Оценка внутриполевой изменчивости посевов с помощью вариограммного анализа спутниковых данных для точного земледелия

В. П. Якушев[1], В. М. Буре[1,2], О. А. Митрофанова[1,2], Е. П. Митрофанов[1,2], А. Ф. Петрушин[1], С. Ю. Блохина[1], В. В. Якушев[1]

[1] *Агрофизический научно-исследовательский институт*
Санкт-Петербург, 195220, Россия
E-mails: vyakushev@agrophys.ru, omitrofa@gmail.com, mjeka89@gmail.com
[2] *Санкт-Петербургский государственный университет*
Санкт-Петербург, 199034, Россия

Представлен метод оценки вариабельности параметров посевов на ограниченной сельскохозяйственной территории с применением средств вариограммного анализа спутниковых данных. За основу взята геостатистическая модель неоднородности сельскохозяйственного поля, представляющая показатель внутриполевой изменчивости в виде суммы трёх составляющих: макро-, мезо- и микрокомпонент. При этом предполагается, что при существенном вкладе показателя внутриполевого варьирования в общую картину неоднородности поля наиболее эффективна оценка перехода к технологиям точного земледелия на основании анализа наггет-дисперсии. В работе рассмотрен пример вычислительного эксперимента, в котором исходными данными являются спутниковые снимки Sentinel-2 (уровень обработки L2A, дата съёмки 23.06.2019), охватывающие территорию концерна «Детскосельский» (Ленинградская обл.). По спутниковым данным проведена сравнительная оценка внутриполевой неоднородности двух произвольно выбранных полей хозяйства с помощью предложенного метода для определения перспективности применения прецизионных технологий внесения агрохимикатов на основе данных индекса NDVI. При обработке и анализе данных использовались средства статистического программирования R.

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

Одобрена к печати: 17.02.2020
DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-114-122

Введение

Одним из перспективных и актуальных направлений развития производства растениеводческой продукции в России в последние годы является переход к технологиям точного земледелия. Точное земледелие как концепция управления пространственной и временной изменчивостью урожайности сельскохозяйственных культур и почвенных показателей в пределах поля направлена на повышение рентабельности, оптимизацию урожайности и качества продукции, снижение затрат и экологических воздействий. Преимущества перехода к технологиям точного земледелия продемонстрированы в многочисленных исследованиях, которые подтвердили экономические и экологические выгоды от их применения (Galioto et al., 2017; Godwin et al., 2003; Korotchenya, 2019; Mulla, 2013; Sylvester-Bradley et al., 1999). В ряде работ данный вопрос изучался с учётом вариабельности параметров почвы (Afanasyev et al., 2015; Van Meirvenne, 2003), а также возможностей наземных мобильных информационно-измерительных комплексов, оснащённых навигационным оборудованием и специализированным программным обеспечением, позволяющим автоматизировать процессы обследования сельскохозяйственных полей и выделения на них границ и уровней варьирования агрохимических и агрофизических показателей (Точное..., 2009).

В Агрофизическом научно-исследовательском институте для оценки целесообразности перехода к технологиям точного земледелия на конкретном сельскохозяйственном поле

предлагается наряду с общепринятыми подходами использовать вариограммный анализ спутниковых данных. Вариограммный анализ является эффективным методом, позволяющим охарактеризовать структуру пространственной изменчивости данных. Он широко применяется для анализа пространственной неоднородности значений поверхностного отражения (Balaguer-Beser et al., 2013; Garrigues et al., 2008a, b; Huang et al., 2013; Lausch et al., 2013; Oliveira Silveira et al., 2017; Qiu et al., 2013), улучшения классификации изображений (Balaguer et al., 2010; Powers et al., 2015; Wu et al., 2015; Yue et al., 2013) и обоснования целесообразности дифференциации технологических воздействий (Якушев и др., 2010a).

Необходимо отметить, что использование геостатистических методов анализа спутниковых данных позволит существенно снизить стоимость, а также повысить качество и увеличить масштабы информационного обеспечения технологий точного земледелия.

Объекты и методы

В качестве исходной информации о сельскохозяйственном поле используются данные дистанционного зондирования (спутниковые изображения или аэрофотоснимки). Следует отметить, что рассматриваемый метод также применим к набору данных наземных измерений (агрохимические показатели, результаты лабораторных анализов характеристик посевов и т. п.). То есть допустим, что имеется набор некоторых экологических данных $Z(x_i)$ — оптические показатели, полученные с помощью снимков или наземных измерений. Необходимо оценить целесообразность перехода к технологиям дифференцированного внесения агрохимикатов на конкретной сельскохозяйственной территории (поле, группа полей). Для решения данной задачи предлагается использовать вариограммный анализ.

Для описания статистической структуры исследуемого параметра Z используется полувариограмма (или просто вариограмма) (Демьянов, Савельева, 2010):

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

где $\mathbf{h}$ — вектор расстояния между двумя точками. Вариограмма $\gamma(\mathbf{h})$ оценивается с помощью экспериментальной вариограммы:

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

где $N(\mathbf{h})$ — число пар экспериментальных точек, разделённых вектором $\mathbf{h}$. Для простоты в дальнейшем будем предполагать отсутствие анизотропии (анализ проводится без учёта направления). Соответственно, векторная величина $\mathbf{h}$ заменяется на её абсолютное значение $h = |\mathbf{h}|$.

На *рис. 1* схематично представлен график вариограммы, на котором отображены её основные компоненты: 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.

На следующем этапе вариограммного анализа необходимо на основе полученной экспериментальной вариограммы построить её теоретическую модель. Ниже в качестве примера приведена аппроксимационная сферическая модель:

$$y(h) = \begin{cases} c_0 + c_1\left[\dfrac{3h}{2a} - \dfrac{1}{2}\left(\dfrac{h}{a}\right)^3\right], & 0 \leqslant h \leqslant a, \\ c_0 + c_1, & h > a. \end{cases} \qquad (1)$$

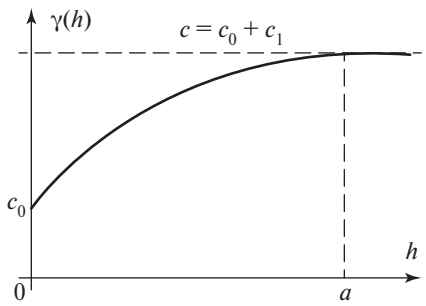

Рис. 1. Основные компоненты вариограммы (сферическая модель)

Следует также кратко упомянуть о геостатистической модели неоднородности территории.

Пространственную вариабельность исследуемого параметра Z на заданном сельскохозяйственном поле можно представить в виде суммы трёх составляющих (Якушев и др., 2010б):

$$z(\mathbf{r}) = m(\mathbf{r}) + s(\mathbf{r}) + \varepsilon(\mathbf{r}), \tag{2}$$

где $z(\mathbf{r})$ — поле точечных значений параметра Z радиус-вектора $\mathbf{r}$. Первая составляющая $m = m(\mathbf{r})$ называется макрокомпонентой, отражающей низкочастотные пространственные изменения параметра, связанные, как правило, с особенностями ландшафта. Вторая составляющая $s = s(\mathbf{r})$ называется мезокомпонентой, описывающей изменчивость параметра в пределах сельскохозяйственного поля. Третья компонента $\varepsilon = \varepsilon(\mathbf{r})$ называется микрокомпонентой, характеризующей случайную микромасштабную вариабельность параметра. Микрокомпонента, по сути, представляет собой пространственно некоррелированный случайный шум с нулевым средним и неизменной в пределах поля конечной дисперсией, известной в геостатистике как наггет-дисперсия.

Далее будет рассмотрен предлагаемый метод оценки целесообразности перехода к технологиям точного земледелия, основанный на использовании средств вариограммного анализа.

Результаты и их обсуждение

В основе метода лежит геостатистическая модель (2). Для того чтобы переход к технологиям прецизионного производства растениеводческой продукции был оправдан, необходимо, чтобы внутриполевое варьирование агроэкологических показателей вносило существенный вклад в общую картину неоднородности конкретной сельскохозяйственной территории. То есть, если выраженная неоднородность на 90 % определяется вариабельностью средних условий на отдельных полях и лишь на 10 % связана с внутриполевой изменчивостью данных условий, применение технологий точного земледелия нецелесообразно.

Продемонстрируем методику оценки перспективности перехода к технологиям точного земледелия в пределах конкретного сельскохозяйственного поля с помощью средств вариограммного анализа на примере аппроксимации вариограммы данного поля сферической моделью (1). Для других моделей аппроксимации все расчёты можно осуществить по аналогии.

Перейдём от абсолютных значений вариограммы $\gamma(h)$ к нормированной полудисперсии $\nu(\mu)$, разделив обе части выражения (1) на c:

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

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

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

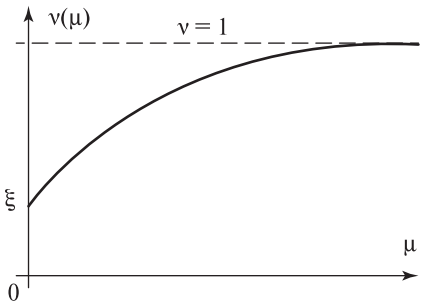

Рис. 2. Общий вид нормированной вариограммы

В данном случае μ можно условно назвать масштабом поля, который зависит не только от его физических размеров, 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 (*рис. 2*).

Введём ещё один важный показатель:

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

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

Переход к технологиям точного земледелия может быть целесообразен, когда значение нормированной вариограммы $\nu = \nu(\mu, \xi)$ не слишком мало. Выполнение данного условия гарантирует, что масштабы рассматриваемого поля достаточно велики, так что основная доля пространственной вариабельности исследуемого параметра в пределах конкретного поля проявляется.

Ещё одним условием, обеспечивающим эффективность перехода к точному земледелию, является малое значение микрокомпоненты ε, что эквивалентно малости величины θ.

Пример вычислительного эксперимента

В качестве исходных данных используется спутниковый снимок Sentinel-2 (уровень обработки L2A, дата съёмки 23.06.2019), охватывающий территорию концерна «Детскосельский» (*рис. 3*). Оценка перспективности перехода к технологиям точного земледелия проведена на основе анализа пространственной вариабельности индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс) на двух произвольно выбранных сельскохозяйственных полях.

Рис. 3. Фрагмент спутникового снимка Sentinel-2 с границами двух произвольно выбранных сельскохозяйственных полей (концерн «Детскосельский», Ленинградская обл., дата съёмки 23.06.2019)

В первую очередь с помощью программы Quantum GIS были построены карты распределения NDVI на двух выбранных сельскохозяйственных полях. При этом использовались спутниковые снимки в 4-м и 8-м каналах, которые соответствуют красному и ближнему инфракрасному спектрам. После этого был выделен необходимый для проведения анализа набор значений NDVI в программе SAGA GIS, представляющий собой случайный набор точек, равномерно распределённых на карте. Для первого поля был получен набор из 255 точек, для второго — из 222 точек (*рис. 4*, см. с. 118).

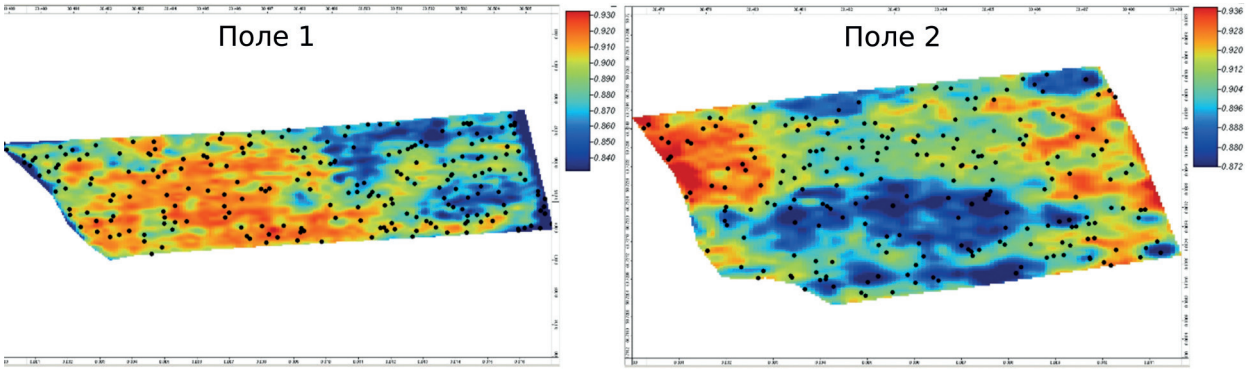

Рис. 4. Пространственное распределение NDVI

После этого был проведён поэтапный анализ каждого набора данных с помощью средств языка программирования *R*. Предварительный анализ в обоих случаях выявил выбросы в данных, которые были успешно исключены. Корреляция исследуемого параметра NDVI с координатами оказалась несущественной. Оба набора данных прошли проверку на выполнение необходимых условий геостатистики. В результате были построены экспериментальные вариограммы по четырём направлениям для каждого набора данных. В обоих случаях присутствует эффект самородков, анизотропия отсутствует. Для аппроксимации выбрана наиболее близкая сферическая модель (1). На *рис. 5* представлены наложения теоретических моделей на экспериментальные вариограммы.

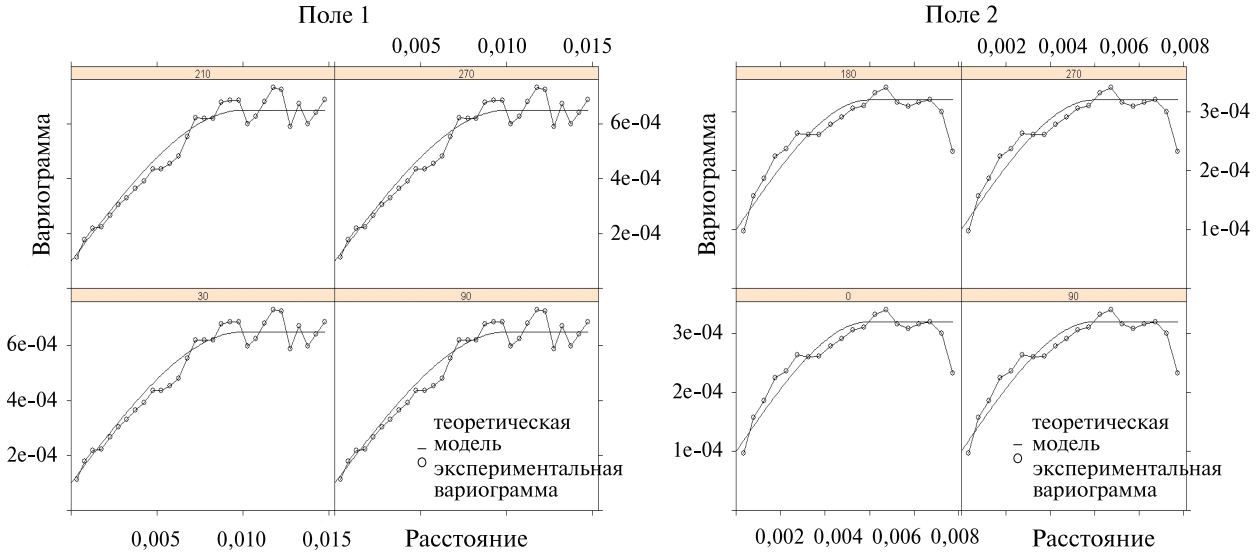

Рис. 5. Результаты построения теоретических моделей

Для первого поля аналитический вид аппроксимации является следующим:

$$\gamma_1(h) = \begin{cases} 0{,}0001 + 0{,}0675h - 225h^3, & 0 \leqslant h \leqslant 0{,}01, \\ 0{,}00055, & h > 0{,}01. \end{cases}$$

Соответственно, для второго поля уравнение теоретической модели принимает вид:

$$\gamma_2(h) = \begin{cases} 0{,}0001 + 0{,}0275h - 254{,}6h^3, & 0 \leqslant h \leqslant 0{,}006, \\ 0{,}00022, & h > 0{,}006. \end{cases}$$

Параметры построенных вариограмм для каждого из выбранных сельскохозяйственных полей представлены в *таблице*.

Параметры построенных вариограмм

Номер поля	c_0 — самородок	c_1	c — порог	a — ранг	ξ — наггет-дисперсия
1	0,0001	0,00045	0,00055	0,01	0,182
2	0,0001	0,00011	0,00022	0,006	0,46

В обоих случаях размеры сельскохозяйственного поля существенно превосходят ранг вариограммных функций исследуемого параметра, из чего можно сделать вывод, что оба поля имеют достаточно большой масштаб μ. Соответственно, тогда $\nu = 1$, и вопрос об эффективности дифференциации агротехнологий может решаться исходя из полученных значений ξ.

Как видно из *таблицы*, для первого поля наггет-дисперсия достаточно мала (0,182). Следовательно, переход к прецизионному производству растениеводческой продукции будет целесообразным. В случае со вторым полем уровень случайной вариабельности исследуемого параметра приближается к 50 % (0,46). Это свидетельствует о том, что переход к технологиям точного земледелия на нём будет менее эффективным, чем на первом поле.

Заключение

Актуальность внедрения технологий точного земледелия в агропромышленный комплекс не подвергается сомнениям. Однако необходима предварительная оценка перспективности перехода к технологиям прецизионного производства растениеводческой продукции на каждом конкретном сельскохозяйственном поле.

Использование вариограммного анализа для определения целесообразности перехода к технологиям точного земледелия является достаточно эффективным методом, позволяющим проводить оценку по данным дистанционного зондирования (в том числе на основе спутниковых снимков из открытого доступа). В связи с этим дальнейшая работа должна быть направлена на создание базы вычислительных экспериментов в рамках предложенного метода, а также на его автоматизацию.

Для автоматизации предложенной методики наиболее оптимальным представляется использование языков программирования R и Python. Уже имеющиеся наработки на языке R можно объединить с широкими графическими возможностями языка Python.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-29-05184-мк «Разработка теоретических основ дистанционной и наземной количественной оценки внутриполевой изменчивости для точного земледелия»).

Литература

1. *Демьянов В. В.*, *Савельева Е. А.* Геостатистика: теория и практика. М.: Наука, 2010. 327 с.
2. Точное сельское хозяйство (Precision Agriculture): учебно-практ. пособие / под ред. Д. Шпаара, А. В. Захаренко, В. П. Якушева. СПб., 2009. 397 с.
3. *Якушев В. П.*, *Жуковский Е. Е.*, *Петрушин А. Ф.*, *Якушев В. В.* (2010а) Вариограммный анализ пространственной неоднородности сельскохозяйственных полей для целей точного земледелия: метод. пособие. СПб.: АФИ, 2010. 52 с.
4. *Якушев В. П.*, *Канаш Е. В.*, *Конев А. А.*, *Ковтюх С. Н.*, *Лекомцев П. В.*, *Матвеенко Д. А.*, *Петрушин А. Ф.*, *Якушев В. В.*, *Буре В. М.*, *Русаков Д. В.*, *Осипов Ю. А.* (2010б) Теоретические и методические основы выделения однородных технологических зон для дифференцированного применения средств химизации по оптическим характеристикам посева: практ. пособие. СПб.: АФИ, 2010. 60 с.
5. *Afanasyev R. A.* Use of the regularities of within-field variability of arable soil fertility in precision agrotechnologies // Science J. Volgograd State University. Natural sciences. 2015. V. 11. No. 1. P. 42–51.

6. *Balaguer A.*, *Ruiz L. A.*, *Hermosilla T.*, *Recio J. A.* Definition of a comprehensive set of texture semivariogram features and their evaluation for object-oriented image classification // Computers and Geosciences. 2010. V. 36. No. 2. P. 231–240.
7. *Balaguer-Beser A.*, *Ruiz L. A.*, *Hermosilla T.*, *Recio J. A.* Using semivariogram indices to analyse heterogeneity in spatial patterns in remotely sensed images // Computers and Geosciences. 2013. V. 50. P. 115–127.
8. *Galioto F.*, *Raggi M.*, *Viaggi D.* Assessing the potential economic viability of precision irrigation: a theoretical analysis and pilot empirical evaluation // Water. 2017. V. 9. No. 12. P. 990–1009.
9. *Garrigues S.*, *Allard D.*, *Baret F.*, *Morisette J.* (2008a) Multivariate quantification of landscape spatial heterogeneity using variogram models // Remote Sensing of Environment. 2008. V. 112. No. 1. P. 216–230.
10. *Garrigues S.*, *Allard D.*, *Baret F.* (2008b) Modeling temporal changes in surface spatial heterogeneity over an agricultural site // Remote Sensing of Environment. 2008. V. 112. No. 2. P. 588–602.
11. *Godwin R. J.*, *Richards T. E.*, *Wood G. A.*, *Welsh J. P.*, *Knight S. M.* An economic analysis of the potential for precision farming in UK cereal production // Biosystems Engineering. 2003. V. 84. Iss. 4. P. 533–545.
12. *Huang Y.*, *Yin X.*, *Ye G.*, *Lin J.*, *Huang R.*, *Wang N.*, *Wang L.*, *Sun Y.* Spatio-temporal variation of landscape heterogeneity under influence of human activities in Xiamen City of China in recent decade // Chinese Geographical Science. 2013. V. 23. No. 2. P. 227–236.
13. *Korotchenya V.* Digital agriculture and agricultural production efficiency: exploring prospects for Russia // Revista ESPACIOS. 2019. V. 40. No. 22. P. 22–35.
14. *Lausch A.*, *Pause M.*, *Doktor D.*, *Preidl S.*, *Schulz K.* Monitoring and assessing of landscape heterogeneity at different scales // Environmental Monitoring and Assessment. 2013. V. 185. No. 11. P. 9419–9434.
15. *Mulla D. J.* Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps // Biosystems Engineering. 2013. V. 114. Iss. 4. P. 358–371.
16. *Oliveira Silveira E. M.*, *Mello J. M.*, *Acerbi F. W. J.*, *Reis A. A.*, *Withey K. D.*, *Ruiz L. A.* Characterizing landscape spatial heterogeneity using semivariogram parameters derived from NDVI images // Cerne. 2017. V. 23. No. 4. P. 413–422.
17. *Powers R. P.*, *Hermosilla T.*, *Coops N. C.*, *Chen G.* Remote sensing and object-based techniques for mapping fine-scale industrial disturbances // Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation. 2015. V. 34. P. 51–57.
18. *Qiu B.*, *Zeng C.*, *Cheng C.*, *Tang Z.*, *Gao J.*, *Sui Y.* Characterizing landscape spatial heterogeneity in multisensor images with variogram models // Chinese Geographical Science. 2013. V. 24. No. 3. P. 1–11.
19. *Sylvester-Bradley R.*, *Lord E.*, *Sparkes D. L.*, *Scott R. K.*, *Wiltshire J. J. J.*, *Orson J.* An analysis of the potential of precision farming in Northern Europe // Soil Use and Management. 1999. V. 15. Iss. 1. P. 1–8.
20. *Van Meirvenne M.* Is the soil variability within the small fields of Flanders structured enough to allow precision agriculture? // Precision Agriculture. 2003. V. 4. Iss. 2. P. 193–201.
21. *Wu X.*, *Peng J.*, *Shan J. E.*, *Cui W.* Evaluation of semivariogram features for object-based image classification // Geo-spatial Information Science. 2015. V. 18. No. 4. P. 159–170.
22. *Yue A.*, *Zhang C.*, *Yang J.*, *Su W.*, *Yun W. E.*, *Zhu D.* Texture extraction for object-oriented classification of high spatial resolution remotely sensed images using a semivariogram // Intern. J. Remote Sensing. 2013. V. 34. No. 11. P. 3736–3759.

Within-field variability estimation based on variogram analysis of satellite data for precision agriculture

V. P. Yakushev[1], V. M. Bure[1,2], O. A. Mitrofanova[1,2], E. P. Mitrofanov[1,2], A. F. Petrushin[1], S. Yu. Blokhina[1], V. V. Yakushev[1]

[1] *Agrophysical Research Institute, Saint Petersburg 195220, Russia*
E-mails: vyakushev@agrophys.ru, omitrofa@gmail.com, mjeka89@gmail.com
[2] *Saint Petersburg State University, Saint Petersburg 199034, Russia*

The method for estimating the variability of canopy parameters in a specific agricultural area based on variogram analysis of satellite data is presented. A geostatistical model of the agricultural field heterogeneity that represents an indicator of within-field variability and consists of a sum of macro-, meso- and micro-components provides the basis of the proposed method. It is assumed that the estimation of the transition to precision agriculture technologies based on the analysis of nugget dispersion

is the most effective when the within-field variation of the indicator has considerable contribution to the general picture of the field heterogeneity. The paper considers an example of a computational experiment in which the initial data are Sentinel-2 satellite images (processing level L2A, survey date 06.23.2019), covering the territory of the Detskoselskiy farm in Leningrad Region. A comparative assessment of the within-field heterogeneity of two randomly selected farm fields was carried out by the proposed method using satellite data to determine the prospects of precision agrochemical application technologies based on NDVI values. Statistical programming language R was used for data processing and analysis.

Keywords: variogram analysis, precision agriculture, within-field heterogeneity, geostatistical model

Accepted: 17.02.2020
DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-114-122

References

1. Dem'yanov V. V., Savel'yeva E. A., *Geostatistika: teoriya i praktika* (Geostatistics: theory and practice), Moscow: Science Publ., 2010, 327 p.
2. *Tochnoe sel'skoe khozyaistvo* (*Precision Agriculture*), D. Shpaar, A. V. Zakharenko, V. P. Yakushev (eds.), Saint Petersburg, 2009, 397 p.
3. Yakushev V. P., Zhukovskii E. E., Petrushin A. F., Yakushev V. V. (2010a), *Variogrammnyi analiz prostranstvennoi neodnorodnosti sel'skokhozyaistvennykh polei dlya tselei tochnogo zemledeliya* (Variogram analysis of the spatial heterogeneity of agricultural fields for precision agriculture), Saint Petersburg: ARI, 2010, 52 p.
4. Yakushev V. P., Kanash E. V., Konev A. A., Kovtyukh S. N., Lekomtsev P. V., Matveenko D. A., Petrushin A. F., Yakushev V. V., Bure V. M., Rusakov D. V., Osipov Yu. A. (2010b), *Teoreticheskie i metodicheskie osnovy vydeleniya odnorodnykh tekhnologicheskikh zon dlya differentsirovannogo primeneniya sredstv khimizatsii po opticheskim kharakteristikam poseva* (Theoretical and methodological bases of the homogeneous technological zone delineation for differentiation of agrochemicals application based on the optical characteristics of crop canopy), Saint Petersburg: Agrofizicheskii institut, 2010, 60 p.
5. Afanasyev R. A., Use of the regularities of within-field variability of arable soil fertility in precision agrotechnologies, *Science J. Volgograd State University. Natural sciences*, 2015, Vol. 11, No. 1, pp. 42–51.
6. Balaguer A., Ruiz L. A., Hermosilla T., Recio J. A., Definition of a comprehensive set of texture semivariogram features and their evaluation for object-oriented image classification, *Computers and Geosciences*, 2010, Vol. 36, No. 2, pp. 231–240.
7. Balaguer-Beser A., Ruiz L. A., Hermosilla T., Recio J. A., Using semivariogram indices to analyse heterogeneity in spatial patterns in remotely sensed images, *Computers and Geosciences*, 2013, Vol. 50, pp. 115–127.
8. Galioto F., Raggi M., Viaggi D., Assessing the potential economic viability of precision irrigation: a theoretical analysis and pilot empirical evaluation, *Water*, 2017, Vol. 9, No. 12, pp. 990–1009.
9. Garrigues S., Allard D., Baret F., Morisette J. (2008), Multivariate quantification of landscape spatial heterogeneity using variogram models, *Remote Sensing of Environment*, 2008, Vol. 112, No 1, pp. 216–230.
10. Garrigues S., Allard D., Baret F. (2008b), Modeling temporal changes in surface spatial heterogeneity over an agricultural site, *Remote Sensing of Environment*, 2008, Vol. 112, No. 2, pp. 588–602.
11. Godwin R. J., Richards T. E., Wood G. A., Welsh J. P., Knight S. M., An economic analysis of the potential for precision farming in UK cereal production, *Biosystems Engineering*, 2003, Vol. 84, Issue 4, pp. 533–545.
12. Huang Y., Yin X., Ye G., Lin J., Huang R., Wang N., Wang L., Sun Y., Spatio-temporal variation of landscape heterogeneity under influence of human activities in Xiamen City of China in recent decade, *Chinese Geographical Science*, 2013, Vol. 23, No. 2, pp. 227–236.
13. Korotchenya V., Digital agriculture and agricultural production efficiency: exploring prospects for Russia, *Revista ESPACIOS*, 2019, Vol. 40, No. 22, pp. 22–35.
14. Lausch A., Pause M., Doktor D., Preidl S., Schulz K., Monitoring and assessing of landscape heterogeneity at different scales, *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, Vol. 185, No. 11, pp. 9419–9434.
15. Mulla D. J., Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps, *Biosystems Engineering*, 2013, Vol. 114, Issue 4, pp. 358–371.
16. Oliveira Silveira E. M., Mello J. M., Acerbi F. W. J., Reis A. A., Withey K. D., Ruiz L. A., Characterizing landscape spatial heterogeneity using semivariogram parameters derived from NDVI images, *Cerne*, 2017, Vol. 23, No. 4, pp. 413–422.
17. Powers R. P., Hermosilla T., Coops N. C., Chen G., Remote sensing and object-based techniques for mapping fine-scale industrial disturbances, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, Vol. 34, pp. 51–57.

18. Qiu B., Zeng C., Cheng C., Tang Z., Gao J., Sui Y., Characterizing landscape spatial heterogeneity in multisensor images with variogram models, *Chinese Geographical Science*, 2013, Vol. 24, No. 3, pp. 1–11.
19. Sylvester-Bradley R., Lord E., Sparkes D. L., Scott R. K., Wiltshire J. J. J., Orson J., An analysis of the potential of precision farming in Northern Europe, *Soil Use and Management*, 1999, Vol. 15, Issue 1, pp. 1–8.
20. Van Meirvenne M., Is the soil variability within the small fields of Flanders structured enough to allow precision agriculture, *Precision Agriculture*, 2003, Vol. 4, Issue 2, pp. 193–201.
21. Wu X., Peng J., Shan J. E., Cui W., Evaluation of semivariogram features for object-based image classification, *Geo-spatial Information Science*, 2015, Vol. 18, No. 4, pp. 159–170.
22. Yue A., Zhang C., Yang J., Su W., Yun W. E., Zhu D., Texture extraction for object-oriented classification of high spatial resolution remotely sensed images using a semivariogram, *Intern. J. Remote Sensing*, 2013, Vol. 34, No. 11, pp. 3736–3759.