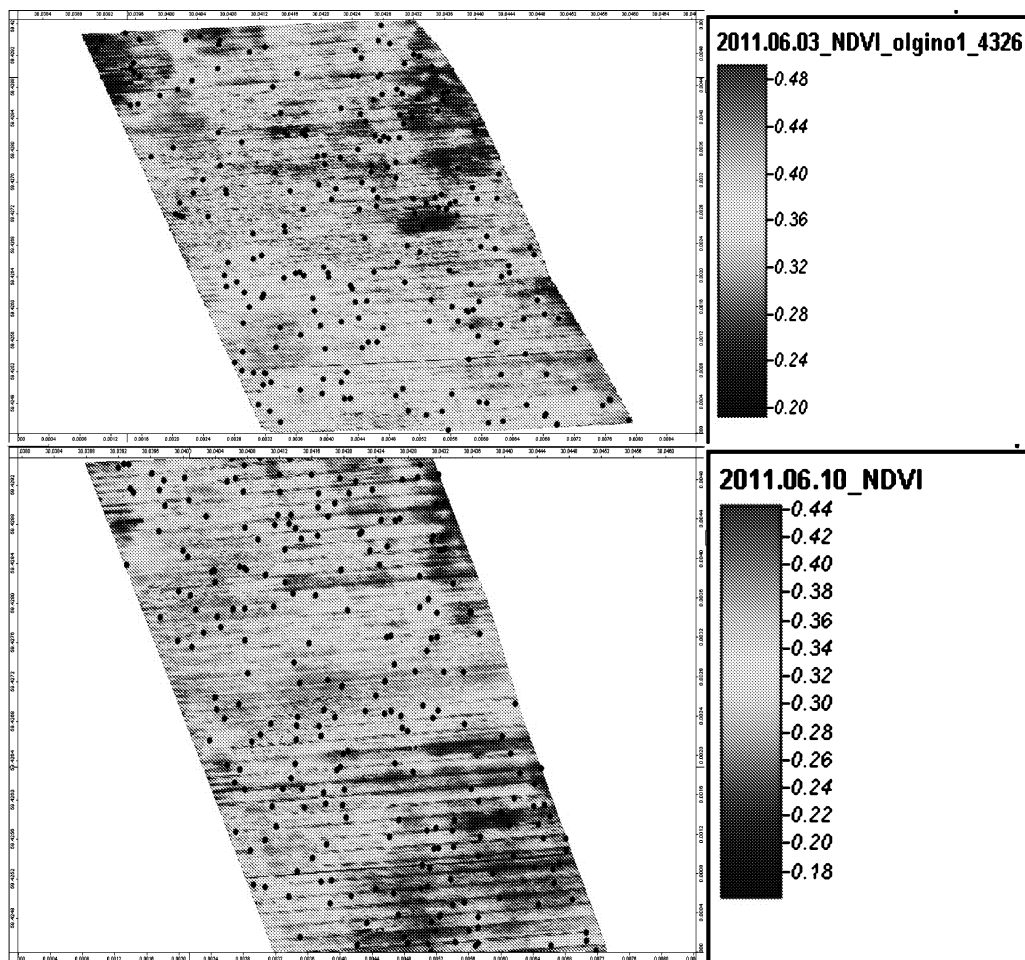
**4. Пример вычислительного эксперимента.** Объектом исследования было выбрано опытное сельскохозяйственное поле № 26, расположенное в филиале АФИ в деревне Меньково Ленинградской обл. (рис. 1). В 2011 г. на этом поле проводился эксперимент по дифференцированному внесению удобрений, выращиваемая культура — пшеница. За весь вегетационный период осуществлялись две подкормки: 7 июня и 1 июля 2011 г. Для подтверждения работоспособности предлагаемого метода целесообразно провести анализ аэрофотоснимков до и после внесения удобрений, который оба раза проводился дифференцированно, так как, очевидно, после внесения агрохимикатов вариабельность характеристик растений на сельскохозяйственной территории снизится и поле станет существенно однороднее. При этом нужно оптимально анализировать первую дату подкормки, когда изменчивость изучаемого параметра наиболее выражена.



Рис. 1. Аэрофотоснимок опытного поля Меньковского филиала АФИ (дата съемки: 10 июня 2011 г.)

В качестве исходных данных были отобраны два набора аэрофотоснимков: даты съемки — 3 и 10 июня 2011 г., съемка проводилась в ближнем инфракрасном и видимом диапазонах с помощью беспилотного радиоуправляемого летательного аппарата самолетного типа. Построение ортофотопланов осуществлялось с помощью

программы Agisoft Photoscan, геопривязка — в программе QGIS, с использованием встроенной SAGA GIS были сгенерированы две карты распределения индекса NDVI на данном поле. Кроме того, в той же программе были получены два набора случайных точек с помощью инструмента Create random points. На рис. 2 приведены построенные карты индекса NDVI для двух дат съемки с отмеченными наборами случайно сгенерированных точек (для первой даты получили набор из 233 точек, для второй — из 242 точек).



*Рис. 2.* Построенные карты распределения NDVI на опытном сельскохозяйственном поле с наборами точек, сгенерированных случайным образом (даты съемок: 3 и 10 июня 2011 г.)

Для каждого набора данных проводился поэтапный анализ с помощью языка программирования R.

В ходе предварительного анализа были выявлены выбросы в данных только для второго набора из 242 точек, которые были устранены отсечением по 2.5%-ным двухсторонним квантилям.

Для первого набора данных оценка линейной корреляции параметра  $Z$  с координатами выявила наличие статистически значимой ненулевой корреляции параметра с обеими координатами (применялась функция `cor.test`, при оценке линейной корреляции переменной  $Z$  с координатой  $X$  величина  $p.value$  составила 0.06, а с координатой  $Y - 4 \cdot 10^{-10}$ ), т. е. исходные данные противоречат условию стационарности математического ожидания  $m(x)$ . В связи с этим было выполнено ее преобразование к некоторой новой переменной, удовлетворяющей необходимым условиям геостатистики, для чего была построена модель тренда  $\hat{m}(x)$  методом множественной регрессии. Затем были получены остатки путем вычитания модельных значений из экспериментальных данных, дальнейшие методы анализа применялись не к самой переменной  $Z$ , а к остаткам.

Для второго набора данных оценка линейной корреляции параметра  $Z$  с координатами также выявила наличие статистически значимой ненулевой корреляции параметра с обеими координатами (при оценке линейной корреляции переменной  $Z$  с координатой  $X$  величина  $p.value$  составила  $2 \cdot 10^{-18}$ , а с координатой  $Y - 6 \cdot 10^{-6}$ ), в связи с чем были проведены аналогичные преобразования данных.

Для выбора величины шагов и их количества для дальнейшего получения экспериментальной вариограммы были построены гистограммы расстояний для каждого набора данных (рис. 3).

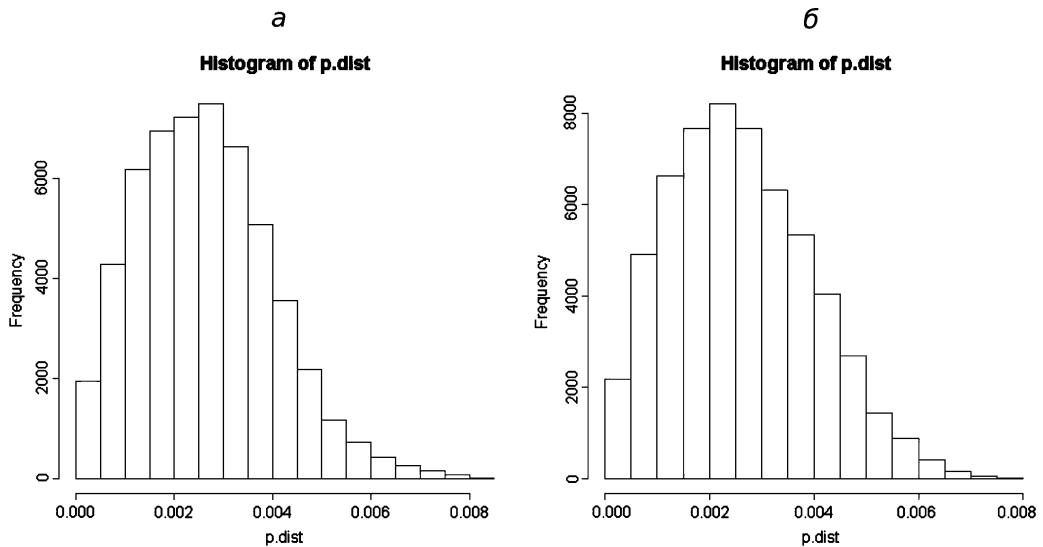


Рис. 3. Гистограммы расстояний для двух наборов данных, соответствующих съемкам 3 (а) и 10 (б) июня 2011 г.

В результате были построены экспериментальные вариограммы по 4 направлениям для каждого набора данных. В обоих случаях присутствует эффект самородков, анизотропия отсутствует. Для аппроксимации выбрана наиболее близкая экспоненциальная модель (3). На рис. 4 показаны наложения теоретических моделей на экспериментальные вариограммы для двух наборов данных. Параметры полученных вариограмм для каждого набора экспериментальных точек представлены в табл. 1.

Так как в рассматриваемом примере для аппроксимации экспериментальной вариограммы использована экспоненциальная модель в обоих случаях, то необходимо

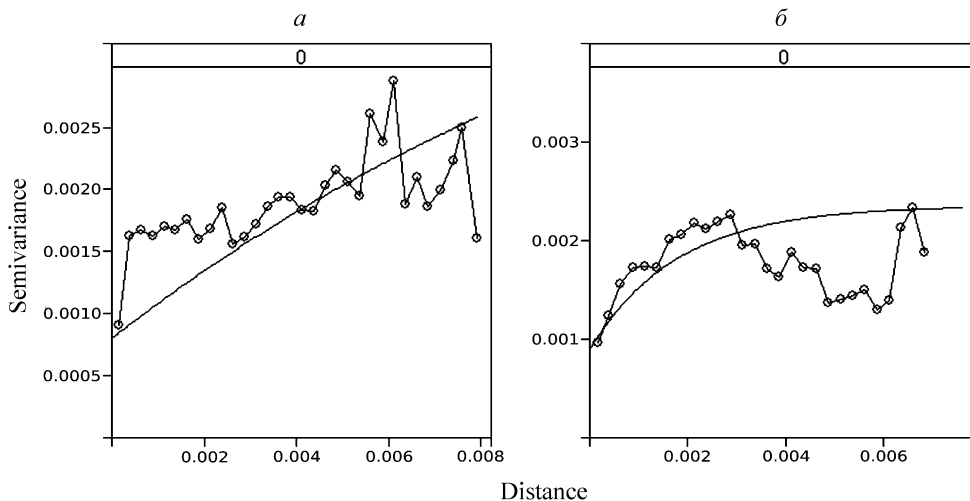


Рис. 4. Результаты построения теоретических моделей с наложением на экспериментальные вариограммы  $a$  — съемка 3 июня 2011 г.;  $b$  — съемка 10 июня 2011 г.

Таблица 1. Параметры построенных вариограмм

Дата съемки	Самородок, $c_0$	$c_1$	Порог, $c$	Ранг, $a$	Наггет-дисперсия, $\xi$
3 июня 2011 г.	0.0008	0.0035	0.0043	0.0148	0.186
10 июня 2011 г.	0.0009	0.00055	0.00145	0.0018	0.62

привести формулу нормированной полудисперсии  $\nu(\mu)$ , как и в случае со сферической моделью, разделив обе части выражения (3) на  $c$ :

$$\nu(\mu) = \xi + (1 - \xi)T(\mu), \quad (5)$$

где  $T(\mu)$  определяется равенством

$$T(\mu) = 1 - e^{-\mu}.$$

Характерный размер исследуемого поля  $h = 0.008$  — безразмерная величина, отражающая максимальное расстояние между десятичными географическими координатами двух экспериментальных точек поля. В дальнейшем для каждого набора данных были рассчитаны значения  $\mu$ ,  $\nu$  и  $\theta$  по формулам (4), (5).

Таблица 2. Результаты расчетов для двух анализируемых наборов данных

Дата съемки	$h$	$\mu$	$\nu$	$\theta$
3 июня 2011 г.	0.008	0.54	0.53	0.35
10 июня 2011 г.	0.008	4.4	0.995	0.623

В табл. 2 приведены результаты проведенных расчетов для двух анализируемых наборов данных. Из нее видно, что значение нормированной вариограммы для второго набора данных близко к единице, потому предполагается, что пространственная неоднородность исследуемой территории на момент съемки 10 июня 2011 г. на 99.5%

определяется внутривариационной изменчивостью и лишь на 0.5% связана с варьированием условий между отдельными полями. Необходимо также сравнить получившиеся значения  $\theta$ . Видно, что до внесения удобрений этот показатель оказался равным 0.35, исходя из чего будем считать, что в данном случае доля случайных вариаций составляет 35%, соответственно оставшиеся 65% могут компенсироваться за счет технологии дифференцированного внесения агрохимикатов. При этом после подкормки такая величина существенно увеличилась и стала равной 0.623. Безусловно, за три дня (от даты подкормки до даты съемки) в полной мере однородность сельскохозяйственной территории не сформируется, однако большая часть полезных веществ растениями будет уже усвоена. Таким образом, полученные оценки полностью соответствуют проведенному эксперименту.

**5. Заключение.** Внедрение технологий дифференцированного внесения агрохимикатов в агропромышленный комплекс России является перспективным и актуальным вопросом. Однако не всегда на конкретной сельскохозяйственной территории применение таких технологий будет оправдано, целесообразность перехода к технологиям точного земледелия нужно оценивать в каждом конкретном случае.

Предложенный метод оценки целесообразности использования дифференцированного внесения агрохимикатов, основанный на традиционных методах геостатистики, позволяет достаточно эффективно решать эту задачу с помощью данных дистанционного зондирования, причем можно применять не только аэрофотосъемку, но и спутниковые изображения. Представленный пример вычислительного эксперимента полностью подтверждает работоспособность рассмотренного метода. Следует отметить, что в дальнейшей работе необходимо создать базу вычислительных экспериментов, позволяющих продемонстрировать возможности описанного метода, а также осуществить его автоматизацию.

## Литература

1. Буре В. М., Канаши Е. В., Митрофанова О. А. Анализ характеристик цвета растений по аэрофотоснимкам с различными факторами качественных показателей // Вестн. С.-Петерб. ун-та. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2017. Т. 13. Вып. 3. С. 278–285.
2. Якушев В. В. Точное земледелие: теория и практика. СПб.: Агрофиз. ин-т, 2016. 364 с.
3. Якушев В. П., Канаши Е. В., Конев А. А., Ковтюх С. Н., Лекомцев П. В., Матвеевко Д. А., Петрушин А. Ф., Якушев В. В., Буре В. М., Русаков Д. В., Осипов Ю. А. Теоретические и методические основы выделения однородных технологических зон для дифференцированного применения средств химизации по оптическим характеристикам посева: практ. пособие. СПб.: Агрофиз. ин-т, 2010. 60 с.
4. Буре В. М., Митрофанов Е. П., Митрофанова О. А., Петрушин А. Ф. Выделение однородных зон сельскохозяйственного поля для закладки опытов с помощью беспилотного летательного аппарата // Вестн. С.-Петерб. ун-та. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2018. Т. 14. Вып. 2. С. 145–150.
5. Afanasyev R. A. Use of the regularities of within-field variability of arable soil fertility in precision agrotechnologies // Science Journal of Volgograd State University. Natural sciences. 2015. Vol. 11. N 1. P. 42–51.
6. Van Meirvenne M. Is the soil variability within the small fields of Flanders structured enough to allow precision agriculture? // Precision Agriculture. 2003. Vol. 4. Iss. 2. P. 193–201.
7. Якушев В. П., Жуковский Е. Е., Петрушин А. Ф., Якушев В. В. Вариограммный анализ пространственной неоднородности сельскохозяйственных полей для целей точного земледелия: метод. пособие. СПб.: Агрофиз. ин-т, 2010. 52 с.
8. Демьянов В. В., Савельева Е. А. Геостатистика: теория и практика. М.: Ин-т проблем безопасности развития атомной энергетики РАН; Наука, 2010. 327 с.

Статья поступила в редакцию 6 января 2020 г.

Статья принята к печати 13 февраля 2020 г.



Контактная информация:

Якушев Виктор Петрович — акад. РАН, д-р с.-х. наук; vyakushev@agrophys.com

Буре Владимир Мансурович — д-р техн. наук, проф.; vlb310154@gmail.com

Митрофанова Ольга Александровна — мл. науч. сотр.; omitrofa@gmail.com

Митрофанов Евгений Павлович — мл. науч. сотр.; mjeka@bk.ru

## The use of geostatistical methods to analyze the transition feasibility to the differential application of agrochemicals technologies\*

V. P. Iakushev<sup>1</sup>, V. M. Bure<sup>1,2</sup>, O. A. Mitrofanova<sup>1,2</sup>, E. P. Mitrofanov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Agrophysical Research Institute, 14, Grazhdanskiy pr., St. Petersburg, 195220, Russian Federation

<sup>2</sup> St. Petersburg State University, 7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

**For citation:** Iakushev V. P., Bure V. M., Mitrofanova O. A., Mitrofanov E. P. The use of geostatistical methods to analyze the transition feasibility to the differential application of agrochemicals technologies. *Vestnik of Saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes*, 2020, vol. 16, iss. 1, pp. 31–40.

<https://doi.org/10.21638/11702/spbu10.2020.103> (In Russian)

In recent years, the tasks of precision farming, including the technology of differential application of agrochemicals, which significantly save resources, increase yield and product quality, while reducing environmental impact, have been particularly relevant and promising. However, for each specific agricultural territory, an assessment of the prospects for the transition to such technologies is necessary; it will not always be justified. The paper proposes a method for solving this problem, based on the use of variogram analysis. The idea is based on a geostatistical model of territory heterogeneity, where the spatial variability of the studied parameter  $Z$  is represented as the sum of three components:  $m$  — macrocomponent reflecting global spatial variations of a parameter caused, for example, by landscape features;  $s$  — mesocomponent that describes the variability of the parameter within the scale of the agricultural field;  $\varepsilon$  — microcomponent characterizing random micro-scale variability of the parameter. It is assumed that for the effectiveness of the transition to the differential application of agrochemicals in a specific agricultural territory, it is necessary that the in-field variation of agroecological indicators make a significant contribution to the overall picture of field heterogeneity. The paper also presents a computational experiment demonstrating the efficiency of the proposed method, using aerial photographs, GIS programs, and the programming language R.

**Keywords:** variogram analysis, precision agriculture, precision technology, geostatistical model.

## References

1. Bure V. M., Kanash E. V., Mitrofanova O. A. Analiz kharakteristik tsveta rastenii po aerofotosnimkam s razlichnymi faktorami kachestvennykh pokazatelei [Analysis of plants color characteristics using aerophotos with different factors of qualitative indicators]. *Vestnik of Saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes*, 2017, vol. 13, iss. 3, pp. 278–285. (In Russian)

---

\* This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant N 19-29-05184 mk).

2. Iakushev V. V. *Tochnoe zemledelie: teoriia i praktika* [Precision agriculture: theory and practice]. Saint Petersburg, Agrophysical Institute Publ., 2016, 364 p. (In Russian)

3. Iakushev V. P., Kanash E. V., Konev A. A., Kovtiukh S. N., Lekomtsev P. V., Matveenko D. A., Petrushin A. F., Iakushev V. V., Bure V. M., Rusakov D. V., Osipov Iu. A. *Teoreticheskie i metodicheskie osnovy vydeleniia odnorodnykh tekhnologicheskikh zon dlia differentsirovannogo primeneniia sredstv khimizatsii po opticheskim kharakteristikam poseva*. Prakt. posobie [Theoretical and methodological foundations for the separation of homogeneous technological zones for the differentiated application of chemicalization means based on the optical characteristics of seeding. Practical allowance]. Saint Petersburg, Agrophysical Institute Publ., 2010, 60 p. (In Russian)

4. Bure V. M., Mitrofanov E. P., Mitrofanova O. A., Petrushin A. F. *Vydelenie odnorodnykh zon sel'skokhoziaistvennogo polia dlia zakladki opytov s pomoshch'iu bespilotnogo letatel'nogo apparata* [Selection of homogeneous zones of agricultural field for laying of experiments using unmanned aerial vehicle]. *Vestnik of Saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes*, 2018, vol. 14, iss. 2, pp. 145–150. (In Russian)

5. Afanasyev R. A. Use of the regularities of within-field variability of arable soil fertility in precision agrotechnologies. *Science Journal of Volgograd State University. Natural sciences*, 2015, vol. 11, no. 1, pp. 42–51.

6. Van Meirvenne M. Is the soil variability within the small fields of flanders structured enough to allow precision agriculture? *Precision Agriculture*, 2003, vol. 4, iss. 2, pp. 193–201.

7. Iakushev V. P., Zhukovskii E. E., Petrushin A. F., Iakushev V. V. *Variogramnyi analiz prostranstvennoi neodnorodnosti sel'skokhoziaistvennykh polei dlia tselei tochnogo zemledelii*. Metodicheskoe posobie [A variogram analysis of the spatial heterogeneity of agricultural fields for precision agriculture. Toolkit]. Saint Petersburg, Agrophysical Institute Publ., 2010, 52 p. (In Russian)

8. Dem'ianov V. V., Savel'eva E. A. *Geostatistika: teoriia i praktika* [Geostatistics: theory and practice]. Moscow, Nuclear safety institute of the Russian Academy of Sciences, Nauka Publ., 2010, 327 p. (In Russian)

Received: January 06, 2020.

Accepted: February 13, 2020.

#### Authors' information:

Viktor P. Iakushev — RAS academician, Dr. Sci. in Agriculture; vyakushev@agrophys.com

Vladimir M. Bure — Dr. Sci. in Technics, Professor; vlb310154@gmail.com

Olga A. Mitrofanova — Junior Researcher; omitrofa@gmail.com

Evgenii P. Mitrofanov — Junior Researcher; mjeka@bk.ru