Особенности обработки аэрокосмических снимков для оптимизации геостатистических исследований внутриполевой изменчивости в задачах точного земледелия

В. П. Якушев¹, В. М. Буре^{1,2}, О. А. Митрофанова^{1,2}, Е. П. Митрофанов^{1,2}, С. Ю. Блохина¹

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

Благодаря развитию информационных технологий, а также методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) вычислительные возможности и объёмы исходной информации значительно расширяются. Как следствие, возникает проблема обработки аэрокосмических снимков высокого разрешения, связанная с избыточностью данных, поскольку 1 га поля соответствует до 4 млн пикселей. В связи с этим целесообразно предварительно уменьшить и определить оптимальный объём данных снимка высокого разрешения, необходимых для решения задач точного земледелия с целью сокращения времени выполнения вычислений и повышения их эффективности. В работе представлен подход к оценке целесообразности перехода к технологиям прецизионного внесения агрохимикатов, основанный на вариограммном анализе внутриполевой изменчивости оптических характеристик растений. Как показали результаты анализа, при использовании изображения с разрешением 10 см/пиксель целесообразно учитывать только 0,5–1 % от общего числа пикселей (с равномерным распределением точек на снимке). Представленный подход может быть использован для решения других задач с применением геостатистического анализа оптических показателей, рассчитанных по тому или иному набору пикселей в зависимости от пространственного разрешения аэрокосмических снимков.

Ключевые слова: точное земледелие, геостатистика, внутриполевая изменчивость, обработка изображений, избыточность информации, дистанционное зондирование, SAGA GIS

Одобрена к печати: 29.06.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-128-139

Введение

Геостатистический анализ — перспективный инструментарий для решения задач в точном земледелии, позволяющий исследовать внутриполевую пространственную структуру распределения различных параметров почвы и растений. Внутриполевая пространственная неоднородность широко изучается с момента появления точного земледелия (T3). Количественная оценка интенсивности и границ пространственной изменчивости имеет фундаментальное значение для определения факторов, влияющих на урожайность сельскохозяйственных культур. Она основана на различных агрономических критериях, а именно: химических или физических показателях почвы, урожайности растений, обеспеченности растений питательными элементами, водном статусе растений и многих других. Основная задача прецизионного производства сельскохозяйственной продукции — оценить внутриполевую неоднородность полей посредством создания карт-заданий, учитывающих её интенсивность и границы изменчивости, для последующего пространственно-дифференцированного управления. Такие карты главным образом создаются на основе тех агрономических показателей, которые характеризуются относительно более высокой степенью пространственной изменчивости и легче поддаются управлению.

Исследования в области пространственной статистики (геостатистики) берут начало с экспериментов по оценке неоднородности сельскохозяйственных полей (Fairfield, 1938;

Mercer, Hall, 1911). Данные эксперименты были основаны на предположении, что внутриполевую дисперсию (англ. within-field variance) можно разделить на случайные и пространственно-структурированные компоненты. Полученные выводы использовались в дальнейшем как основа для разработки широко используемых пространственных индексов внутриполевой неоднородности (Cambardella et al., 1994; Leroux, Tisseyre, 2019; Pringle et al., 2003; Roudier et al., 2011; Tisseyre, McBratney, 2008). Такие индексы, как Cambardelle index, Opportunity index, или Technical opportunity indexes, получены с применением вариограммы — инструмента, широко используемого в пространственной статистике (Matheron, 1963). Вариограммный анализ является эффективным методом, позволяющим охарактеризовать структуру пространственной изменчивости данных о состоянии почвы или растений (Adjorlolo, Mutanga, 2013; Arshad et al., 2021; Bzdega et al., 2021; Castrignano et al., 2021; Eldeiry, Garcia, 2010; Herrero-Langreo et al., 2019; Shit et al., 2016; Viggiano et al., 2019). Он широко применяется для улучшения классификации изображений (Park, Kyriakidis, 2019; Yue et al., 2013; Wu et al., 2015), пространственной интерполяции характеристик пикселей снимков (Ikuemonisan et al., 2020; Wang et al., 2015; Yang et al., 2019; Zakeri, Mariethoz, 2021), выбора оптимальной схемы отбора проб (Li et al., 2007), а также репрезентативной схемы размещения датчиков на сельскохозяйственном поле, необходимых для проведения мониторинга состояния почвы и формирования опорной информации с целью определения агрофизических характеристик почвы по спутниковым снимкам (Блохин и др., 2020). Данные со спутников (Song et al., 2009), а также с бортовых датчиков, установленных на сельскохозяйственной технике (Acevedo-Opazo et al., 2008; Moral et al., 2010; Roudier et al., 2008) и беспилотных летательных аппаратах (Kim et al., 2019), позволяют очень точно охарактеризовать различные агрономические показатели. Однако при использовании полученных данных возникают новые вопросы, в том числе: как эффективно обрабатывать большие объёмы исходной информации, которые непрерывно увеличиваются? Например, объём информации, формируемой при гиперспектральной съёмке, в пределах одного условного кадра может составлять от 0,4 до ~5,3 Гбайт (Бондур, 2014). Разработка новых методов и алгоритмов обработки изображений, особенно с высоким пространственным разрешением, стала в последнее десятилетие одним из ведущих направлений в области применения данных дистанционного зондирования и их интерпретации в задачах точного земледелия.

В этой связи целью настоящей работы является описание подхода к оценке целесообразности предварительной обработки аэрокосмических снимков посевов в зависимости от их пространственного разрешения для уменьшения объёма исходных данных до оптимального. Апробация разработки осуществлена на примере решения одной из важнейших задач ТЗ, связанной с определением экономически оправданного момента перехода на прецизионные технологии внесения агрохимикатов на основе вариограммного анализа внутриполевой изменчивости оптических характеристик растений.

Объекты и методика исследований

Объектом исследований являлись спутниковые снимки опытных полей полигона Агрофизического научно-исследовательского института (АФИ), полученные с помощью космических аппаратов Sentinel-2A и Landsat-8, а также данные аэрофотосъёмки указанной территории. Соответствующие изображения получались при помощи беспилотной авиационной системы Геоскан-401, оснащённой мультиспектральной камерой RedEdge-MX высокого пространственного разрешения. Для сравнения в *maбл. 1* представлены основные характеристики аппаратуры дистанционного зондирования, а в *maбл. 2* показана связь между пространственным разрешением съёмки местности и количеством пикселей на 1 га изображения. Из *maбл. 2* видно, что при использовании съёмочной аппаратуры высокого разрешения резко возрастает количество пикселей, отображающих отснятую территорию. Как следствие, задача проведения вариограммного анализа по данным таких снимков усложняется из-за большого объёма исходной информации и недостаточной мощности обычных компьютеров. При её решении возникает очевидный вопрос: можно ли уменьшить объём данных снимка до такого, который обеспечит проведение геостатистических исследований при существенном сокращении времени вычислений и сохранении качества полученного результата?

Источник	Номер канала	Название канала	Длина волны, нм	Пространственное разрешение	
Sentinel-2A	1	Побережья и аэрозоли	443,9	60 м	
	2	Синий	496,6	10 м	
	3	Зелёный	560,0	10 м	
	4	Красный	664,5	10 м	
	5	Вегетационный красный край	703,9	20 м	
ſ	6	Вегетационный красный край	740,2	20 м	
	7	Вегетационный красный край	782,5	20 м	
	8	Ближний ИК	835,1	10 м	
-	8a	Ближний ИК	864,8	20 м	
	9	Водяной пар	945,0	60 м	
	10	Облака	1373,5	60 м	
	11	Коротковолновый ИК	1613,7	20 м	
	12	Коротковолновый ИК	2202,4	20 м	
Landsat-8	1	Побережья и аэрозоли	433-453	30 м	
	2	Синий	450-515	30 м	
	3	Зелёный	525-600	30 м	
	4	Красный	630-680	30 м	
	5	Ближний ИК	845-885	30 м	
	6	Ближний ИК	1560-1660	30 м	
	7	Ближний ИК	2100-2300	30 м	
	8	Панхроматический	500-680	15 м	
	9	Перистые облака	1360-1390	30 м	
	10	Дальний ИК	1030-1130	100 м	
	11	Дальний ИК	1150-1250	100 м	
Камера	1	Синий	475	8 см	
RedEdge-MX	2	Зелёный	560	8 см	
	3	Красный	668	8 см	
	4	Красный край	717	8 см	
	5	Ближний ИК	840	8 см	

Таблица 1. Основные характеристики аппаратуры дистанционного зондирования

Примечание: ИК — инфракрасный.

Таблица 2. Зависимость детализации съёмки от пространственного разрешения аппаратуры

Пространственное разрешение	Количество пикселей на участке снимка, соответствующее 1 га			
30 м	11			
15 м	44			
10 м	100			
11 см	826 446			
7 см	2 040 816			
5 см	4 000 000			

Здесь следует отметить, что традиционно при применении методов геостатистики в структуре исходной информации исследователи обычно использовали только данные наземных измерений (наблюдений). Считается, что 100 точек (Oliver, 2010) экспериментальных измерений, распределённых в опыте на площади 2–3 га, является достаточным количеством для вариограммного анализа.

В полевых условиях получение такого объёма данных оказывается трудоёмким и дорогостоящим процессом. Это явилось одной из причин недостаточного использования методов геостатистики в аграрной науке России. Использование данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) существенно повышает потенциал их применения в вариограммном анализе и открывает возможности для обоснования технологий ТЗ. Приведённые в *maбл. 1 и 2* данные свидетельствуют о целесообразности включения всех пикселей при вариограммном анализе спутниковых снимков низкого пространственного разрешения без дополнительной обработки.

Методика обоснования целесообразности предварительного уменьшения объёма данных снимков высокого разрешения базируется на анализе эмпирических вариограмм и их нормированных аппроксимаций, функционально описывающих статистическую структуру варырования агроэкологического параметра на сельскохозяйственном поле и построенных на основе различных объёмов исходных данных конкретного изображения. Ранее было продемонстрировано (Якушев и др., 2009), что целесообразность перехода на технологии ТЗ в каждом конкретном случае зависит от соотношения мезо- и микрокомпонент, характеризующих пространственную изменчивость изучаемого фактора, а также от масштаба поля. Масштаб поля определяется как отношение его фактических размеров к лагу нормированной вариограммной функции. Обычно размер сельскохозяйственного поля существенно превосходит лаг вариограммной функции по какому-либо варьирующемуся показателю. В таком случае вопрос перехода на технологии ТЗ может решаться только на основе значения наггет-дисперсии (Webster, Oliver, 2007), которая определяет долю микрокомпоненты в общей неоднородности сельскохозяйственного поля. Это следует из того, что с увеличением площади поля его неоднородность всё в большей степени определяется мезокомпонентой, в то время как доля микрокомпоненты в общей картине неоднородности постепенно снижается, т.е. чем меньше величина наггет-дисперсии, тем перспективнее изучаемое поле для применения на нём технологий ТЗ. Диапазон изменений относительной наггет-дисперсии варьируется от нуля до единицы. Данное важное следствие используется в предлагаемой методике оценки целесообразности предварительной обработки снимков с целью уменьшения объёма исходной информации до оптимального.

В качестве примера апробации методики, направленной на оценку возможности уменьшения количества пикселей снимка высокого разрешения, рассмотрим уже решённую ранее задачу обоснования применения прецизионных технологий на конкретной сельскохозяйственной территории с помощью вариограммного анализа и наггет-дисперсии. В работе (Якушев и др., 2020) решение данной задачи основано на исследовании пространственной вариабельности сельскохозяйственной территории с помощью нормированной полудисперсии. На примере сферической модели она представляется следующим образом:

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

где μ — масштаб поля, $\mu = h/a$; h — характерный размер сельскохозяйственной территории (максимальное расстояние между двумя точками); a — ранг, расстояние, на котором значение вариограммы достигает предела (порога); ξ — относительная наггет-дисперсия, $\xi = c_0/c$; c_0 — самородок, значение вариограммы при нулевом расстоянии между двумя точками; c — пороговое значение вариограммы; $T(\mu)$ — полином, определяемый равенством:

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

Кроме того, вводится показатель, характеризующий долю случайной микрокомпоненты:

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

где $\gamma(h)$ — значения вариограммы; h — расстояние между двумя точками.

Выводы о целесообразности применения дифференцированной технологии внесения удобрений делаются на основе оценки степени внутриполевого варьирования NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс), определяемой по доле случайной микрокомпоненты и других показателей вариограммного анализа.

В рамках представленной задачи исходной информацией для анализа избыточности данных ДЗЗ являются аэрофотоснимки высокого разрешения, полученные, как было указано выше, с помощью системы Геоскан-401, оснащённой мультиспектральной камерой. Изображения предварительно обрабатываются с использованием программ GeoScan Planner и PhotoScan. Данные для геопривязки передаются во время полёта по радиомодему и регистрируются программой GeoScan Planner. После посадки создаются файлы привязки для дальнейшей обработки в программе PhotoScan. Последующая обработка данных проводится в программе PhotoScan (проверка снимков, выравнивание изображений, построение ортофотоплана и т.п.).

Результаты и их обсуждение

Для повышения эффективности обработки аэрофотоснимка необходимо учитывать не все пиксели изображения, а только сокращённую выборку равномерно распределённых точек. Для получения предварительных выводов проведём эксперимент, позволяющий наглядно сравнить влияние процента пикселей, используемых при расчёте экспериментальной вариограммы. В качестве примера были взяты два ортофотоплана поля № 9 (дата съёмки: 9 июня 2020 г.), расположенного на территории биополигона АФИ в д. Меньково Ленинградской обл., в видимом и ближнем инфракрасном спектрах. На их основе построена карта распределения вегетационного индекса NDVI.



Рис. 1. Карта распределения вегетационного индекса NDVI для выделенного участка опытного поля № 9 (дата съёмки: 9 июня 2020 г.)

Для эксперимента был вырезан участок карты, соответствующий площади 4,825 га (*puc. 1*, см. с. 132). Все построения выполнены с помощью программы SAGA GIS. Общее число пикселей на получившемся снимке составило около 4 млн.



Рис. 2. Экспериментальные вариограммы для обследуемого участка с различным количеством пикселей в качестве исходных наборов данных: a - 100 % пикселей; $\delta - 20 \%$; e - 10 %; e - 5 %; $\partial - 1 \%$; e - 0.5 %; w - 0.1 %; 3 - 0.05 %

Для сравнения были построены экспериментальные вариограммы без учёта анизотропии для различного количества равномерно распределённых точек: 0,05 %; 0,1; 0,5; 1; 5; 10; 20 и 100 % от общего числа пикселей изображения. Следует отметить, что SAGA GIS не позволяет проводить вариограммный анализ в полной мере, здесь она выбрана исключительно из-за простоты использования для демонстрационного примера, однако для решения реальных задач рекомендуется применять экспертный инструментарий (например, язык программирования R). На *рис. 2* (см. с. 133) представлены полученные графики для каждого объёма данных. Как видно из рисунка, при использовании менее 0,1 % пикселей снимка качество построений ухудшается, в связи с чем целесообразно применять набор точек, соответствующих 0,5-1% от их общего числа. Кроме того, для оценки целесообразности перехода к прецизионным технологиям в *табл. 3* представлены результаты построения теоретических моделей. Из таблицы видно, что основные показатели изменяются незначительно в зависимости от объёма исходной информации (значения наггет-дисперсии резко увеличились при использовании 0,05-0,1 % пикселей от общего объёма, однако на общие выводы данное изменение не оказало влияния). Следует отметить, что в данном примере масштаб µ оказался мал, в связи с чем для принятия решения о дифференцированном внесении агрохимикатов анализ целесообразно проводить только на основе наггет-дисперсии. По результатам построений видно, что она не превышает 0,2, исходя из чего предполагается, что доля случайной вариабельности составляет 20%, а остальные 80% можно компенсировать применением прецизионных технологий, однако при этом необходимо учитывать малый масштаб поля. Схожие результаты получены и для других аэрофотоснимков опытных полей с тем же пространственным разрешением. При этом для снимков иного качества необходимо проведение аналогичного анализа.

Объём информации, %	<i>c</i> ₀	С	а	ųų	μ	ν	θ
100	0,0039	0,19181	0,25862	0,02	0,00889	0,033	0,61
20	0,0039	0,158813	0,226924	0,025	0,01014	0,0398	0,628
10	0,0039	0,13097	0,192388	0,0298	0,01196	0,0472	0,631
5	0,0039	0,112753	0,144427	0,0346	0,01593	0,0577	0,60
1	0,00384	0,145009	0,190239	0,0265	0,01209	0,0442	0,60
0,5	0,00377	0,086558	0,109007	0,0436	0,0211	0,0739	0,59
0,1	0,0038	0,0206808	0,0225966	0,184	0,10179	0,3082	0,597
0,05	0,00372	0,0233693	0,0273844	0,159	0,08399	0,2647	0,60

Таблица 3. Параметры построенных вариограмм для обследуемого участка с различным количеством пикселей в качестве исходных наборов данных

Следует отметить, что помимо равномерно распределённого набора данных инструментарий SAGA GIS позволяет построить традиционную сетку наблюдений. На *рис. 3* представлен пример двух наборов точек для той же карты NDVI, где объём данных составил 0,1% от общего числа пикселей, а их распределение реализовано случайно в первом случае и систематизировано во втором случае. Общий алгоритм построения оптимального набора данных с помощью программы SAGA GIS состоит всего из нескольких шагов:

- создание набора точек: "Create random points" случайным равномерным распределением, "Create point grid" — с помощью сетки;
- обрезка shape-файла точек на основе полигона обследуемого участка сельскохозяйственной территории: "Clip points with polygons" (это необходимо в связи с тем, что на предыдущем шаге точки создаются для всей прямоугольной области);
- добавление координат к точкам: "Add coordinates to points";
- добавление значений оптических характеристик к точкам (в представленном примеpe —значений NDVI): "Add grid values to points";
- сохранение результатов: "Save as".



Рис. 3. Пример двух наборов точек, где объём данных составил 0,1 % от общего числа пикселей: случайное равномерное распределение (*слева*) и сетка (*справа*)

В итоге необходимый набор исходной информации будет создан в нескольких форматах (в том числе в табличном), подходящих для последующих вычислений (например, для оценки доли случайной микрокомпоненты), проводимых для принятия решения о дифференцированном внесении удобрений.

Заключение

Предложенный подход позволяет определить оптимальный объём данных снимка сельскохозяйственной территории высокого разрешения, когда при решении задач точного земледелия возникает проблема их избыточности, а также сократить время выполнения расчётов и повысить эффективность вычислений без снижения качества последующего анализа. Как показал проведённый эксперимент, при использовании изображения с разрешением 10 см/пиксель целесообразно учитывать только 0,5–1 % от общего числа пикселей (с равномерным распределением точек на снимке). В работе рассмотрен пример решения задачи оценки целесообразности перехода к технологиям прецизионного внесения агрохимикатов с помощью вариограммного анализа оптических характеристик посевов. Однако следует отметить, что представленный подход может использоваться и в других направлениях, связанных с анализом характеристик пикселей изображения, так как в его рамках учитывается пространственная вариабельность сельскохозяйственного поля. Для снимков с другим разрешением оценка проводится по аналогии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-29-05184).

Литература

- 1. *Блохин Ю. И., Якушев В. В., Блохина С. Ю., Петрушин А. Ф., Митрофанова О.А., Митрофанов Е. П., Двирник А. В.* Современные решения для формирования опорной информации с целью повышения точности определения агрофизических свойств почвы по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 4. С. 164–178. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-164-178.
- 2. *Бондур В. Г.* Современные подходы к обработке больших потоков гиперспектральной и многоспектральной аэрокосмической информации // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 1. С. 4–16.

- 3. *Якушев В. П., Жуковский Е. Е., Якушев В. В.* Вариограммный анализ для обоснования технологий точного земледелия // Вест. РАСХН. 2009. № 3. С. 16–20.
- 4. *Якушев В. П., Буре В. М., Митрофанова О. А., Митрофанов Е. П.* Применение методов геостатистики для анализа целесообразности перехода к технологиям дифференцированного внесения агрохимикатов // Вестн. Санкт-Петербургского ун-та. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2020. Т. 16. № 1. С. 31–40.
- 5. *Acevedo-Opazo C., Tisseyre B., Guillaume S., Ojeda H.* The potential of high spatial resolution information to define within-vineyard zones related to vine water status // Precision Agriculture. 2008. V. 9. No. 5. P. 285–302.
- 6. *Adjorlolo C., Mutanga O.* Integrating remote sensing and geostatistics to estimate woody vegetation in an African savanna // J. Spatial Science. 2013. V. 58. No. 2. P. 305–322.
- 7. *Arshad M., Zhao D., Khongnawang T., Triantafilis J.* A systematic evaluation of multisensor data and multivariate prediction methods for digitally mapping exchangeable cations: A case study in Australian sugarcane field // Geoderma Regional. 2021. V. 25. e00400.
- 8. *Bzdega K., Zarychta A., Urbisz A., Szporak-Wasilewska S., Ludynia M., Fojcik B., Tokarska-Guzik B.* Geostatistical models with the use of hyperspectral data and seasonal variation A new approach for evaluating the risk posed by invasive plants // Ecological Indicators. 2021. V. 121(5). 107204.
- 9. Cambardella C. A., Moorman T. B., Novak J. M., Parkin T. B., Karlen D. L., Turko R. F. Konopka A. E. Fieldscale variability of soil properties in central Iowa soils // Soil Science Society of America J. 1994. V. 58. No. 5. P. 1501–1511.
- Castrignano A., Belmonte A., Antelmi I., Quarto R., Quarto F., Shaddad S., Sion V., Muolo M. R., Ranieri N. A., Gadaleta G., Bartoccetti E., Riefolo C., Ruggieri S., Nigro F. A geostatistical fusion approach using UAV data for probabilistic estimation of Xylella fastidiosa subsp. pauca infection in olive trees // Science of the Total Environment. 2021. V. 52. 141814.
- Eldeiry A. A., Garcia L. A. Comparison of ordinary kriging, regression kriging, and cokriging techniques to estimate soil salinity using LANDSAT images // J. Irrigation and Drainage Engineering. 2010. V. 136. No. 6. P. 355–364.
- 12. *Fairfield S. H.* An empirical law describing heterogeneity in the yield of agricultural crops // J. Agricultural Science. 1938. V. 28. No. 1. P. 1–23.
- 13. *Herrero-Langreo A., Gorretta N., Tisseyre B., Gowen A., Xu J. L., Chaix G., Roger J. M.* Using spatial information for evaluating the quality of prediction maps from hyperspectral images: A geostatistical approach // Analytica Chimica Acta. 2019. V. 1077. P. 116–128.
- 14. *Ikuemonisan F.E.*, *Ozebo V.C.*, *Olatinsu O.B.* Geostatistical evaluation of spatial variability of land subsidence rates in Lagos, Nigeria // Geodesy and Geodynamics. 2020. V. 11. P. 316–327.
- 15. *Kim J., Kim S., Ju C., Son H. I.* Unmanned aerial vehicles in agriculture: a review of perspective of platform, control, and applications // IEEE Access. 2019. V. 7. P. 105100–105115.
- 16. *Leroux C.*, *Tisseyre B.* How to measure and report within-field variability: a review of common indicators and their sensitivity // Precision Agriculture. 2019. V. 20. No. 3. P. 562–590.
- 17. *Li Y., Shi Z., Wu C., Li F., Li H.* Optimised spatial sampling scheme for soil electrical conductivity based on variance quad-tree (VQT) method // Agricultural Sciences in China. 2007. V. 6. No. 12. P. 1463–1471.
- 18. Matheron G. Principles of geostatistics // Economic Geology. 1963. V. 58. No. 8. P. 1246–1266.
- 19. *Mercer W. B.*, *Hall A. D.* The experimental error of field trials // J. Agricultural Science. 1911. V. 4. P. 107–132.
- Moral F.J., Terryn J. M., Da Silva J. M. Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques // Soil and Tillage Research. 2010. V. 106. No. 2. P. 335–343.
- 21. *Oliver M.A.* An overview of geostatistics and precision agriculture // Geostatistical applications for precision agriculture. Netherlands: Springer, 2010. P. 1–34.
- 22. *Park N. W., Kyriakidis P. C.* A geostatistical approach to spatial quality assessment of coarse spatial resolution remote sensing products // J. Sensors. 2019. V. 2019. 7297593.
- 23. *Pringle M.J., McBratney A.B., Whelan B.M., Taylor J.A.* A preliminary approach to assessing the opportunity for site-specific crop management in a field, using yield monitor data // Agricultural Systems. 2003. V. 76. No. 1. P. 273–292.
- 24. *Roudier P., Tisseyre B., Poilve H., Roger J. M.* Management zone delineation using a modified watershed algorithm // Precision Agriculture. 2008. V. 9. No. 5. P. 233–250.
- 25. *Roudier P., Tisseyre B., Poilve H., Roger J. M.* A technical opportunity index adapted to zone-specific management // Precision Agriculture. 2011. V. 12. No. 1. P. 130–145.
- 26. *Shit P.K.*, *Bhunia G.S.*, *Maiti R.* Spatial analysis of soil properties using GIS based geostatistics models // Modeling Earth Systems and Environment. 2016. V. 2. P. 107.
- 27. Song X., Wang J., Huang W., Liu L., Yan G., Pu R. The delineation of agricultural management zones with high resolution remotely sensed data // Precision Agriculture. 2009. V. 10. No. 6. P. 471–487.

- 28. *Tisseyre B.*, *McBratney A. B.* A technical opportunity index based on mathematical morphology for site-specific management: An application to viticulture // Precision Agriculture. 2008. V. 9. No. 1–2. P. 101–113.
- 29. Viggiano M., Busetto L., Cimini D., Di Paola F., Geraldi E., Ranghetti L., Ricciardelli E., Romano F. A new spatial modeling and interpolation approach for high-resolution temperature maps combining reanalysis data and ground measurements // Agricultural and Forest Meteorology. 2019. V. 276–277. 107590.
- 30. *Wang Q., Atkinson P. M., Shi W.* Indicator cokriging-based subpixel mapping without prior spatial structure information // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2015. V. 53. No. 1. P. 309–323.
- 31. Webster R., Oliver M.A. Geostatistics for environmental scientists. 2nd ed. N.Y.: John Wiley and Sons, Ltd, 2007. 330 p. DOI: 10.1002/9780470517277.
- 32. 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.
- 33. *Yang B., Tong S. T. Y., Fan R.* Sharpening land use maps and predicting the trends of land use change using high resolution airbone image: A geostatistical approach // Intern. J. Applied Earth Observation and Geo-information. 2019. V. 79. P. 141–152.
- 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.
- 35. *Zakeri F., Mariethoz G.* A review of geostatistical simulation models applied to satellite remote sensing: Methods and applications // Remote Sensing of Environment. 2021. V. 259. 112381.

The specifics of aerospace image processing to optimize geostatistical approaches to within-field variability estimation in precision agriculture

V. P. Yakushev¹, V. M. Bure^{1,2}, O. A. Mitrofanova^{1,2}, E. P. Mitrofanov^{1,2}, S. Yu. Blokhina¹

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

With the rapid progress in the development of information technologies and methods of remote sensing of the Earth the computational capabilities and the volume of initial information are significantly expanding. As a result, the problem of processing high-resolution aerospace images arises. This problem is associated with data redundancy, when the plot 1 ha corresponds to 4 million pixels. In this regard, it has been proposed to initially reduce and determine the optimal amount of high-resolution image data required to solve the issues of precision agriculture, in order to avoid time-consuming computations and increase the calculation efficiency. The paper presents an approach to assessing the feasibility of the transition to variable-rate agrochemical application technologies. The proposed approach is based on a variogram analysis of the within-field variability of the optical characteristics of plants. The results show, that for the imagery with a resolution of 10 cm per pixel is the most appropriate to take into account only 0.5-1% of the total number of pixels (with a uniform distribution of points in the imagery). The presented approach can be used in other directions related to the geostatistical analysis of optical indicators calculated from a particular set of pixels depending on the spatial resolution of aerospace images.

Keywords: precision agriculture, geostatistics, within-field variability, image processing, information redundancy, remote sensing, SAGA GIS

Accepted: 29.06.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-128-139

References

- 1. Blokhin Yu. I., Yakushev V. V., Blokhina S. Yu., Petrushin A. F., Mitrofanova O. A., Mitrofanov E. P., Dvirnik A. V., New solutions for the reference data formation to improve the accuracy of the agrophysical soil properties determination from satellite data, *Sovremennyie problemy distantsionnogo zondirovaniia Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 4, pp. 164–178 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-164-178.
- 2. Bondur V.G., Up-To-Date Approach for Bulky Flows of Hyperspectral Aerospace Data Processing, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2014, No. 1, pp. 4–16 (in Russian).
- 3. Yakushev V. P., Zhukovskii Ye. Ye., Yakushev V. V., Variogram analysis for motivation of precise agriculture technology, *Vestnik Rossiiskoi akademii sel'skohozyaistvennykh nauk*, 2009, No. 3, pp. 16–20 (in Russian).
- 4. 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 Sankt-Peterburgskogo universiteta*. *Prikladnaya matematika*. *Informatika*. *Protsessy upravleniya*, 2020, Vol. 16, No. 1, pp. 31–40 (in Russian).
- 5. Acevedo-Opazo C., Tisseyre B., Guillaume S., Ojeda H., The potential of high spatial resolution information to define within-vineyard zones related to vine water status, *Precision Agriculture*, 2008, Vol. 9, No. 5, pp. 285–302.
- 6. Adjorlolo C., Mutanga O., Integrating remote sensing and geostatistics to estimate woody vegetation in an African savanna, *J. Spatial Science*, 2013, Vol. 58, No. 2, pp. 305–322.
- 7. Arshad M., Zhao D., Khongnawang T., Triantafilis J., A systematic evaluation of multisensor data and multivariate prediction methods for digitally mapping exchangeable cations: A case study in Australian sugarcane field, *Geoderma Regional*, 2021, Vol. 25, e00400.
- 8. Bzdega K., Zarychta A., Urbisz A., Szporak-Wasilewska S., Ludynia M., Fojcik B., Tokarska-Guzik B., Geostatistical models with the use of hyperspectral data and seasonal variation A new approach for evaluating the risk posed by invasive plants, *Ecological Indicators*, 2021, Vol. 121(5), 107204.
- 9. Cambardella C.A., Moorman T.B., Novak J.M., Parkin T.B., Karlen D.L., Turko R.F., Konopka A.E., Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils, *Soil Science Society of America J.*, 1994, Vol. 58, No. 5, pp. 1501–1511.
- Castrignano A., Belmonte A., Antelmi I., Quarto R., Quarto F., Shaddad S., Sion V., Muolo M. R., Ranieri N. A., Gadaleta G., Bartoccetti E., Riefolo C., Ruggieri S., Nigro F., A geostatistical fusion approach using UAV data for probabilistic estimation of Xylella fastidiosa subsp. pauca infection in olive trees, *Science of the Total Environment*, 2021, Vol. 752, 141814.
- 11. Eldeiry A.A., Garcia L.A., Comparison of ordinary kriging, regression kriging, and cokriging techniques to estimate soil salinity using LANDSAT images, *J. Irrigation and Drainage Engineering*, 2010, Vol. 136, No. 6, pp. 355–364.
- 12. Fairfield S. H., An empirical law describing heterogeneity in the yield of agricultural crops, *J. Agricultural Science*, 1938, Vol. 28, No. 1, pp. 1–23.
- 13. Herrero-Langreo A., Gorretta N., Tisseyre B., Gowen A., Xu J. L., Chaix G., Roger J. M., Using spatial information for evaluating the quality of prediction maps from hyperspectral images: A geostatistical approach, *Analytica Chimica Acta*, 2019, Vol. 1077, pp. 116–128.
- 14. Ikuemonisan F. E., Ozebo V. C., Olatinsu O. B., Geostatistical evaluation of spatial variability of land subsidence rates in Lagos, Nigeria, *Geodesy and Geodynamics*, 2020, Vol. 11, pp. 316–327.
- 15. Kim J., Kim S., Ju C., Son H.I., Unmanned aerial vehicles in agriculture: a review of perspective of platform, control, and applications, *IEEE Access*, 2019, Vol. 7, pp. 105100–105115.
- 16. Leroux C., Tisseyre B., How to measure and report within-field variability: a review of common indicators and their sensitivity, *Precision Agriculture*, 2019, Vol. 20, No. 3, pp. 562–590.
- 17. Li Y., Shi Z., Wu C., Li F., Li H., Optimised spatial sampling scheme for soil electrical conductivity based on variance quad-tree (VQT) method, *Agricultural Sciences in China*, 2007, Vol. 6, Issue 12, pp. 1463–1471.
- 18. Matheron G., Principles of geostatistics, *Economic Geology*, 1963, Vol. 58, No. 8, pp. 1246–1266.
- 19. Mercer W.B., Hall A.D., The experimental error of field trials, *J. Agricultural Science*, 1911, Vol. 4, pp. 107–132.
- 20. Moral F.J., Terryn J. M., Da Silva J. M., Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques, *Soil and Tillage Research*, 2010, Vol. 106, No. 2, pp. 335–343.
- 21. Oliver M.A., An overview of geostatistics and precision agriculture, In: *Geostatistical applications for precision agriculture*, Netherlands: Springer, 2010, pp. 1–34.
- 22. Park N. W., Kyriakidis P. C., A geostatistical approach to spatial quality assessment of coarse spatial resolution remote sensing products, *J. Sensors*, 2019, Vol. 2019, 7297593.
- 23. Pringle M.J., McBratney A.B., Whelan B.M., Taylor J.A., A preliminary approach to assessing the opportunity for site-specific crop management in a field, using yield monitor data, *Agricultural Systems*, 2003, Vol. 76, No. 1, pp. 273–292.

- 24. Roudier P., Tisseyre B., Poilve H., Roger J. M., Management zone delineation using a modified watershed algorithm, *Precision Agriculture*, 2008, Vol. 9, No. 5, pp. 233–250.
- 25. Roudier P., Tisseyre B., Poilve H., Roger J. M., A technical opportunity index adapted to zone-specific management, *Precision Agriculture*, 2011, Vol. 12, No. 1, pp. 130–145.
- 26. Shit P. K., Bhunia G. S., Maiti R., Spatial analysis of soil properties using GIS based geostatistics models, *Modeling Earth Systems and Environment*, 2016, Vol. 2, pp. 107.
- 27. Song X., Wang J., Huang W., Liu L., Yan G., Pu R., The delineation of agricultural management zones with high resolution remotely sensed data, *Precision Agriculture*, 2009, Vol. 10, No. 6, pp. 471–487.
- Tisseyre B., McBratney A. B., A technical opportunity index based on mathematical morphology for site-specific management: An application to viticulture, *Precision Agriculture*, 2008, Vol. 9, No. 1–2, pp. 101–113.
- 29. Viggiano M., Busetto L., Cimini D., Di Paola F., Geraldi E., Ranghetti L., Ricciardelli E., Romano F., A new spatial modeling and interpolation approach for high-resolution temperature maps combining reanalysis data and ground measurements, *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, Vol. 276–277, 107590.
- 30. Wang Q., Atkinson P. M., Shi W., Indicator cokriging-based subpixel mapping without prior spatial structure information, *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 2015, Vol. 53, No. 1, pp. 309–323.
- 31. Webster R., Oliver M.A., *Geostatistics for environmental scientists*, *Second edition*, New York: John Wiley and Sons, Ltd, 2007, 330 p., DOI: 10.1002/9780470517277.
- 32. 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.
- 33. Yang B., Tong S. T. Y., Fan R., Sharpening land use maps and predicting the trends of land use change using high resolution airbone image: A geostatistical approach, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019, Vol. 79, pp. 141–152.
- 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.
- 35. Zakeri F., Mariethoz G., A review of geostatistical simulation models applied to satellite remote sensing: Methods and applications, *Remote Sensing of Environment*, 2021, Vol. 259, 112381.