

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТЕПЕНИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ АГРОТЕХНОЛОГИЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ВЕГЕТАЦИОННЫХ ИНДЕКСОВ РАСТЕНИЙ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ

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

¹ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»,
195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., 14;

²Санкт-Петербургский государственный университет,
199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7-9;

E-mail: vyakushev@agrophys.ru, vlb310154@gmail.com, o.a.mitrofanova@spbu.ru, mjeka89@gmail.com

Поступила в редакцию 17.10.2022 г., принята к печати 30.11.2022 г.

В работе рассмотрен опыт изучения количественной внутриполевой изменчивости оптических характеристик растений методом вариограммного анализа. Приведен пошаговый алгоритм применения данного метода: от предварительной обработки исходной информации до анализа расчетов и принятия решений по выбору приоритетной агротехнологии в зависимости от способа ее реализации, т.е. рекомендуется осуществлять технологические воздействия либо дифференцированно, либо равномерно по всему полю. В качестве исходной информации использовались аэрокосмические снимки, по которым строились карты распределения индекса NDVI, который имеет высокую корреляционную связь с обеспеченностью растений азотом. По картам распределения NDVI, в свою очередь, были получены эмпирические вариограммы, каждая из которых затем аппроксимировалась непрерывной функцией нормированного вида. По параметрам данной функции с использованием ранее разработанной в АФИ методики и осуществляется выбор приоритета применения технологий точного земледелия. В течение последних трех лет проводились вычислительные эксперименты по аэрокосмическим снимкам полей полигона АФИ и концерна «Детскосельский» в Ленинградской области, позволяющие проанализировать разработанный геостатистический подход и сделать обоснованный вывод о целесообразности его использования при выборе оптимального способа применения планируемого агроприема. Вместе с тем для масштабируемости подхода предстоит создать автоматизированную систему дистанционного мониторинга для оценки перспективности перехода к точному земледелию на конкретной территории и включения новой возможности в функционал центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» Института космических исследований (ИКИ РАН).

Ключевые слова: вариограммный анализ, наггет-дисперсия, точное земледелие, внутриполевая вариабельность, аэрокосмические снимки, архивы спутниковых данных, вегетационные индексы, системы дистанционного мониторинга.

ON THE QUESTION OF DETERMINING THE DEGREE OF AGRICULTURAL TECHNOLOGIES INTENSIFICATION BASED ON THE ANALYSIS OF PLANTS OPTICAL CHARACTERISTICS BY THE METHODS OF MATHEMATICAL STATISTICS

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

¹Agrophysical Research Institute, 14, Grazhdanskiy pr., St. Petersburg, 195220;

²Saint-Petersburg State University, 7-9, Universitetskaya quay, St. Petersburg, 199034

E-mail: vyakushev@agrophys.ru, vlb310154@gmail.com, o.a.mitrofanova@spbu.ru, mjeka89@gmail.com

The paper considers the experience of studying quantitative within-field variability of plants optical characteristics by the variogram analysis. A step-by-step algorithm for the method application is given: from preprocessing the initial information to analysis of calculations and decision-making on the choice of the priority agricultural technology, depending on the method of its implementation, i.e. it is recommended to carry out technological operations either differentially or evenly throughout the field. Aerospace images were used as initial information. According to these images maps of the distribution of the NDVI index, which has a high correlation with nitrogen supply of plants, were built. Based on the NDVI distribution maps, in turn, empirical variograms were obtained, each of which was then approximated by a normalized continuous function. According to the parameters of this function, using the methodology previously developed at the Agrophysical Research Institute (ARI), the choice of the priority of applying precision farming technologies is made. Over the past three years, computational experiments have been carried out using aerospace images of the ARI fields and the Detskoselsky farm in the Leningrad Region, which make it possible to analyze the developed geostatistical approach and draw a reasonable conclusion about the appropriateness of its use when choosing the optimal method for applying the planned agricultural method.

At the same time, for the scalability of this approach, it is necessary to create an automated remote monitoring system to assess the prospects for the transition to precision farming in a given territory and to include a new feature in the functionality of the SRI-Monitoring collective use center of the Space Research Institute.

Key words: variogram analysis, nugget dispersion, precision farming, within-field variability, aerospace images, satellite data archives, vegetation indexes, remote monitoring systems.

ВВЕДЕНИЕ

Среди основных агротехнологий внесения удобрений и пестицидов выделяются четыре подхода (Гостев, 2017):

– экстенсивная технология – ориентирована на естественные (природные) условия в растениеводстве без применения агрохимикатов;

– нормальная технология – основана на использовании более 50% природного потенциала сорта растений с применением минимальных доз агрохимикатов;

– интенсивная технология – характеризуется применением оптимальных доз агрохимикатов на основе так называемого взаимодействия «генотип-среда» с учетом биологических особенностей сорта растений и природных факторов окружающей среды, при этом внесение удобрений производится равномерно по всему сельскохозяйственному полю;

– высокоинтенсивная технология – включает в себя современную технологию точного земледелия (ТЗ), в рамках которой внесение агрохимикатов осуществляется в соответствии с потребностями растений на каждом элементарном участке сельскохозяйственного поля (дифференцированно) на основе последних научно-исследовательских и инженерных достижений.

Эффективность интенсивной и высокоинтенсивной технологий с точки зрения повышения урожайности, качества продукции, экономии ресурсов и снижения вредного воздействия на окружающую среду была неоднократно продемонстрирована различными исследовательскими группами (Vaschetti et al., 2020; Drechsel et al., 2015). Технологии точного земледелия основаны на исследовании внутриполевой неоднородности распределения тех или иных управляемых агроэкологических параметров, влияющих на продуктивность возделываемой культуры. Например, степень варьирования потребности посевов в азоте определяет эффективность проведения дифференцированных подкормок. Для этого строится карта-задание с целью последующего дифференцированного внесения агрохимиката с помощью прецизионной сельскохозяйственной техники (Матвеев и др., 2021). Однако многие сельскохозяйственные производители не практикуют технологии ТЗ из-за недостатка знаний и ограниченных финансовых возможностей. Действительно, для перехода к дифференцированному внесению агрохимикатов необходимы затраты на переоборудование техники и обучение сотрудников. При этом результаты ряда работ показали, что применение высокоинтенсивных технологий не всегда оправдано на конкретной сельскохозяйственной территории (Afanasyev, 2015; Van Meirvenne, 2003). Соответственно, необходимо разработать

методологию и инструментарий для выбора приоритетной агротехнологии внесения удобрений в каждом отдельном случае.

Введем понятие агроэкологического параметра (индикатора) – показателя, характеризующего состояние агроэкологической зоны, например, содержание азота в почве, температура атмосферного воздуха и т.п. В последние десятилетия научными группами были предложены различные варианты перечней агроэкологических индикаторов, например, Агентство Евростат приводит на своем сайте сводный список факторов, введенных различными организациями с 2005 г. (<https://ec.europa.eu/eurostat/web/agriculture/agri-environmental-indicators>). Наиболее перспективным методом исследования пространственной вариативности внутриполевого агроэкологического параметра представляется вариограммный анализ (Leroux, Tisseyre, 2019; Shit, Bhunia, Maiti, 2016), который также эффективно применяется, например, в задачах мониторинга мелиоративных систем (Jiang, Fu, Wang, 2008; Moustafa, Yomota, 1998), определения оптимального объема исходной информации (Tisseyre et al., 2018) и др.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Для определения приоритетной технологии внесения агрохимикатов на конкретной сельскохозяйственной территории предлагается использовать метод оценки перспективности перехода к ТЗ, предложенный Агрофизическим научно-исследовательским институтом (Якушев и др., 2020а). В основе данного подхода лежит построение момента второго порядка (полувариограммы, или, иначе, вариограммы) (Демьянов, Савельева, 2010):

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

где $Z(x_i)$ – величина агроэкологического параметра в местоположении x_i , h – расстояние между двумя точками наблюдений. Оценка функции (1) осуществляется по следующей формуле:

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

где $N(h)$ – количество пар наблюдений на расстоянии h .

Основным недостатком применения вариограммного анализа для исследования внутриполевой неоднородности являются существенные временные и трудовые затраты, ведь в ходе решения задачи необходимо осуществить отбор большого числа равномерно распределенных проб на сельскохозяйственном поле (Kerry, Oliver, 2008; Yan et al., 2007). В связи с этим предложено в качестве

исходной информации использовать большие геоданные – оптические характеристики растений, полученные с помощью материалов дистанционного зондирования (спутниковые и аэрофотоснимки). Так, например, неоднократно была продемонстрирована высокая корреляционная связь между обеспеченностью растений азотом и величиной вегетационного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) (Буре и др., 2019; Cordero et al., 2020), что позволяет применять данный индекс в качестве входной информации при выборе технологии внесения азотсодержащих удобрений. Кроме того, ранее предложен подход к оптимизации объема анализируемых данных (Якушев и др., 2020б).

Далее рассмотрим предлагаемый подход к определению оптимальной агротехнологии внесения удобрений на конкретной сельскохозяйственной территории.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рассматриваемый подход можно условно представить в виде следующей последовательности вычислительных шагов.

Таблица 1. Некоторые аппроксимационные модели, нормированные полудисперсии и основные параметры для анализа

Теоретическая модель	Нормированная полудисперсия
Сферическая модель: $\gamma(h) = \begin{cases} c_0 + c_1 \left[\frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right], & 0 \leq h \leq a \\ c_0 + c_1, & h > a. \end{cases}$ Экспоненциальная модель: $\gamma(h) = c_0 + c_1 \left[1 - e^{-\frac{h}{a}} \right]$ Гауссова модель: $\gamma(h) = c_0 + c_1 \left[1 - e^{-\frac{h^2}{a^2}} \right]$ Модель с эффектом дырок: $\gamma(h) = c_0 + c_1 \left[1 - \frac{\sin(h/a)}{h/a} \right]$	$v(\mu) = \begin{cases} \xi + (1 - \xi)T(\mu), & 0 \leq \mu \leq 1 \\ 1, & \mu > 1. \end{cases}$ $T(\mu) = \frac{3}{2}\mu - \frac{1}{2}\mu^3$ $v(\mu) = \xi + (1 - \xi)T(\mu),$ $T(\mu) = 1 - e^{-\mu}$ $v(\mu) = \xi + (1 - \xi)T(\mu),$ $T(\mu) = 1 - e^{-\mu^2}$ $T(\mu) = 1 - \frac{\sin \mu}{\mu}$
Описание основных параметров	
c_0 – самородок (nugget), значение вариограммной функции при $h = 0$; $c = c_0 + c_1$ – плато (sill), пороговое значение вариограммной функции; a – ранг (range), радиус корреляции.	$\xi = c_0 / c$ – наггет-дисперсия (nugget to sill ratio); $\mu = h / a$ – масштаб поля, выраженный в единицах ранга a; $\theta = \frac{c_0}{\gamma}(h) = \frac{\xi}{v}(\mu)$ – параметр, характеризующий долю случайных вариаций исследуемого показателя.

Вычислительные эксперименты

В ходе трехэтапного исследования осуществлялись ежегодные вычислительные эксперименты, позволяющие проанализировать практические аспекты применения предложенного геостатистического подхода к выбору оптимальной агротехнологии (интенсивной или дифференцированной). Ниже они кратко описаны с разбивкой по этапам.

Этап 1. Статистическая предварительная обработка исходной информации: анализ выборки наблюдений, проверка гипотез, выявление аномалий и т. п.

Этап 2. Вариограммный анализ: построение экспериментальной функции, подбор теоретической модели (некоторые варианты представлены в табл. 1), вычисление основных показателей (c , c_0 , a , ξ – см. табл. 1); оценка характерного размера сельскохозяйственного поля $h_{\max}$.

Этап 3. Вычисление нормированной вариограммной функции $v(\mu)$, параметров μ , θ – описание также продемонстрировано в табл. 1.

Этап 4. Анализ расчетов и принятие решения. Значение не должно быть слишком малым, оценивается величина параметра θ – чем она ближе к нулю, тем выше приоритет применения технологии ТЗ. При этом если масштаб сельскохозяйственного поля большой, то считается, что $v = 1$, и решение принимается исходя из величины наггет-дисперсии ξ .

1-й этап. В первую очередь, для подтверждения работоспособности метода был проведен эксперимент с использованием ретроспективных данных (Якушев и др., 2020а), полученных на биополигоне Агрофизического научно-исследовательского института (АФИ), расположенном в Гатчинском районе Ленинградской области (д. Меньково). За основу было взято поле № 26 (согласно принятой в АФИ нумерации), на котором проводился многолетний опыт по изучению эффективности

дифференцированных технологий на примере внесения азотсодержащих удобрений (рис. 1). Аэрофотоснимки были выбраны за две даты: 3 июня (до подкормки) и 10 июня (после дифференцированного внесения удобрений) 2011 г. Безусловно, за одну неделю однородность поля не

может быть достигнута, однако динамика изменений должна наблюдаться. Предполагалось, что после применения технологий ТЗ на опытном сельскохозяйственном поле оптические показатели, отражающие азотный статус растений, будут выравнены. Данная гипотеза подтвердилась (табл. 2).



Рис. 1. Поле № 26 (площадь 28 га) биополигона Агрофизического научно-исследовательского института, дата съемки: 10 июня 2011 г.; культура: яровая пшеница; фаза развития: кущение

Таблица 2. Результаты вариограммного анализа наборов показателей вегетационного индекса для двух дат аэрофотосъемки

Дата съемки	Само-родок, c_0	c_1	Порог, c	Ранг, a	Наггет-дисперсия, ξ	h	μ	ν	θ
03.06.2011	0,0008	0,00350	0,00430	0,0148	0,186	0,008	0,54	0,530	0,350
10.06.2011	0,0009	0,00055	0,00145	0,0018	0,620	0,008	4,40	0,995	0,623

Для проведения вычислительного анализа на основе данных аэрофотосъемки были построены две карты распределения индекса NDVI, после чего были сгенерированы два случайных набора точек (рис. 2). В результате построения вариограмм (рис. 3) для

полученных наборов оптической информации были рассчитаны все основные параметры предложенного метода, которые представлены в табл. 2. Наиболее близкой теоретической моделью вариограммы в обоих случаях оказалась экспоненциальная модель (табл. 1).

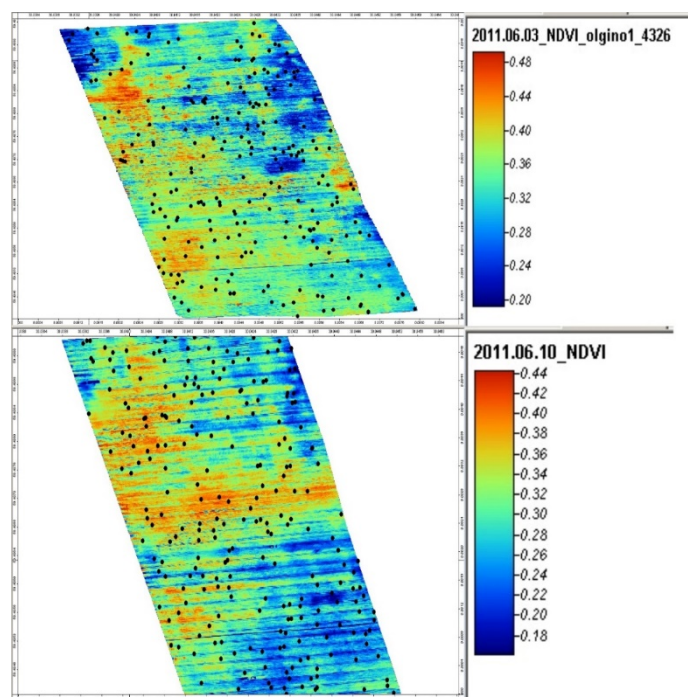


Рис. 2. Два набора случайно выбранных пространственных точек для генерирования наборов исходных данных для вычислительного эксперимента первого этапа исследования

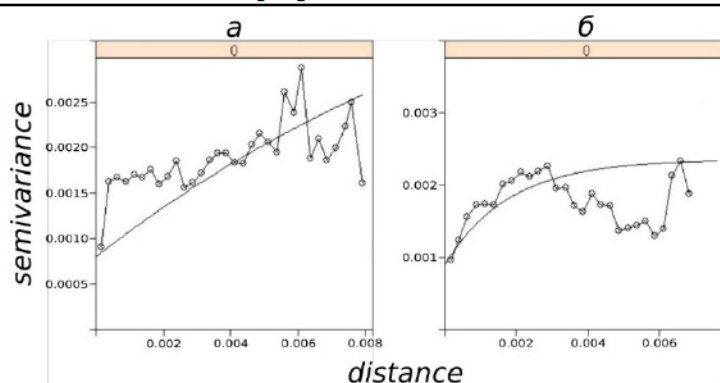


Рис. 3. Построенные в ходе вычислительного эксперимента первого этапа исследования семивариограммы: а) для первого набора данных (на основе аэрофотосъемки от 3 июня 2011 г.); б) для второго набора данных (на основе аэрофотосъемки от 10 июня 2011 г.)

Из результатов проведенного эксперимента (табл. 2) видно, что до внесения подкормки доля случайной неконтролируемой изменчивости оптических показателей растений составляла 35% (т. к. доля случайных вариаций $\theta = 0,350$ исходя из табл. 2), т. е. 65% могут быть сглажены за счет управляющих дифференцированных агротехнологий, а уже после применения удобрений показатель неконтролируемых вариаций составил 62% (параметр $\theta = 0,623$ исходя из табл. 2).

Дополнительно подход был отработан на примере спутникового снимка (Sentinel-2, L2A, дата: 23.06.2019 г.) с двумя сельскохозяйственными полями агрохозяйства, расположенного в Ленинградской

области (рис. 4) (Якушев и др., 2020б). На основе тех же самых алгоритмов были получены две карты распределения NDVI и сгенерированы два набора исходных данных для анализируемых территорий. В отличие от предыдущего эксперимента, в данном случае для исследуемых участков было характерно большое значение масштаба μ (табл. 1), в связи с чем выводы строились на основе вычисленных значений нагетт-дисперсии. В табл. 3 представлены результаты расчетов, из которых видно, что на первом поле целесообразно применять дифференцированные технологии внесения удобрений, а на втором – интенсивные (одна доза по всему полю).



Рис. 4. Спутниковый снимок (Sentinel-2, L2A, дата: 23.06.2019 г.) с двумя wybranymi для анализа сельскохозяйственными полями (Ленинградская обл.). Площадь поля 1 – 42 га, площадь поля 2 – 29 га

2-й этап. Для повышения эффективности автоматизированного геостатистического анализа оптических данных при решении задач, связанных с выбором агротехнологии, дополнительно было проведено исследование оптимального объема исходной информации (Якушев и др., 2021). Не всегда имеется смысл использовать для вычислительного эксперимента все пиксели на изображении, пространственное разрешение аэрофотоснимка может достигать $1,5 \text{ см пиксель}^{-1}$, т. е. для сельскохозяйственного участка площадью 1 га может

быть получено до 4 миллионов пикселей, что существенно затруднит проведение расчетов. В связи с этим на конкретном примере высококачественного аэрофотоснимка сельскохозяйственного поля были проанализированы основные параметры вариограммного анализа для выборок разного объема (табл. 4). В результате было установлено, что в качестве исходной информации достаточно использовать 0,5–1,0% оптических показателей, равномерно распределенных на изображении.

Таблица 3. Результаты второго вычислительного эксперимента для первого этапа исследования.

Номер поля	Самородок, c_0	c_1	Порог, c	Ранг, a	Наггет-дисперсия, ζ
1	0,0001	0,00045	0,00055	0,010	0,182
2	0,0001	0,00011	0,00022	0,006	0,460

Таблица 4. Параметры вариограммного анализа для исследуемого сельскохозяйственного поля с различным объемом исходной оптической информации

Объем информации, %	c_0	c	a	ζ	μ	ν	θ
100	0,00390	0,19181	0,25862	0,020	0,00889	0,0330	0,610
20	0,00390	0,15881	0,22692	0,025	0,01014	0,0398	0,628
10	0,00390	0,13097	0,19239	0,030	0,01196	0,0472	0,631
5	0,00390	0,11275	0,14443	0,035	0,01593	0,0577	0,600
1	0,00384	0,14501	0,19024	0,027	0,01209	0,0442	0,600
0,5	0,00377	0,08656	0,10901	0,044	0,02110	0,0739	0,590
0,1	0,00380	0,02068	0,02260	0,184	0,10179	0,3082	0,597
0,05	0,00372	0,02337	0,02738	0,159	0,08399	0,2647	0,600

3-й этап. В качестве демонстрационного примера был проанализирован аэрофотоснимок сельскохозяйственного опытного поля, расположенного в Меньковском филиале Агрофизического научно-исследовательского института, дата съемки: 02.07.2021 г., культура: яровая пшеница. После предварительной обработки (построение ортофотоплана и т. п., применялась программа Metashape) изображения территории проводились следующие действия (с помощью программы SAGA GIS):

- построение карты распределения вегетационного индекса NDVI на основе изображений в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах;
- уточнение контура поля – участки с тестовыми площадками были вырезаны, т. к. они могут существенно повлиять на геостатистические расчеты (на рис. 5 продемонстрирован результат построения);
- формирование выборки точек, равномерно распределенных по карте.

Для простоты анизотропия не учитывалась, вариограммный анализ осуществлялся с помощью средств программы SAGA GIS. Наилучшей аппроксимационной моделью оказалась экспоненциальная (табл. 1) со следующими параметрами: $c_0 = 0,010744$, $c = 0,012836$, $a = 0,00264$, $\zeta = 0,837$. В связи с тем, что размер поля существенно выше лага (ранга) вариограммы, значение ν принимается равным 1. Соответственно, решение принимается на основе показателя ζ . Как следует из полученных расчетов, наггет-дисперсия, характеризующая долю случайной изменчивости в общей картине неоднородности поля, достаточно велика (0,837), следовательно, лишь 16,3% вариабельности можно компенсировать применением дифференцированных технологий внесения азотсодержащих удобрений. Таким образом, на рассмотренном поле, несмотря на явную визуальную неоднородность, применение технологии ТЗ в период съемки представлялось неэффективным.

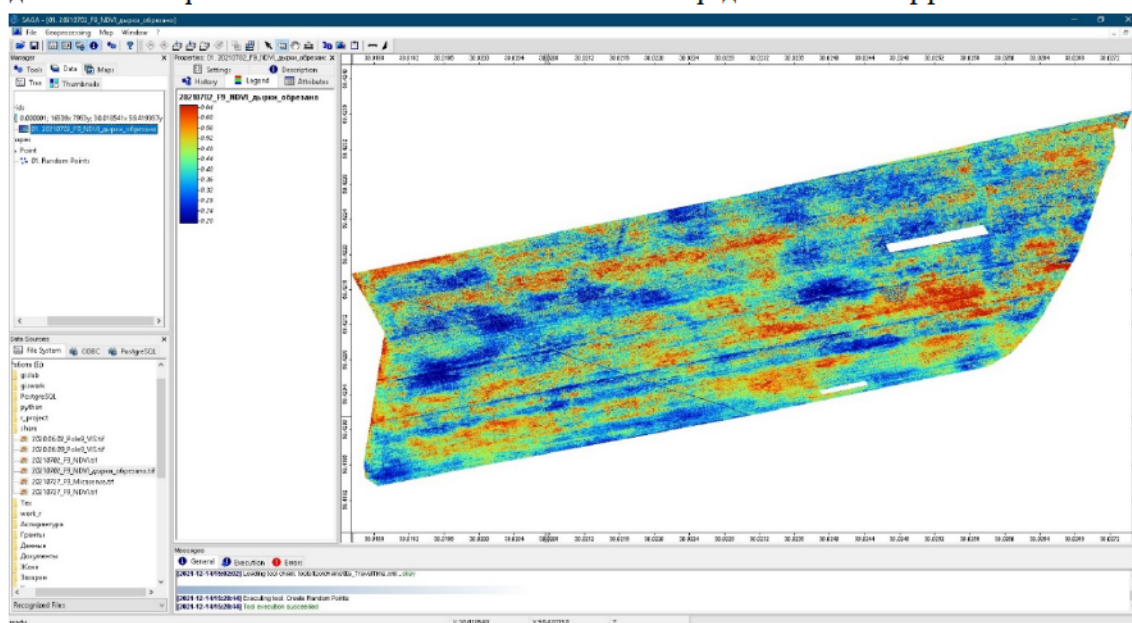


Рис. 5. Карта распределения NDVI на опытном сельскохозяйственном поле, расположенном на биополигоне АФИ (дата съемки: 02.07.2021 г., культура: яровая пшеница, фаза развития: трубкование)

Интенсификация дифференцированной агротехнологии

При выборе в качестве приоритетной агротехнологии точного земледелия возникает не менее актуальная задача определения необходимой дозы внесения агрохимиката на каждом элементарном участке сельскохозяйственного поля. В результате ее решения должна быть получена специализированная карта-задание, представляющая, по сути, наложенную на полигон сетку, где каждому квадрату задан конкретный уровень интенсификации агрооперации, размеры такого квадрата целесообразно определять исходя из параметров охвата разбрасывающей/опрыскивающей техники.

На базе биополигона АФИ с 2006 г. проводятся опыты, связанные с применением дифференцированных технологий внесения азотсодержащих удобрений. Предложенный подход основан на закладке опытных тестовых площадок (рис. 6) – небольших участков поля с известным уровнем обеспеченности растений азотом, которые

являются эталонами или обучающей выборкой при последующем интеллектуальном анализе данных. С помощью методов машинного обучения осуществляется контролируемая классификация изображения обследуемой сельскохозяйственной территории, в результате которой на каждом элементарном участке оценивается обеспеченность посевов азотом и принимается решение о необходимой дозе внесения удобрения. В качестве исходных данных ранее использовались снимки в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. С 2022 г. осваивается гиперспектральная камера PIKA L (281 канал), при помощи которой осуществляется съемка тестовых площадок. Наиболее распространенным и изученным вегетационным индексом, применяемым для определения обеспеченности растений азотом, является NDVI (Normalized difference vegetation index), однако даже у него есть несколько интерпретаций в зависимости от используемых каналов (табл. 5). При этом известно, что NDVI имеет высокую корреляцию с содержанием азота в листьях посевов (Cordero et al., 2020).

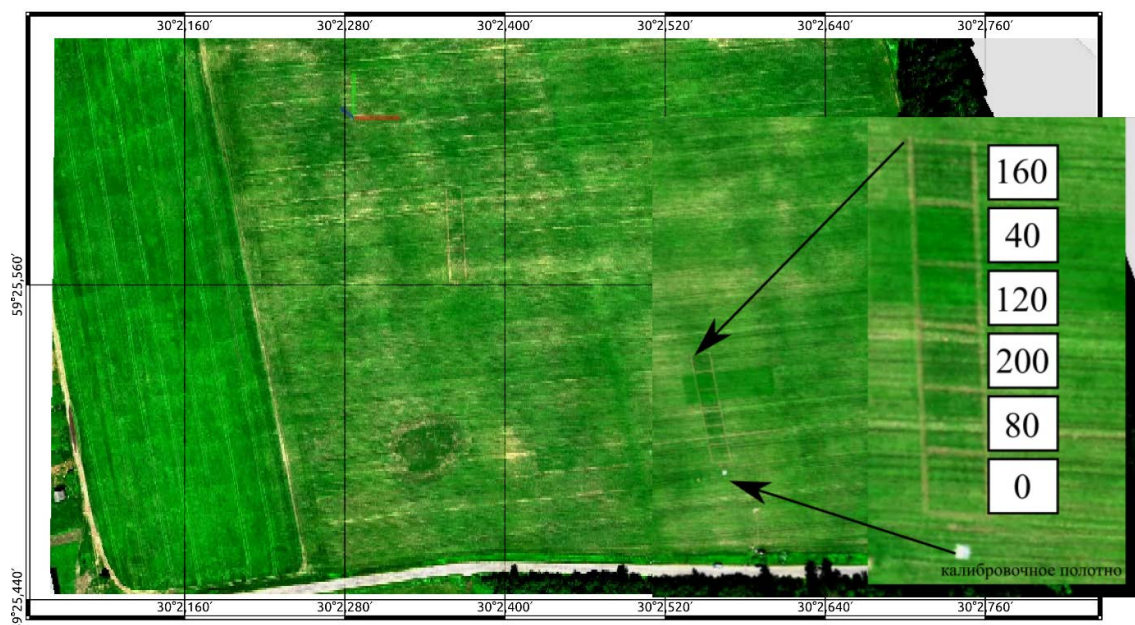


Рис. 6. Тестовые площадки, размещенные на поле № 26 биополигона АФИ (сезон 2022 г.), культура: яровая пшеница, фаза развития: трубкование

Таблица 5. Вегетационные индексы семейства NDVI

Вегетационный индекс	Формула
Green NDVI (Gitelson, Merzlyak, 1996)	$GNDVI = \frac{NIR_{850} - G_{580}}{NIR_{850} + G_{580}}$
Normalized difference vegetation index 780 – NDVI780 (Raun et al., 2001)	$NDVI_{780} = \frac{R_{780} - R_{670}}{R_{780} + R_{670}}$
Normalized difference vegetation index 850 – NDVI850 (Raun et al., 2001)	$NDVI_{850} = \frac{R_{850} - R_{651}}{R_{850} + R_{651}}$
Normalized difference vegetation index 761 – NDVI761 (Raun et al., 2001)	$NDVI_{761} = \frac{R_{761} - R_{651}}{R_{761} + R_{651}}$

На основе формул, представленных в табл. 5, по данным аэрофотосъемки, полученным 23.06.2022 г., были высчитаны вегетационные индексы для тестовых площадок поля № 26, на рис. 7 показаны результаты расчетов. На основе полученных графиков можно сформулировать следующие выводы:

- для данного сельскохозяйственного поля и культуры доза 200 кг действующего вещества на га является завышенной (при анализе методами математической статистики данный показатель необходимо исключить как выброс);
- прослеживается линейная связь между значениями вегетационных индексов и содержанием азота;
- все четыре индекса позволяют оценить уровень обеспеченности растений азотом на любом участке поля.

Дополнительно были построены линейные регрессии для всех четырех вегетационных индексов (табл. 6). На основе любого из полученных уравнений можно определить необходимый уровень интенсификации агротехнологии внесения азотсодержащего удобрения для каждого элементарного участка поля на момент съемки, все построения статистически значимы.

В качестве одного из направлений дальнейшей работы предстоит масштабное исследование, связанное как с поиском новых индексов, отражающих стрессовые состояния посевов, так и с анализом существующих. Необходимо в том числе сравнить эффективность и результативность использования различных индексов в задачах определения степени интенсификации агротехнологий на примерах зерновых культур.

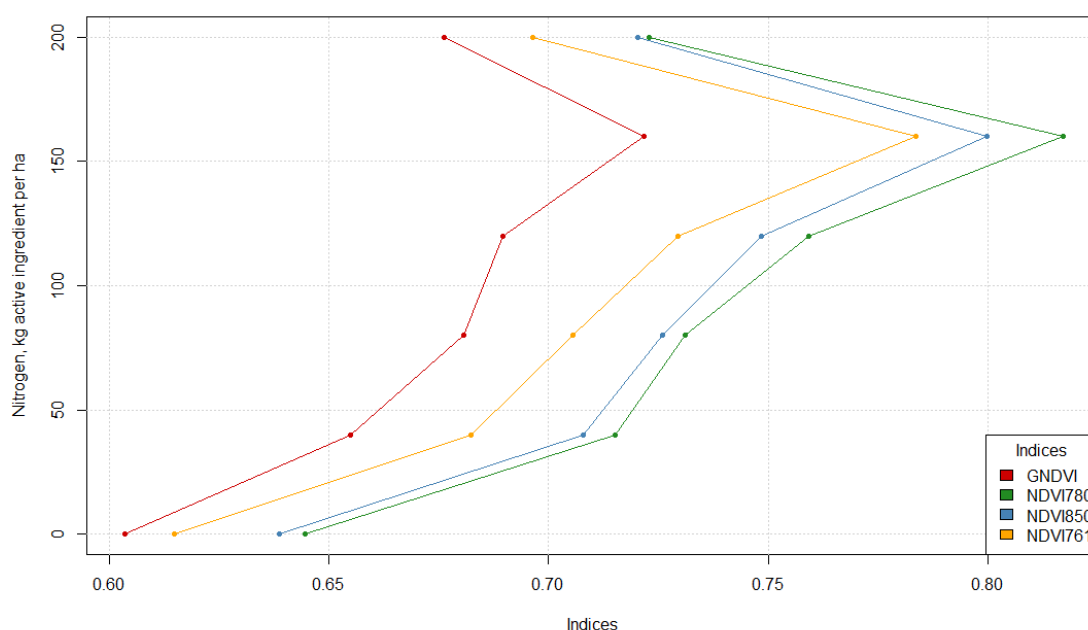


Рис. 7. Средние значения вегетационных индексов, полученные на основе гиперспектральной съемки тестовых площадок поля № 26 (дата съемки: 23.06.2022 г.), и соответствующие им дозы азотного удобрения

Таблица 6. Параметры регрессионного анализа (зависимости доз азотного удобрения от значений вегетационных индексов)

Уравнение	Уровень значимости коэффициента 1	Уровень значимости коэффициента 2	Коэффициент детерминации R ²	p-value
$N = 1408 \cdot CNDVI - 851,5$	0,001	0,002	0,81	0,001
$N = 1101,8 \cdot NDVI_{780} - 726,3$	0,0003	0,0006	0,86	0,0003
$N = 1158,6 \cdot NDVI_{850} - 754,2$	0,0004	0,0007	0,85	0,0004
$N = 1087,9 \cdot NDVI_{761} - 679,7$	0,0002	0,0005	0,87	0,0002

Реализация и перспективы масштабируемости

Для удобного и адаптированного под задачи растениеводства применения предложенного подхода в настоящее время ведется активная работа по автоматизации алгоритма вариограммного анализа – разработан прототип геостатистического модуля на

основе языка программирования R для последующего внедрения в мультидисциплинарный проект геоинформационной системы (рис. 8), которая объединит различные инструментальные и методологические решения задач точного земледелия. На первом этапе уже создана база экспериментальных геопространственных данных, разрабатывается

базовый веб-интерфейс, к которому будут подключаться модули, позволяющие обрабатывать опытную полевую информацию новыми методами. По мере совершенствования геоинформационной системы планируется ее включение в функционал Центра коллективного пользования (ЦКП) «ИКИ-Мониторинг» Института космических исследований

РАН (ИКИ РАН). В настоящее время ЦКП «ИКИ-Мониторинг» ИКИ РАН поддерживает более двадцати систем дистанционного мониторинга, которые созданы для изучения различных явлений и процессов, а также решения конкретных задач в научных или прикладных целях.

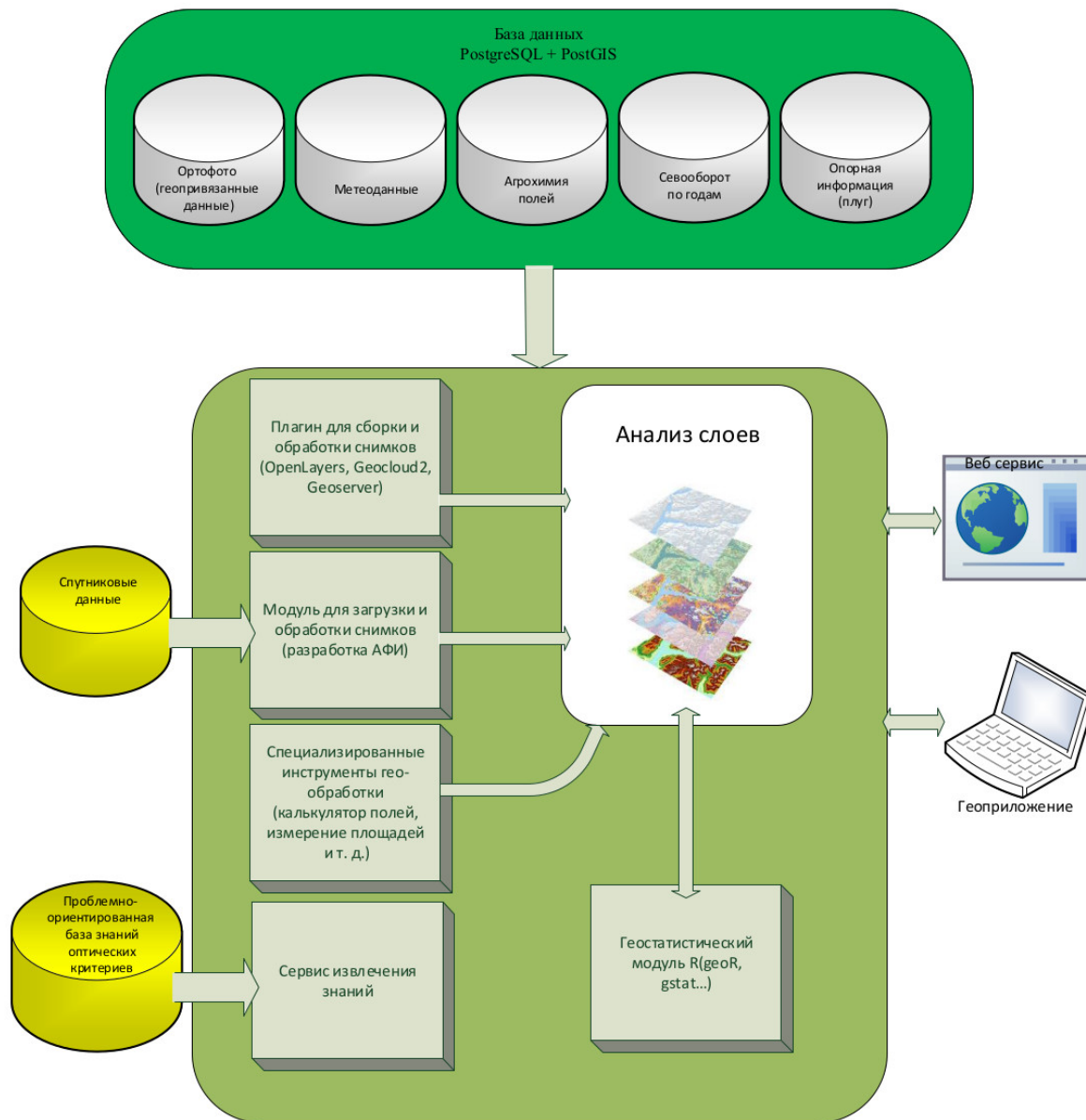


Рис. 8. Общая структура разрабатываемой геоинформационной системы

ВЫВОДЫ

Таким образом, предложенный подход, основанный на вариограммном анализе оптических характеристик растений, полученных с помощью данных дистанционного зондирования, представляется перспективным методом определения приоритетной агротехнологии внесения удобрений. Разрабатываемый автоматизированный инструмент позволит в короткие сроки принимать решение о выборе между интенсивной и высокоинтенсивной технологией на конкретном

сельскохозяйственном поле. С включением данного инструментария в функционал ЦКП «ИКИ-Мониторинг» ИКИ РАН беспрецедентно возрастут масштабы применения полученного результата в реальном секторе производства растениеводческой продукции.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

Список литературы

- Буре В. М., Петрушин А. Ф., Митрофанов Е. П., Митрофанова О. А., Денисов В. Опыт применения методов математической статистики для оценки состояния сельскохозяйственных растений // *Сельскохозяйственная биология*. 2019. Т. 54. № 1. С. 84–90.
- Гостев А. В. Эффективность технологий различного уровня интенсивности при возделывании зерновых культур на черноземных почвах Центрального Черноземья. Курск: ФГБНУ ВНИИЗиЗПЭ, 2017. 160 с.
- Демьянов В. В., Савельева Е. А. Геостатистика: теория и практика. М.: Ин-т проблем безопасности развития атомной энергетики РАН; Наука, 2010. 327 с.
- Матвеев Д. А., Воропаев В. В., Якушев В. В., Канаш Е. В., Блохина С. Ю., Блохин Ю. И., Петрушин А. Ф., Митрофанов Е. П. Формирование базы данных оптических характеристик посевов зерновых культур для выделения однородных зон управления в точном земледелии // *Агрофизика*. 2021. № 3. С. 35–45.
- Якушев В. П., Буре В. М., Митрофанова О. А., Митрофанов Е. П. Применение методов геостатистики для анализа целесообразности перехода к технологиям дифференцированного внесения агрохимикатов // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления*. 2020а. Т. 16. № 1. С. 31–40.
- Якушев В. П., Буре В. М., Митрофанова О. А., Митрофанов Е. П., Блохина С. Ю. 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.
- Якушев В. П., Буре В. М., Митрофанова О. А., Митрофанов Е. П., Петрушин А. Ф., Блохина С. Ю., Якушев В. В. Оценка внутриполевой изменчивости посевов с помощью вариограммного анализа спутниковых данных для точного земледелия // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2020б. Т. 17. № 2. С. 114–122.
- Afanasyev R. A. Use of the regularities of within-field variability of arable soil fertility in precision agrotechnologies // *Science Journal of Volgograd State University. Natural sciences*. 2015. Vol. 11. No. 1. pp. 42–51.
- Bacenetti J., Paleari L., Tartarini S., Vesely F.M., Foi M., Movedi E., Ravasi R.A., Bellopede V., Durello S., Ceravolo C., Amicizia F., Confalonieri R. May smart technologies reduce the environmental impact of nitrogen fertilization? A case study for paddy rice // *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 715. 136956.
- Cordero E., Longchamps L., Khosla R., Sacco D. Joint measurements of NDVI and crop production data-set related to combination of management zones delineation and nitrogen fertilization levels // *Data in Brief*. 2020. Vol. 28. 104968.
- Drechsel P., Heffer P., Magen H., Mikkelsen R., Wichelns D. (Eds.). Managing water and fertilizer for sustainable agricultural intensification. Paris, France: IFA, IWMI, IPNI and IPI, 2015. 270 p.
- Gitelson A.A., Merzlyak M.N. Signature analysis of leaf reflectance spectra: Algorithm development for remote sensing of chlorophyll // *Journal of Plant Physiology*. 1996. Vol. 148. pp. 494–500.
- Jiang Q.X., Fu Q., Wang Z.L. Research on precision irrigation in Western Semiarid Area of Heilongjiang province in China based on GIS // *IFIP International Federation for Information Processing, Volume 258; Computer and Computing Technologies in Agriculture*. 2008. Vol. 1. pp. 359–370.
- Kerry R., Oliver M.A. Determining nugget: sill ratios of standardized variograms from aerial photographs to krige sparse soil data // *Precision Agriculture*. 2008. Vol. 9. pp. 33–56.
- 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. pp. 562–590.
- Moustafa M.M., Yomota A. Use of a covariance variogram to investigate influence of subsurface drainage on spatial variability of soil-water properties // *Agricultural Water Management*. 1998. Vol. 37. pp. 1–19.
- Raun W.R., Solie J.B., Johnson G.V., Stone M.L., Lukina E.V., Thomason W.E., Schepers J.S. In-season prediction of potential grain yield in winter wheat using canopy reflectance // *Agronomy Journal*. 2001. Vol. 93. pp. 131–138.
- Shit P.K., Bhunia G.S., Maiti R. Spatial analysis of soil properties using GIS based geostatistics models // *Model. Earth Syst. Environ*. 2016. Vol. 2. pp. 107.
- Tisseyre B., Leroux C., Pichon L., Geraudie V., Sari T. How to define the optimal grid size to map high resolution spatial data? // *Precision Agriculture*. 2018. Vol. 19. pp. 957–971.
- 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.
- Yan L., Zhou S., Ci-fang W., Feng L., Hong-yi L. Optimised spatial sampling scheme for soil electrical conductivity based on variance quad-tree (VQT) method // *Agricultural Sciences in China*. 2007. Vol. 12. No. 6. pp. 463–471.

References

- Bure V. M., Petrushin A. F., Mitrofanov Ye. P., Mitrofanova O. A., Denisov V. Opyt primeneniya metodov matematicheskoy statistiki dlya otsenki sostoyaniya sel'skokhozyaystvennykh rasteniy [Experience with the use of mathematical statistics methods for assessment of agricultural plants state] // *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya*, 2019, vol. 54, no. 1, pp. 84–90.
- Gostev A. V. *Effektivnost' tekhnologiy razlichnogo urovnya intensivnosti pri vozdeleyvanii zernovykh kul'tur na chernozemnykh pochvakh Tsentral'nogo Chernozem'ya* [Efficiency of technologies of different levels of intensity in the cultivation of grain crops on chernozem soils of the Central Chernozem region]. Kursk: FGBNU VNIIZiZPE, 2017, 160 p.

- Dem'yanov V. V., Savel'yeva Ye. A. *Geostatistika: teoriya i praktika* [Geostatistics: theory and practice]. Moscow: Institute of Problems of Safety in the Development of Nuclear Power Engineering of the Russian Academy of Sciences; Nauka, 2010, 327 p.
- Matveyenko D. A., Voropayev V. V., Yakushev V. V., Kanash Ye. V., Blokhina S. Yu., Blokhin Yu. I., Petrushin A. F., Mitrofanov Ye. P. Formirovaniye bazy dannykh opticheskikh kharakteristik posevov zernovykh kul'tur dlya vydeleniya odnorodnykh zon upravleniya v tochnom zemledelii [Formation of a database of crop canopy optical characteristics for identification of homogeneous management zones in precision agriculture] // *Agrofizika*, 2021, no. 3, pp. 35–45.
- Yakushev V. P., Bure V. M., Mitrofanova O. A., Mitrofanov Ye. P. Primeneniye metodov geostatistiki dlya analiza tselesoobraznosti perekhoda k tekhnologiyam differentsirovannogo vneseniya agrokhimikatov [The use of geostatistical methods to analyze the transition feasibility to the differential application of agrochemicals technologies] // *Vestnik Sankt-Petersburgskogo universiteta. Prikladnaya matematika. Informatika. Protsessy upravleniya*, 2020a, vol. 16, no. 1, pp. 31–40.
- Yakushev V. P., Bure V. M., Mitrofanova O. A., Mitrofanov Ye. P., Blokhina S. Yu. Osobennosti obrabotki aerokosmicheskikh snimkov dlya optimizatsii geostatisticheskikh issledovaniy vnutripolevoy izmenchivosti v zadachakh tochnogo zemledeliya [The specifics of aerospace image processing to optimize geostatistical approaches to within-field variability estimation in precision agriculture] // *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, vol. 18, no. 4, pp. 128–139.
- Yakushev V. P., Bure V. M., Mitrofanova O. A., Mitrofanov Ye. P., Petrushin A. F., Blokhina S. Yu., Yakushev V. V. Otsenka vnutripolevoy izmenchivosti posevov s pomoshch'yu variogrammnogo analiza sputnikovykh dannykh dlya tochnogo zemledeliya [Within-field variability estimation based on variogram analysis of satellite data for precision agriculture] // *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020b, vol. 17, no. 2, pp. 114–122.
- Afanasyev R. A. Use of the regularities of within-field variability of arable soil fertility in precision agrotechnologies // *Science Journal of Volgograd State University. Natural sciences*. 2015. Vol. 11. No. 1. pp. 42–51.
- Bacenetti J., Paleari L., Tartarini S., Vesely F.M., Foi M., Movedi E., Ravasi R.A., Bellopede V., Durello S., Ceravolo C., Amicizia F., Confalonieri R. May smart technologies reduce the environmental impact of nitrogen fertilization? A case study for paddy rice // *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 715. 136956.
- Cordero E., Longchamps L., Khosla R., Sacco D. Joint measurements of NDVI and crop production data-set related to combination of management zones delineation and nitrogen fertilization levels // *Data in Brief*. 2020. Vol. 28. 104968.
- Drechsel P., Heffer P., Magen H., Mikkelsen R., Wichelns D. (Eds.). *Managing water and fertilizer for sustainable agricultural intensification*. Paris, France: IFA, IWMI, IPNI and IPI, 2015. 270 p.
- Gitelson A.A., Merzlyak M.N. Signature analysis of leaf reflectance spectra: Algorithm development for remote sensing of chlorophyll // *Journal of Plant Physiology*. 1996. Vol. 148. pp. 494–500.
- Jiang Q.X., Fu Q., Wang Z.L. Research on precision irrigation in Western Semiarid Area of Heilongjiang province in China based on GIS // *IFIP International Federation for Information Processing, Volume 258; Computer and Computing Technologies in Agriculture*. 2008. Vol. 1. pp. 359–370.
- Kerry R., Oliver M.A. Determining nugget: sill ratios of standardized variograms from aerial photographs to kriging sparse soil data // *Precision Agriculture*. 2008. Vol. 9. pp. 33–56.
- 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. pp. 562–590.
- Moustafa M.M., Yomota A. Use of a covariance variogram to investigate influence of subsurface drainage on spatial variability of soil-water properties // *Agricultural Water Management*. 1998. Vol. 37. pp. 1–19.
- Raun W.R., Solie J.B., Johnson G.V., Stone M.L., Lukina E.V., Thomason W.E., Schepers J.S. In-season prediction of potential grain yield in winter wheat using canopy reflectance // *Agronomy Journal*. 2001. Vol. 93. pp. 131–138.
- Shit P.K., Bhunia G.S., Maiti R. Spatial analysis of soil properties using GIS based geostatistics models // *Model. Earth Syst. Environ*. 2016. Vol. 2. pp. 107.
- Tisseyre B., Leroux C., Pichon L., Geraudie V., Sari T. How to define the optimal grid size to map high resolution spatial data? // *Precision Agriculture*. 2018. Vol. 19. pp. 957–971.
- 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.
- Yan L., Zhou S., Ci-fang W., Feng L., Hong-yi L. Optimised spatial sampling scheme for soil electrical conductivity based on variance quad-tree (VQT) method // *Agricultural Sciences in China*. 2007. Vol. 12. No. 6. pp. 463–471.