

Инструментарий для принятия решения о целесообразности применения технологий точного земледелия на основе геостатистического анализа данных дистанционного зондирования

О. А. Митрофанова¹, Е. П. Митрофанов¹, В. П. Якушев¹,
В. В. Якушев¹, В. М. Буре^{1,2}, С. Ю. Блохина¹

¹ *Агрофизический научно-исследовательский институт
Санкт-Петербург, 195220, Россия*

E-mails: o.a.mitrofanova@spbu.ru, sblokhina@agrophys.ru

² *Санкт-Петербургский государственный университет
Санкт-Петербург, 199034, Россия*

Возможность достижения экономической эффективности от внедрения технологий точного земледелия требует разработки прогнозных методов оценки перспективности использования таких технологий с учётом конкретных условий. Авторами предлагается инструментарий, обеспечивающий поддержку метода оценки степени целесообразности применения технологий точного земледелия на заданной сельскохозяйственной территории на основе вариограммного анализа данных дистанционного зондирования. Для принятия решения необходимо исследовать статистические связи пространственного распределения на сельскохозяйственном поле значений исследуемого параметра и оценить степень внутривариационной неоднородности, от которой зависит применение дифференцированных агротехнологических операций. В работе рассматривается один из подходов построения геостатистического модуля для проведения прогнозных вычислительных экспериментов, который позволяет автоматизировать все этапы решения задачи оценки перспективности использования технологий точного земледелия для конкретных почвенно-климатических условий сельхозпроизводителя. Инструментарий разработан с применением специализированного статистического языка программирования R, помимо стандартных использовались библиотеки `gstat`, `e1071`, `lattice`, `sp` и др. Визуализация прототипа осуществлялась на основе пакета `shiny`. В дальнейшем планируется доработка прототипа модуля для внедрения в единый сервис для осуществления анализа разнородных геопространственных данных различными новыми и современными методами с целью принятия управленческих решений.

Ключевые слова: точное земледелие, данные дистанционного зондирования, геостатистика, наггет-дисперсия, геостатистический модуль, R

Одобрена к печати: 16.08.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-71-84

Введение

На протяжении веков сельское хозяйство развивается за счёт внедрения новых технологий для достижения более эффективного управления ресурсами и более высокого уровня урожайности сельскохозяйственных культур. Появление коммуникационных технологий и сенсорных сетей позволило сделать большой шаг вперёд в развитии точного земледелия (ТЗ), обеспечив интеллектуальный и автоматизированный сбор и объединение разнородной информации, мониторинг пространственных данных, поступающих с различных датчиков, агрегатов и систем, давая более полное представление о реальных потребностях хозяйств (Ahmad, Mahdi, 2018; Bullock et al., 2019; Chamara et al., 2022; Singh, Sharma, 2022). Принятие управленческих решений и планирование получили дополнительные возможности для достижения более высоких экономических показателей и снижения антропогенной нагрузки на окружающую среду (Pathmudi et al., 2023). Особое внимание в точном земледелии уделяется анализу пространственной вариативности показателей, влияющих на формирование урожая, которыми можно управлять посредством дифференциации норм технологического

воздействия на посев в пределах отдельного сельскохозяйственного поля (внесение удобрений, пестицидов, мелиорантов).

На первом этапе практической реализации агротехнологий ТЗ проводится исследование пространственного распределения управляемого фактора (например, уровня обеспеченности посевов азотом) с выделением однородных зон на изображении сельскохозяйственного поля с использованием различных математических методов: машинного обучения (Chlingaryan et al., 2018), кластеризации или неконтролируемой классификации (Gavioli et al., 2019), геостатистики (Rodrigues et al., 2020; Yakushev et al., 2020), нейронных сетей (Dong et al., 2020) и др. При этом для анализа применяются как агрохимические показатели отобранных образцов почвы и растений, так и спутниковые снимки (Garg et al., 2022), аэрофотоснимки (Jiang et al., 2021), данные, получаемые сенсорами (Paul et al., 2022) и роботизированной техникой (Yamasaki et al., 2022). На втором этапе на основе полученных результатов осуществляется построение специализированной карты-задания, которая загружается в бортовой компьютер прецизионной сельскохозяйственной машины для дифференцированного внесения необходимого агрохимиката.

Безусловно, внедрение такого подхода с учётом степени и типа специализации сельскохозяйственного производства, экономических составляющих (таких, как первоначальные инвестиционные затраты и время окупаемости), наличия специализированных навыков, необходимых конечному пользователю для полного использования возможностей технологии, является сложной задачей (Kerneckner et al., 2020; Vecchio et al., 2022). Следует также отметить, что в мировом агропромышленном комплексе значительную долю (84 %) составляют небольшие хозяйства с площадью полей менее 2 га (The state..., 2020), их количество достигает 500 млн (Lowder et al., 2016). Для таких хозяйств особенно актуальными становятся вопросы, связанные с обоснованностью применения технологий ТЗ. Несмотря на преимущества и экономические выгоды перехода к дифференциации для крупных хозяйств (Galioto et al., 2017; Vecchio et al., 2022), вопрос перспективности такого подхода для ограниченных сельскохозяйственных территорий с точки зрения затрат ресурсов и прогнозируемой прибыли является предметом исследования (Budzko, Medennikov, 2021; Loures et al., 2020; Mizik, 2023).

В Агрофизическом научно-исследовательском институте (НИИ) разрабатываются методы оценки целесообразности использования дифференцированного подхода к внесению агрохимикатов в контексте внутрислоевой пространственной структуры распределения управляемых факторов для конкретной сельскохозяйственной территории (Якушев и др., 2020). Действительно, даже при условии экономической обоснованности перехода к таким агротехнологиям возможно недостижение прогнозируемой эффективности ввиду высокого уровня случайной изменчивости параметра, на который управляющие воздействия не оказывают существенного влияния. Хорошо изученным и перспективным методом решения этой задачи представляется вариограммный анализ. Вычислительные эксперименты на основе данных дистанционного зондирования (ДЗ) подтвердили, что оценка величины нагетт-дисперсии и параметров нормированной полувариограммы позволяют определить долю случайной изменчивости управляемого фактора (Якушев и др., 2020; Yakushev et al., 2020).

Следующим шагом решения задачи оценки целесообразности применения технологий ТЗ на конкретной территории становится автоматизация разработанного подхода (Yakushev et al., 2020). Существует ряд программ, как коммерческих (ArcGIS, GS+, Surfer, Geostat Systems и др.), так и бесплатных (SAGA GIS, GeoDa, Geo-EAS, Agromet, GSLIB и др.), которые могут быть использованы в вычислительных экспериментах лишь частично; кроме того, для широкого практического применения пользователь должен обладать компетенциями эксперта для корректного выполнения и интерпретации всех этапов предложенного метода. При этом наиболее сложным этапом реализации данной задачи представляется именно построение экспериментальной вариограммы и подбор её теоретической модели. Многие авторы предлагают автоматизировать вариограммный анализ, в частности определение теоретических параметров вариограммы, для снижения зависимости, существующей сегодня, от специальных знаний (Carvalho, Costa, 2021; Li et al., 2018; Razavi et al., 2019; Yasojima et al., 2019). Следует отметить, что предлагаемые подходы имеют ряд существенных ограничений: отсут-

ствии этапов дополнительного анализа исходных данных (например, проверки наличия пространственного тренда), небольшое количество теоретических моделей (сферическая, экспоненциальная и т. п.), отсутствие автоматической подгонки параметров модели, сложная постобработка построений (нормирование вариограммы, расчёт оценочных параметров, таких как наггет-дисперсия и т. п.) и др. Большинство существующих решений не имеют систем рекомендаций и подсказок для пользователя и больше ориентированы на экспертов в области геостатистики.

Цель настоящего исследования — разработка концепции и прототипа для автоматизации разработанного ранее метода оценки целесообразности применения дифференцированных технологий внесения агрохимикатов на конкретной сельскохозяйственной территории по данным дистанционного зондирования.

Объекты и методы

На входе в рассматриваемой задаче используются спектральные характеристики растений и почвы $Z(x_i)$, полученные средствами дистанционного зондирования (спутниковые или аэрофотоснимки). Для принятия решения о целесообразности применения технологий ТЗ необходимо исследовать пространственную структуру параметра Z и оценить долю случайных изменений, на которые не повлияют дифференцированные агротехнологические операции. Следует отметить, что метод применим и на классических наземных наборах данных (например, агрохимических показателях почвы), однако процесс сбора и предварительной обработки такой информации более трудозатратный и длительный (рекомендуется использовать 100 (минимально) и более исходных точек для корректного вариограммного анализа).

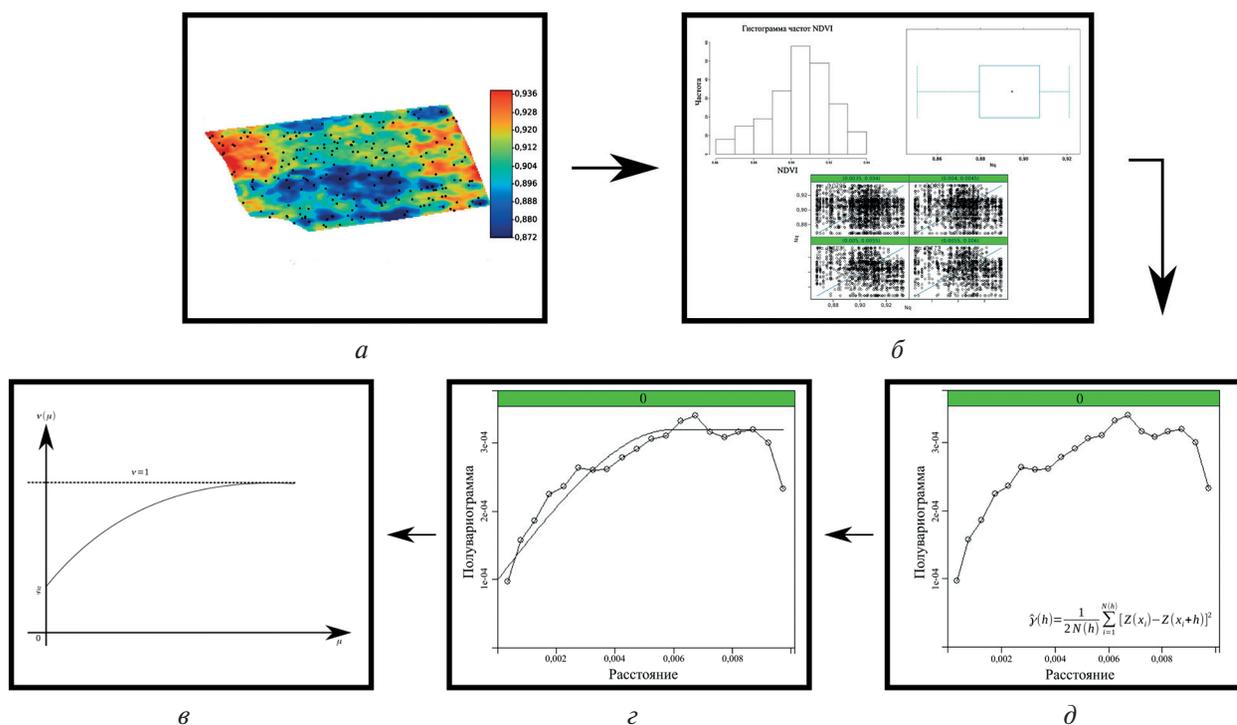


Рис. 1. Общая схема алгоритма разработанного подхода к оценке целесообразности применения технологий ТЗ: *а* — визуализация карты распределения спектральных наблюдений; *б* — описательная статистика; *в* — экспериментальная полувариограмма; *г* — аппроксимация экспериментальной полувариограммы теоретической моделью; *д* — нормирование полувариограммы и расчёт оценочных параметров

В ходе исследования для проведения вычислительных экспериментов использовались два источника снимков сельскохозяйственных полей:

1. Аэрофотосъёмка. На базе биополигона Агрофизического НИИ, расположенного в Ленинградской обл., производилась съёмка опытных участков с применением беспилотной авиационной системы «Геоскан-401» с двумя вариантами навесного оборудования: цифровых камер Sony, позволяющих получать изображения в видимом и ближнем инфракрасном спектрах; мультиспектральной камеры Micasense (пять каналов: red (красный), green (зелёный), blue (синий), near infrared (ближний инфракрасный), red edge (дальний инфракрасный)). Пространственное разрешение составило 3–7 см/пиксель. Разработанный метод апробировался на зерновых культурах (Iakushev et al., 2020).
2. Спутниковая съёмка. Дополнительно проводились демонстрационные вычислительные эксперименты на основе открытых снимков Sentinel-2 (уровень обработки L2A) с сельскохозяйственными полями хозяйства «Красносельское» Ленинградской обл., пространственное разрешение изображений составило 10 м/пиксель (Якушев и др., 2020).

Основные элементы вычислительной части разработанного подхода к оценке целесообразности применения технологий ГЗ

$\hat{\gamma}(p) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$	Экспериментальная полувариограмма
N	Число пар опытных точек
h	Расстояние между двумя наблюдениями
Z	Анализируемый спектральный параметр
x_i	Координаты
c_0	Самородок (<i>англ.</i> nugget) — величина полувариограммы при $h = 0$
$c = c_0 + c_1$	Порог (<i>англ.</i> sill) полувариограммы — предельное значение функции
a	Ранг (<i>англ.</i> range) — расстояние, на котором функция полувариограммы достигает порога
$\gamma(h) = \begin{cases} c_0 + c_1 \left[\frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right], & 0 \leq h \leq a, \\ c_0 + c_1, & h > a \end{cases}$	Пример аппроксимационной функции для экспериментальной полувариограммы — сферическая модель
$v(\mu) = \begin{cases} \xi + (1 - \xi) (\mu), & 0 \leq \mu \leq 1, \\ 1, & \mu > 1, \end{cases}$ $(\mu) = \frac{3}{2}\mu - \frac{1}{2}\mu^3$	Нормированная полувариограмма на примере сферической функции
$\xi = c_0/c$	Наггет-дисперсия (<i>англ.</i> nugget to sill ratio)
$\mu = h_{\max}/a$	Условно называется масштабом, зависит от ранга a , при этом h_{\max} — максимальное расстояние между наблюдениями
$\theta = \frac{c_0}{\gamma}(h) = \frac{\xi}{v}(\mu)$	Параметр, характеризующий долю случайной вариабельности исследуемой спектральной характеристики

Следует отметить, что в ходе исследования в связи с высокой облачностью над территорией Ленинградской обл. предпочтение в использовании было отдано аэрофотосъёмке. В качестве исходного спектрального показателя применялся индекс NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс). Выбор наблюдаемого параметра обусловлен тем, что в качестве базовой задачи рассматривалось

принятие решения при внесении азотсодержащих удобрений. Соответственно, выбор оптической информации зависит от типа необходимой агрооперации, используются наиболее коррелируемые спектры и индексы с наблюдаемым параметром (например, с обеспеченностью посевов азотом).

Для эффективного хранения, систематизации и обеспечения удобного доступа к исходному датасету (*англ.* dataset) спутниковых и аэрофотоснимков в рамках предыдущих исследований была разработана специализированная база геопространственных данных. Для её проектирования использовался современный онтологический подход, в качестве инструментария для реализации была выбрана бесплатная открытая СУБД (система управления базами данных) PostgreSQL с надстройкой PostGIS.

Задача решается поэтапно, общая схема подхода представлена на *рис. 1* (см. с. 73). На первом этапе формируется набор исходных наблюдений на основе изображений сельскохозяйственного поля (может рассматриваться как отдельный спектр, так и комбинация каналов, например вегетационный индекс). В случае если анализируется аэрофотоснимок, то для оптимизации вычислений выбирается ограниченный набор равномерно распределённых точек. После этого осуществляется предобработка датасета: описательная статистика, оценивание, проверка гипотез и предположений геостатистики. На третьем этапе строится экспериментальная полувариограмма, проводится поиск её теоретической модели. Полученная функция нормируется, вычисляются параметры, по которым оценивается уровень случайной компоненты, как, например, нагет-дисперсия. Все основные элементы вычислительной части предложенного подхода представлены в *таблице*.

Следует отметить, что альтернативные методы анализа пространственной вариабельности наблюдаемого параметра (например, зональная статистика) не позволяют с такой же точностью оценивать долю случайных изменений показателя, которыми невозможно управлять с помощью агроопераций.

Результаты и их обсуждение

По результатам проведённых исследований были сформированы основные ограничения на исходную информацию для применения разработанного метода:

- анализ может проводиться как для отдельного сельскохозяйственного участка, так и для группы полей — выбирается та территория, где принимается решение о технологии внесения агрохимикатов;
- выбор спектральной характеристики или вегетационного индекса для проведения анализа основывается на его высоком уровне корреляции с управляемым параметром (например, обеспеченностью посевов азотом);
- при использовании аэрофотоснимков с высоким пространственным разрешением (3–10 см/пиксель) рекомендуется использовать максимально 1 % пикселей изображения (равномерно распределённых) для оптимизации вычислительных процессов (Якушев и др., 2021);
- при использовании спутниковых снимков необходимо обеспечить минимальный объём исходных точек — 100 пикселей для вариограммного анализа, при этом пространственное разрешение рекомендуется не ниже 15–20 м/пиксель.

В ходе выполнения вычислительных экспериментов, а также на основе обзора современных исследований и инструментов в области автоматизации задач, использующих геостатистические подходы, были сформулированы основные требования к разрабатываемому модулю:

- реализация предпочтительно должна базироваться на открытых бесплатных (*англ.* open source) решениях;
- в версии прототипа на вход передаётся файл с таблицей данных (расширения csv, txt и т. п.);

- разработка должна в будущем легко встраиваться в более глобальный проект — общий веб-сервис для систематизации и обработки современными (*англ.* state-of-the-art) методами разнородных больших геопространственных данных в задачах точного земледелия;
- помимо основных результатов автоматических расчётов (график вариограммы, наггет-дисперсия и т. п.), модуль должен предварительно выводить карту распределения наблюдений, а также описательную статистику и наличие пространственного тренда для предоставления возможности пользователю корректировать параметры построения теоретической модели.

В качестве базового языка программирования для разработки был выбран язык R — свободный инструмент, который имеет в своём арсенале множество библиотек, реализующих все необходимые методы геостатистики. Альтернативно также можно рассматривать Python (MacKie et al., 2022), однако стоит отметить, что библиотеки для вариограммного анализа в основном являются зеркалом аналогичных пакетов R. В общем упрощённом виде алгоритм работы модуля представлен на *рис. 2* (см. с. 77).

Предварительная версия прототипа геостатистического модуля разработана с применением специализированного статистического языка программирования R (<https://www.r-project.org/>) и библиотек Gstat (<https://cran.r-project.org/web/packages/gstat/index.html>), E1071 (<https://cran.r-project.org/web/packages/e1071/index.html>), Lattice (<https://cran.r-project.org/web/packages/lattice/index.html>), Sp (<https://cran.r-project.org/web/packages/sp/index.html>). Для визуализации прототипа использовался пакет Shiny на основе языка R (<https://cran.r-project.org/web/packages/shiny/index.html>).

На *рис. 3* (см. с. 78) представлены скриншоты отдельных вкладок полученной реализации.

В дальнейшем планируется доработка прототипа модуля и его внедрение в единый сервис (*рис. 4*, см. с. 79), позволяющий осуществлять анализ разнородных геопространственных данных различными новыми и современными методами с целью принятия управленческих решений. Основой системы стала разработанная база больших геопространственных данных. Спутниковые снимки Landsat и Sentinel загружаются автоматически с помощью созданного модуля, позволяющего автоматически скачивать изображения, покрывающие территорию Ленинградской обл., наполнение остальной информацией осуществляется вручную ежегодно. Блок, отвечающий за обработку геоданных, представляется наиболее сложным и многофункциональным и состоит из комплекса модулей: плагина для сборки и обработки снимков, который необходим для корректного отображения и работы с геопривязанными изображениями (основные инструменты — Openlayers, Geoserver); модуля специализированных инструментов геообработки, предоставляющего функционал, позволяющий работать с картами (расчёт площадей, калькулятор растров, измерение расстояний и т. п.); сервиса извлечения знаний, необходимого для корректного отображения и извлечения информации из базы знаний, и др. Представленный прототип автоматизации подхода к оценке целесообразности применения технологий ГЗ взаимосвязан с модулем извлечения информации с изображений, который, в свою очередь, формирует на основе снимка (или комбинации спектров) из базы данных таблицу со значениями и координатами интересующего показателя (равномерно распределённые пиксели в необходимом объёме).

В качестве отличительных особенностей разработанного модуля следует отметить: автоматический подбор параметров построений на каждом этапе реализации метода; наличие системы рекомендаций и подсказок пользователю (например, система по умолчанию предлагает использовать подобранные параметры, однако предоставляет возможность их менять); использование большого числа теоретических моделей на базе возможностей библиотек языка R, которые активно пополняются и поддерживаются сообществом разработчиков по всему миру; гибкость модуля, что позволит в будущем внедрить его в различные по своей архитектуре проекты.

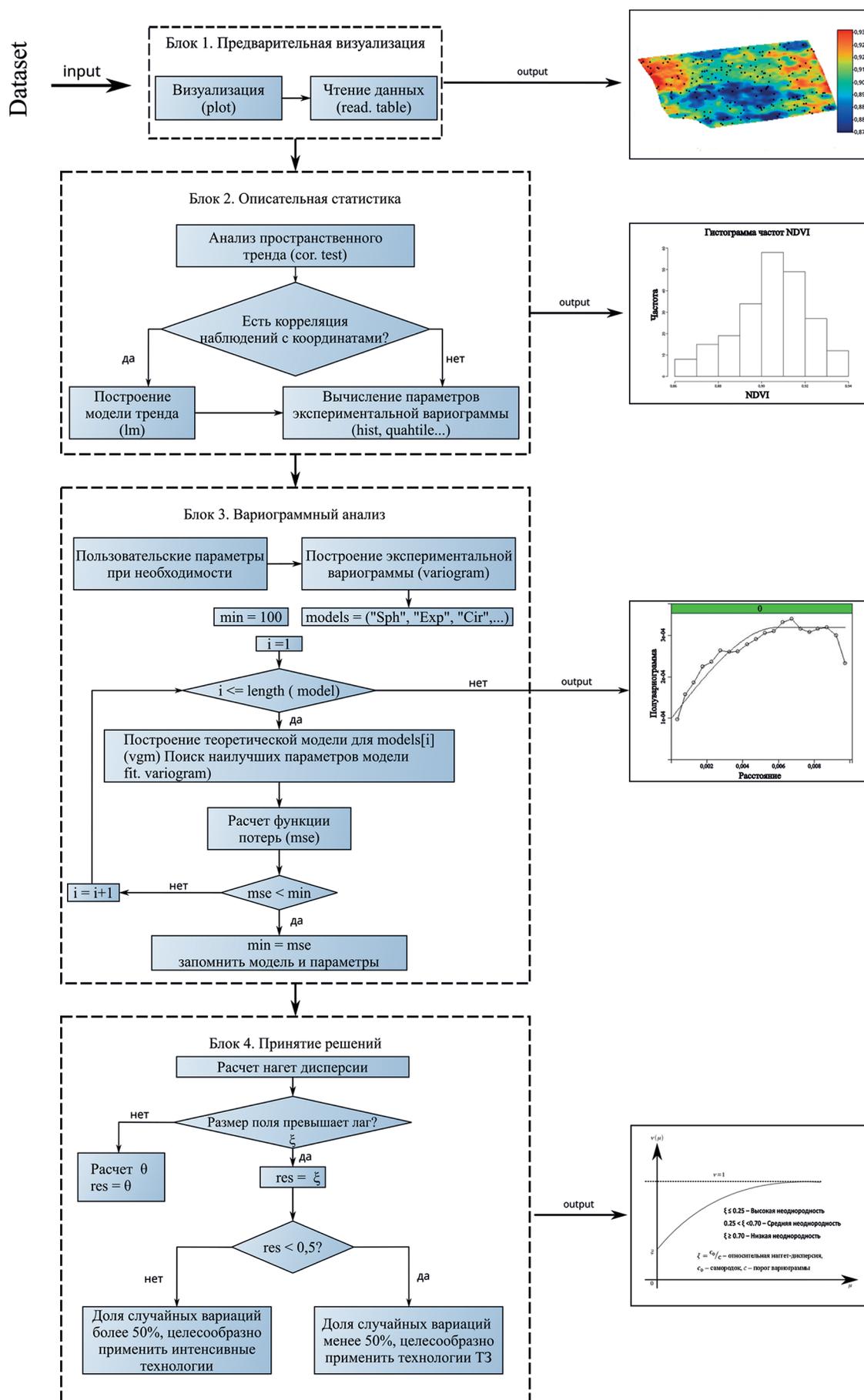


Рис. 2. Общая схема алгоритма разработанного модуля

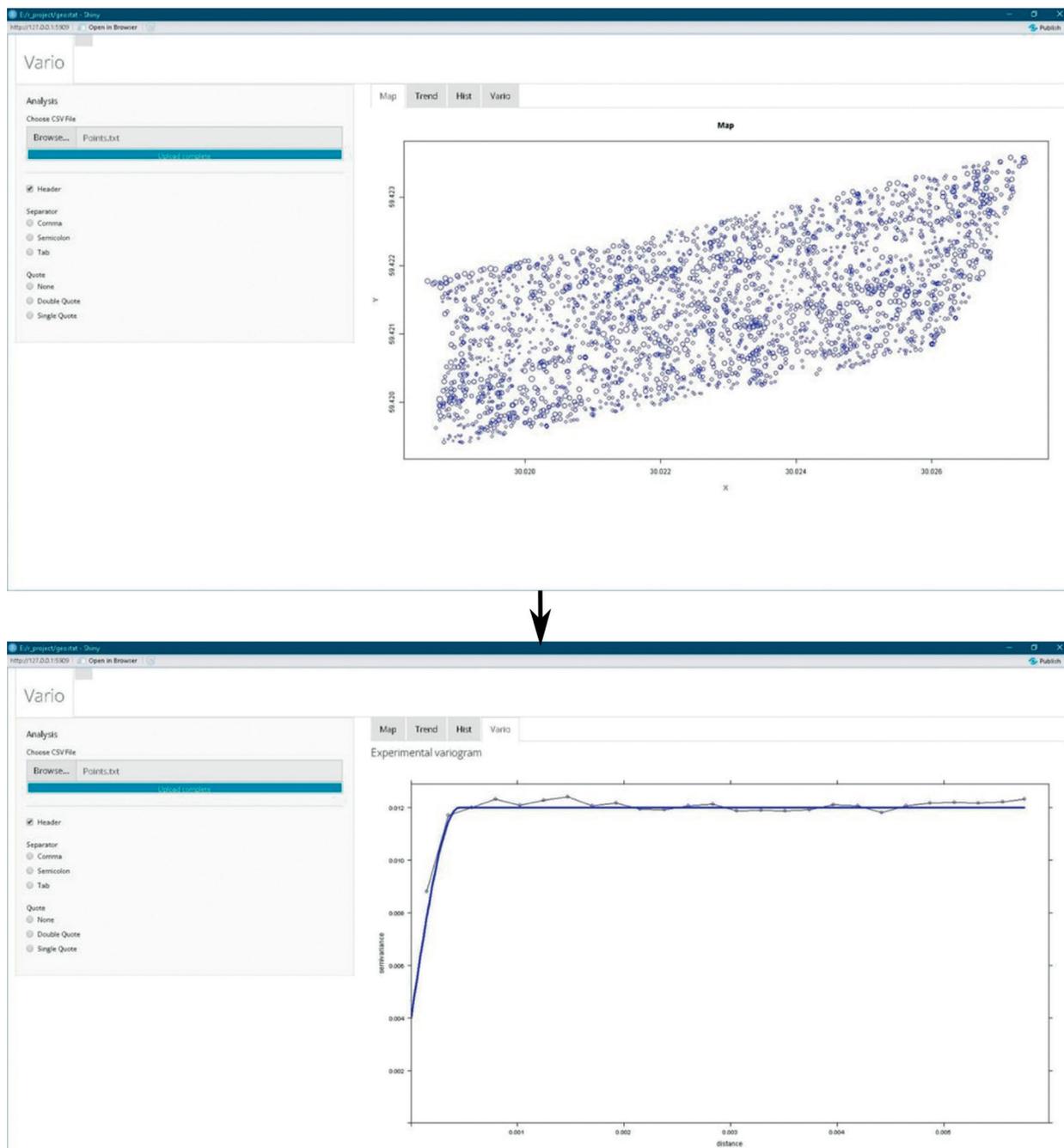


Рис. 3. Скриншоты вкладок Map и Vario разработанного прототипа геостатистического модуля, где отображается карта распределения исходных наблюдений (диаметр кругов пропорционален значению параметра, что позволяет визуально оценивать динамику распределения величин наблюдений в пространстве), а также экспериментальная вариограмма и её теоретическая модель

Несмотря на то что проект технически в перспективе возможно расширить, необходимо дополнительно апробировать разработанный подход на различных уровнях обработки (поле, группа полей, регион, область и т. д.) в различных условиях (разные культуры и климатические зоны). Решение этой масштабной задачи существенно упростит представленная автоматизация.

Геостатистический модуль

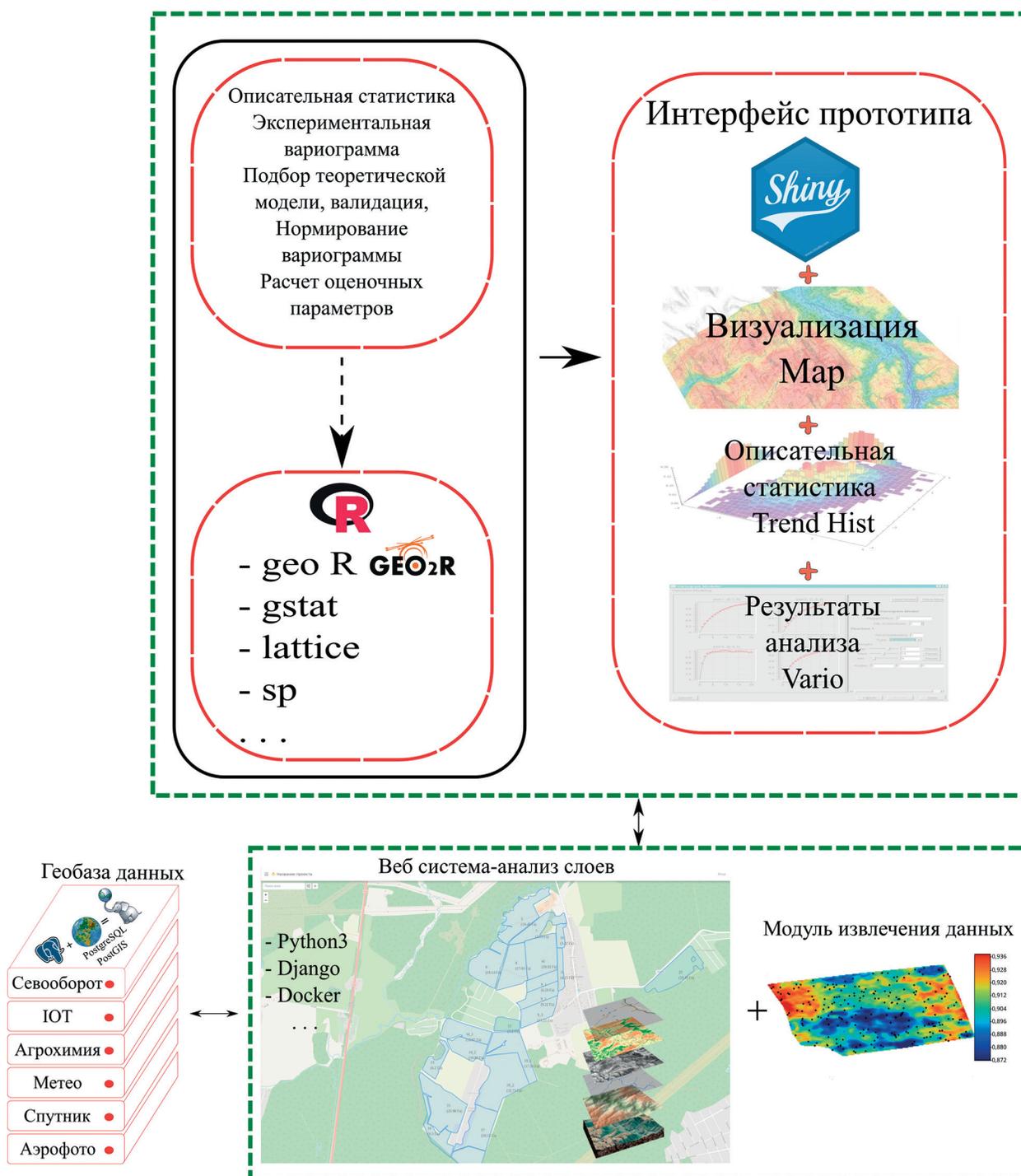


Рис. 4. Общая структура внедрения прототипа геостатистического модуля в единую систему

Заключение

В настоящей работе предпринята попытка расширить возможности метода оценки степени целесообразности применения технологий точного земледелия на заданной сельскохозяйственной территории на основе геостатистического анализа данных. Результаты вычислительных экспериментов продемонстрировали работоспособность предложенного подхода к оценке целесообразности применения дифференцированных технологий внесения удобрений,

основанного на вариограммном анализе ДДЗ. Однако в ходе проведения вычислительных экспериментов в качестве одного из основных недостатков выявилась проблема сложности автоматизации расчётов и построений. Для решения данной задачи был разработан прототип геостатистического модуля, который позволяет усовершенствовать предложенный метод вариограммного анализа ДДЗ.

Методика проведения оценки полностью автоматизирована, что до минимума сокращает время осуществления анализа. В качестве исходных данных использованы спектральные характеристики растений и почвы, полученные средствами дистанционного зондирования (спутниковые или аэрофотоснимки). Для принятия решения о целесообразности дифференцированного внесения удобрений необходимо исследовать статистические связи и структуру пространственного распределения исследуемого параметра и оценить долю случайных изменений, влияющих на принятие решения.

Литература

1. Якушев В. П., Буре В. М., Митрофанова О. А. и др. Оценка внутриполевой изменчивости посевов с помощью вариограммного анализа спутниковых данных для точного земледелия // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 2. С. 114–122. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-2-114-122>.
2. Якушев В. П., Буре В. М., Митрофанова О. А. и др. Особенности обработки аэрокосмических снимков для оптимизации геостатистических исследований внутриполевой изменчивости в задачах точного земледелия // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 128–139. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-4-128-139>.
3. Ahmad L., Mahdi S. S. Chapter 12. Feasibility and evaluation of precision farming // Satellite Farming. Switzerland: Springer Nature, 2018. P. 149–166. https://doi.org/10.1007/978-3-030-03448-1_12.
4. Budzko V., Medennikov V. Mathematical modeling of evaluating the effectiveness of using RSD data in precision farming // Procedia Computer Science. 2021. V. 190. P. 122–129. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.06.015>.
5. Bullock D. S., Boerngen M., Ta H. et al. The data intensive farm management project: Changing agronomic research through on-farm experimentation // Agronomy J. 2019. V. 111. No. 6. P. 2736–2746. <https://doi.org/10.2134/agronj2019.03.0165>.
6. Carvalho P., Costa J. Automatic variogram model fitting of a variogram map based on the Fourier integral method // Computers and Geosciences. 2021. V. 156. Article 104891. <http://doi.org/10.1016/j.cageo.2021.104891>.
7. Chamara N., Islam M. D., Bai G. F. et al. Ag-IoT for crop and environment monitoring: past, present, and future // Agricultural Systems. 2022. V. 203. Article 103497. <http://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103497>.
8. Chlingaryan A., Sukkarieh S., Whelan B. Machine learning approaches for crop yield prediction and nitrogen status estimation in precision agriculture: A review // Computers and Electronics in Agriculture. 2018. V. 151. P. 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.05.012>.
9. Dong Y., Fu Z., Peng Y. et al. Precision fertilization method of field crops based on the Wavelet-BP neural network in China // J. Cleaner Production. 2020. V. 246. Article 118735. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118735>.
10. 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. <https://doi.org/10.3390/w9120990>.
11. Garg A., Sapkota A., Haghverdi A. SAMZ-Desert: A Satellite-based agricultural management zoning tool for the desert agriculture region of southern California // Computers and Electronics in Agriculture. 2022. V. 194. Article 106803. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106803>.
12. Gavioli A., de Souza E. G., Bazzi C. L., Schenatto K., Betzek N. M. Identification of management zones in precision agriculture: An evaluation of alternative cluster analysis methods // Biosystems Engineering. 2019. V. 181. P. 86–102. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.02.019>.
13. Iakushev V. P., Bure V. M., Mitrofanova O. A., Mitrofanov E. P. On the issue of semivariograms constructing automation for precision agriculture problems // Vestnik Sankt-Peterburgskogo Universiteta, Prikladnaya Matematika, Informatika, Protsessy Upravleniya. 2020. V. 16. No. 2. P. 177–185. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu10.2020.209>.
14. Jiang R., Sanchez-Azofeifa A., Laakso K. et al. UAV-based partially sampling system for rapid NDVI mapping in the evaluation of rice nitrogen use efficiency // J. Cleaner Production. 2021. V. 289. Article 125705. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125705>.

15. Kernecker M., Knierim A., Wurbs A. et al. Experience versus expectation: farmers' perceptions of smart farming technologies for cropping systems across Europe // *Precision Agriculture*. 2020. V. 21. No. 1. P. 34–50. <https://doi.org/10.1007/s11119-019-09651-z>.
16. Li Z., Zhang X., Clarke K. C. et al. An automatic variogram modeling method with high reliability fitness and estimates // *Computers and Geosciences*. 2018. V. 120. P. 48–59. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2018.07.011>.
17. Loures L., Chamizo A., Ferreira P. et al. Assessing the effectiveness of precision agriculture management systems in Mediterranean small farms // *Sustainability*. 2020. V. 12. Article 3765. <https://doi.org/10.3390/su12093765>.
18. Lowder S. K., Skoet J., Raney T. The number, size, and distribution of farms, smallholder farms, and family farms worldwide // *World Development*. 2016. V. 87. P. 16–29. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2015.10.041>.
19. MacKie E. J., Field M., Wang L. et al. GStatSim V1.0: a Python package for geostatistical interpolation and simulation: preprint // *EGUsphere*. 2022. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2022-1224>.
20. Mizik T. How can precision farming work on a small scale? A systematic literature review // *Precision Agriculture*. 2023. V. 24. P. 384–406. <https://doi.org/10.1007/s11119-022-09934-y>.
21. Pathmudi V. R., Khatri N., Kumar S. et al. A systematic review of IoT technologies and their constituents for smart and sustainable agriculture applications // *Scientific African*. 2023. V. 19. Article e01577. <http://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01577>.
22. Paul K., Chatterjee S. S., Pai P. et al. Viable smart sensors and their application in data driven agriculture // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2022. V. 198. Article 107096. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107096>.
23. Razavi S., Sheikholeslami R., Gupta H. V., Haghnegahdar A. VARS-TOOL: A toolbox for comprehensive, efficient, and robust sensitivity and uncertainty analysis // *Environmental Modelling and Software*. 2019. V. 112. P. 95–107. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.10.005>.
24. Rodrigues M. S., Castrignanò A., Belmonte A. et al. Geostatistics and its potential in Agriculture 4.0 // *Revista Ciência Agronômica*. 2020. V. 51. Special Agriculture 4.0. Article e20207691. <http://doi.org/10.5935/1806-6690.20200095>.
25. Singh P. K., Sharma A. An intelligent WSN-UAV-based IoT framework for precision agriculture application // *Computers and Electrical Engineering*. 2022. V. 100. Article 107912. <http://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2022.107912>.
26. The state of food and agriculture 2020. Overcoming water challenges in agriculture. FAO. Rome, 2020. 210 p. <https://doi.org/10.4060/cb1447en>.
27. Vecchio Y., De Rosa M., Pauselli G. et al. The leading role of perception: the FACOPA model to comprehend innovation adoption // *Agricultural and Food Economics*. 2022. V. 10. No. 5. P. 1–19. <https://doi.org/10.1186/s40100-022-00211-0>.
28. Yakushev V., Petrushin A., Mitrofanova O. et al. Spatial distribution prediction of agro-ecological parameter using kriging // *E3S Web of Conf. Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering, TPACEE 2019*. 2020. Article 06030. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016406030>.
29. Yamasaki Y., Morie M., Noguchi N. Development of a high-accuracy autonomous sensing system for a field scouting robot // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2022. V. 193. Article 106630. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106630>.
30. Yasojima C., Protázio J., Meiguins B. et al. A New methodology for automatic cluster-based kriging using K-nearest neighbor and Genetic algorithms // *Information*. 2019. V. 10. No. 11. Article 357. <https://doi.org/10.3390/info10110357>.

Decision making tools on precision farming technologies feasibility based on geostatistical analysis of remote sensing data

O. A. Mitrofanova¹, E. P. Mitrofanov¹, V. P. Yakushev¹,
V. V. Yakushev¹, V. M. Bure^{1,2}, S. Yu. Blokhina¹

¹ *Agrophysical Research Institute, Saint Petersburg 195220, Russia*
E-mails: o.a.mitrofanova@spbu.ru, sblokhina@agrophys.ru

² *Saint Petersburg State University, Saint Petersburg 199034, Russia*

The possibility of achieving economic efficiency from the introduction of precision agriculture technologies requires the development of predictive methods to assess the prospects for implementation those technologies, taking into account specific conditions. The authors propose a toolkit to support a method for assessing the feasibility of applying precision agriculture technologies on a given agricultural territory on the basis of variogram analysis of remote sensing data. In order to make a decision, it is necessary to investigate statistical relationships of the spatial distribution of the values of the parameter under study in the agricultural field and assess the degree of within-field heterogeneity, on which the application of differentiated agro-technological operations depends. The paper considers one of the approaches to constructing a geostatistical module for conducting predictive computational experiments, which allows to automate all stages of solving the problem of assessing the prospects for using precision agriculture technologies for specific soil and climatic conditions of an agricultural producer. The toolkit was developed using specialized statistical programming language R, in addition to standard libraries *gstat*, *e1071*, *lattice*, *sp*, etc. Visualization of the prototype was carried out on the basis of the *shiny* package. In the future it is planned to refine the prototype module for implementation in a single service for the analysis of heterogeneous geospatial data by various new and modern methods in order to make management decisions.

Keywords: precision farming, remote sensing data, geostatistics, nugget to sill ratio, geostatistical module, R

Accepted: 16.08.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-71-84

References

1. Yakushev V. P., Bure V. M., Mitrofanova O. A. et al., Within-field variability estimation based on variogram analysis of satellite data for precision agriculture, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 2, pp. 114–122 (in Russian), <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-2-114-122>.
2. Yakushev V. P., Bure V. M., Mitrofanova O. A., Mitrofanov E. P., Blokhina S. Yu., The specifics of aerospace image processing to optimize geostatistical approaches to within-field variability estimation in precision agriculture, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 4, pp. 128–139 (in Russian), <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-4-128-139>.
3. Ahmad L., Mahdi S. S., Chapter 12. Feasibility and evaluation of precision farming, *Satellite Farming*, Switzerland: Springer Nature, 2018, pp. 149–166, https://doi.org/10.1007/978-3-030-03448-1_12.
4. Budzko V., Medennikov V., Mathematical modeling of evaluating the effectiveness of using RSD data in precision farming, *Procedia Computer Science*, 2021, Vol. 190, pp. 122–129, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.06.015>.
5. Bullock D. S., Boerngen M., Ta H. et al., The data intensive farm management project: Changing agro-economic research through on-farm experimentation, *Agronomy J.*, 2019, Vol. 111, No. 6, pp. 2736–2746, <https://doi.org/10.2134/agronj2019.03.0165>.
6. Carvalho P., Costa J., Automatic variogram model fitting of a variogram map based on the Fourier integral method, *Computers and Geosciences*, 2021, Vol. 156, Article 104891, <http://doi.org/10.1016/j.cageo.2021.104891>.
7. Chamara N., Islam M. D., Bai G. F. et al., Ag-IoT for crop and environment monitoring: past, present, and future, *Agricultural Systems*, 2022, Vol. 203, Article. 103497, <http://doi.org/10.1016/j.agry.2022.103497>.
8. Chlingaryan A., Sukkarieh S., Whelan B., Machine learning approaches for crop yield prediction and nitrogen status estimation in precision agriculture: a review, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, Vol. 151, pp. 61–69, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.05.012>.

9. Dong Y., Fu Z., Peng Y. et al., Precision fertilization method of field crops based on the Wavelet-BP neural network in China, *J. Cleaner Production*, 2020, Vol. 246, Article 118735, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118735>.
10. 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, <https://doi.org/10.3390/w9120990>.
11. Garg A., Sapkota A., Haghverdi A., SAMZ-Desert: A Satellite-based agricultural management zoning tool for the desert agriculture region of southern California, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, Vol. 194, Article 106803, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106803>.
12. Gavioli A., de Souza E. G., Bazzi C. L. et al., Identification of management zones in precision agriculture: An evaluation of alternative cluster analysis methods, *Biosystems Engineering*, 2019, Vol. 181, pp. 86–102, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.02.019>.
13. Iakushev V. P., Bure V. M., Mitrofanova O. A., Mitrofanov E. P., On the issue of semivariograms constructing automation for precision agriculture problems, *Vestnik Sankt-Peterburgskogo Universiteta, Prikladnaya Matematika, Informatika, Protsessy Upravleniya*, 2020, Vol. 16, No. 2, pp. 177–185, <https://doi.org/10.21638/11701/spbu10.2020.209>.
14. Jiang R., Sanchez-Azofeifa A., Laakso K. et al., UAV-based partially sampling system for rapid NDVI mapping in the evaluation of rice nitrogen use efficiency, *J. Cleaner Production*, 2021, Vol. 289, Article 125705, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125705>.
15. Kernecker M., Knierim A., Wurbs A. et al., Experience versus expectation: farmers' perceptions of smart farming technologies for cropping systems across Europe, *Precision Agriculture*, 2020, Vol. 21, No. 1, pp. 34–50, <https://doi.org/10.1007/s11119-019-09651-z>.
16. Li Z., Zhang X., Clarke K. C. et al., An automatic variogram modeling method with high reliability fitness and estimates, *Computers and Geosciences*, 2018, Vol. 120, pp. 48–59, <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2018.07.011>.
17. Loures L., Chamizo A., Ferreira P. et al., Assessing the effectiveness of precision agriculture management systems in Mediterranean small farms, *Sustainability*, 2020, Vol. 12, Article 3765, <https://doi.org/10.3390/su12093765>.
18. Lowder S. K., Skoet J., Raney T., The number, size, and distribution of farms, smallholder farms, and family farms worldwide, *World Development*, 2016, Vol. 87, pp. 16–29, <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2015.10.041>.
19. MacKie E. J., Field M., Wang L. et al., GStatSim V1.0: a Python package for geostatistical interpolation and simulation: preprint, *EGUsphere*, 2022, <https://doi.org/10.5194/egusphere-2022-1224>.
20. Mizik T., How can precision farming work on a small scale? A systematic literature review, *Precision Agriculture*, 2023, Vol. 24, pp. 384–406, <https://doi.org/10.1007/s11119-022-09934-y>.
21. Pathmudi V. R., Khatri N., Kumar S. et al., A systematic review of IoT technologies and their constituents for smart and sustainable agriculture applications, *Scientific African*, 2023, Vol. 19, Article e01577, <http://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01577>.
22. Paul K., Chatterjee S. S., Pai P. et al., Viable smart sensors and their application in data driven agriculture, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, Vol. 198, Article 107096, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107096>.
23. Razavi S., Sheikholeslami R., Gupta H. V., Haghnegahdar A., VARS-TOOL: A toolbox for comprehensive, efficient, and robust sensitivity and uncertainty analysis, *Environmental Modelling and Software*, 2019, Vol. 112, pp. 95–107, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.10.005>.
24. Rodrigues M. S., Castrignanò A., Belmonte A. et al., Geostatistics and its potential in Agriculture 4.0, *Revista Ciência Agronômica*, 2020, Vol. 51, Special Agriculture 4.0, Article e20207691, <http://doi.org/10.5935/1806-6690.20200095>.
25. Singh P. K., Sharma A., An intelligent WSN-UAV-based IoT framework for precision agriculture application, *Computers and Electrical Engineering*, 2022, Vol. 100, Article 107912, <http://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2022.107912>.
26. *The state of food and agriculture 2020. Overcoming water challenges in agriculture*, FAO, Rome, 2020, 210 p., <https://doi.org/10.4060/cb1447en>.
27. Vecchio Y., De Rosa M., Pauselli G. et al., The leading role of perception: the FACOPA model to comprehend innovation adoption, *Agricultural and Food Economics*, 2022, Vol. 10, No. 5, pp. 1–19, <https://doi.org/10.1186/s40100-022-00211-0>.
28. Yakushev V., Petrushin A., Mitrofanova O. et al., Spatial distribution prediction of agro-ecological parameter using kriging, *E3S Web of Conf. Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering, TPACEE 2019*, 2020, Article 06030, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016406030>.
29. Yamasaki Y., Morie M., Noguchi N., Development of a high-accuracy autonomous sensing system for a field scouting robot, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, Vol. 193, Article 106630, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106630>.

30. Yasojima C., Protázio J., Meiguins B. et al., A new methodology for automatic cluster-based kriging using K-nearest neighbor and Genetic algorithms, *Information*, 2019, Vol. 10, No. 11, Article 357, <https://doi.org/10.3390/info10110357>.