

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Агрофизический научно-исследовательский институт»



ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДИСТАНЦИОННОЙ И НАЗЕМНОЙ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ВНУТРИПОЛЕВОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ДЛЯ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

2023

УДК 631.58.551.5

Якушев В. П., Блохин Ю. И., Блохина С. Ю., Буре В. М., Канаш Е. В., Матвеев Д. А., Митрофанов Е. П., Митрофанова О. А., Петрушин А. Ф., Якушев В. В.

Теоретические основы дистанционной и наземной количественной оценки внутриполевой изменчивости для точного земледелия. СПб.: АФИ, 2023. – 76 с.

Р е ц е н з е н т ы :

Усков И. Б. главный научный сотрудник лаборатории агроклимата АФИ,
член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук,
профессор

Труфляк Е. В. заведующий кафедрой эксплуатации машинно-транспортного парка
ФГБОУ ВО «Кубанский ГАУ им. И. Т. Трубилина», руководитель
центра прогнозирования и мониторинга научно-технологического
развития АПК в области точного сельского хозяйства, автоматизации и
роботизации, доктор технических наук, профессор

В работе представлены результаты, полученные научным коллективом в рамках реализации проекта РФФИ № 19-29-05184-мк по направлению междисциплинарных фундаментальных исследований по теме «Разработка теоретических основ дистанционной и наземной количественной оценки внутриполевой изменчивости для точного земледелия». Изложены теоретические, методические и алгоритмические основы выявления внутриполевой изменчивости для целей точного земледелия. Создан функционал для реализации двух новых методов обнаружения и выделения границ внутриполевой изменчивости по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Один из них использует инструментальный вариограммного анализа, а другой базируется на комплексной оценке динамики изменения оптических характеристик посева. Дана оценка перспективам применения и масштабируемости полученных результатов в современном земледелии. Публикация осуществлена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-29-05184-мк.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. МЕТОДЫ И ПОДХОДЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТА	7
1.1 Вариограммный анализ в количественной оценке пространственной неоднородности агроландшафтов для точного земледелия.....	8
1.1.1. Практика использования геостатистических исследований в сельскохозяйственной науке	8
1.1.2. Теоретические основы вариограммного анализа	9
1.1.3. Особенности и специфика использования метода при анализе данных дистанционного зондирования.....	13
1.1.4. Вычислительные эксперименты, демонстрирующие эффективность выявления пространственной неоднородности при анализе космических и аэрофотоснимков сельскохозяйственных полей	20
1.1.5. Инструментарий для автоматизации построения эмпирических вариограмм и их аппроксимаций для функционального описания и аналитического выявления внутриполевой изменчивости	28
1.1.5.1. Геостатистический модуль для автоматизации предложенного подхода	29
1.2. Диагностика физиологического состояния посевов по динамике изменения их оптических характеристик	34
1.2.1. Методы диагностики в полевых условиях и описание наиболее перспективных индексов для комплексной оценки физиологического состояния посевов	35
1.2.1.1. Условия выращивания растений в поле	35
1.2.1.2. Стадии развития растений и погодные условия при выполнении измерений спектральных характеристик диффузного отражения листьев.....	35
1.2.1.3. Регистрация спектров отражения листьев и индексы отражения	36
1.2.1.4. Регистрация температуры растительного покрова яровой пшеницы с помощью тепловизора	38
1.2.1.5. Оценка оптических характеристик листьев яровой пшеницы при дефиците азота и воды в контролируемых условиях	38
1.2.1.6. Статистическая обработка результатов	39
1.2.2. Спектральные характеристики диффузного отражения листьев яровой и озимой пшеницы на разных стадиях развития в зависимости от уровня азотного питания.....	39

1.2.3. Влияние почвенной засухи на спектральные характеристики диффузного отражения листьев растений, вегетирующих при различном уровне азотного питания	42
1.2.4. Базовый алгоритм обнаружения и выделения внутриполевой неоднородности ...	45
1.2.5. Программная реализация базового алгоритма	48
1.2.5.1. Формализация и хранение формул расчета различных индексов отражения.....	50
1.2.5.2. Расчет индексов отражения по заданному оптическому критерию и фазе развития посева	52
2. НАУЧНАЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФРАСТРУКТУРА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТА	55
2.1. Объекты и методологические основы организации полевых исследований	55
2.1.1 Роль тестовых площадок	56
2.2. Геопространственная база разнородных данных	59
2.2.1. Научно-методические основы и инструментарий для создания БД	59
2.2.1.1. Первичная обработка, накопление и хранение космических и аэрофотоснимков	60
2.2.1.2. Структура и содержание созданной БД	63
2.3. Применение систем измерения и передачи опорной гидротермической и метеорологической информации для интерпретации аэрокосмических снимков и формирования базы данных	65
3. ПЕРСПЕКТИВЫ МАСШТАБИРОВАНИЯ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ	68
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	70
Список литературы	72

ВВЕДЕНИЕ

Точное земледелие (ТЗ) – мировой тренд адаптации агротехнологий к внутриполевой изменчивости условий роста и развития посевов. От складывающейся на конкретном поле неоднородности и степени ее интенсивности зависит урожайность культур. Принципиальное отличие ТЗ от традиционной агрономии заключается в дифференциации технологических воздействий в соответствии с внутриполевой изменчивостью условий формирования урожая. Поэтому, наряду с недофинансированием и кадровым дефицитом, фундаментальной проблемой перехода к ТЗ является необходимость разработки теории и более современных методов обнаружения и количественной оценки степени интенсивности внутриполевой неоднородности и ее пространственного распределения по заданному сельскохозяйственному полю. Наиболее широкое практическое применение при решении данной задачи в настоящее время получили методы, основанные на автоматизации процесса отбора почвенных и/или растительных образцов с навигационным обеспечением и геоинформационной интерпретацией полученных данных. Наряду с существенными материальными и временными затратами, такой подход имеет принципиальный недостаток, который заключается в том, что все выводы делаются на основе дискретных значений отобранных образцов, и у производителей растениеводческой продукции возникает множество вопросов: сколько образцов следует отбирать, с какой площади, с каким шагом, в какой степени пространственное варьирование будет учтено при выбранной схеме отбора проб и определенных по ним в лаборатории показателях почвенного плодородия. Перспективным методом сплошной оценки состояния посевов и среды их обитания объективно становится дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ). Космические снимки позволяют получать информацию с одновременным охватом значительных площадей, что практически невозможно осуществить при проведении наземных исследований.

Целями настоящего проекта являются развитие теоретических геостатистических исследований для обоснования применимости технологий ТЗ на заданной сельскохозяйственной территории и разработка методического, алгоритмического и программного обеспечения количественной оценки пространственной изменчивости условий формирования урожая с выделением границ внутриполевой неоднородности на основе комплексного использования данных дистанционного зондирования (ДДЗ), наземных измерений и опорной информации.

В разделе 1.1 рассмотрены методология и опыт применения вариограммного анализа аэрокосмических снимков. В силу значительной территории нашей страны и возрастающей доступности аэрокосмических данных такому подходу в информационном обеспечении ТЗ

нет альтернативы. Метод позволяет функционально описать пространственную структуру варьирующихся показателей на сельскохозяйственном поле, выявить тренды их изменения, установить степень неоднородности по параметрам нормированной модели вариограмм и исходя из них определить целесообразность (или нецелесообразность) применения ТЗ на исследуемой территории. В настоящее время отечественные исследования по использованию вариограммного анализа ДДЗ практически отсутствуют. За рубежом они ведутся, однако в известных работах по ТЗ в качестве входных данных, как правило, используются не ДДЗ, а экспериментальная информация, полученная при помощи наземных измерительных систем. Кроме того, в принципе отсутствуют работы, в которых используется методология сопряженного применения геостатистики и оптических критериев для выявления зон неоднородности, степени ее интенсивности и определения норм дифференцированных технологических воздействий (например, доз азотных подкормок).

В разделе 1.2 рассмотрена диагностика физиологического состояния посевов по динамике изменения оптических индексов отражения. Радиация, отраженная листьями и другими фитоэлементами, несет полную информацию о биохимическом составе, физиологическом состоянии растений и позволяет по спектральным характеристикам оценить реакцию растений на действия различных стрессоров. Выявлены и описаны наиболее перспективные индексы для диагностики физиологического состояния растений. Впервые определены корреляционные связи между дистанционно измеренными оптическими характеристиками посева и спектральными характеристиками диффузного отражения листьев в условиях трехлетнего полевого опыта, а также показана зависимость оптических характеристик различных индексов от густоты стояния растений и, в наибольшей степени, от дозы внесенных азотных удобрений на тестовых площадках по фазам развития яровой пшеницы. Диффузное отражение листьев, регистрируемое контактным спектрометром, позволяет вычислить значения информативных индексов отражения. По ним определяются содержание фотосинтетических пигментов, наличие в тканях антоцианов, флавоноидов, воды и в целом оценивается активность процессов фотосинтеза. Полученные результаты послужили научным обоснованием разработки базового алгоритма обнаружения и выделения границ внутриполевой изменчивости по оптическим критериям индексов отражения и гиперспектральным снимкам. Программная реализация данного алгоритма позволяет выявлять действия различных стрессоров (апробировано в условиях дефицита азотного питания и воды), угнетающих растения, с фиксацией границ их негативного влияния на заданном сельскохозяйственном поле.

В разделе 2 рассмотрена научная и технологическая инфраструктура, используемая при реализации проекта. Представлена концептуальная схема проведения полевых комплексных

исследований по выявлению идентификационных показателей оценки состояния посевов на основе сопряженных дистанционных и наземных измерений. Подчеркнута роль тестовых площадок в планировании и проведении полевых опытов. На них физически моделируются стрессовые и благоприятные условия для роста растений. Для систематизации, хранения и обеспечения доступа к разнородной информации разработана структура и создан инструментальный интерфейс формирования геопространственной базы данных. Приведены характеристики оборудования для получения аэрофотоснимков и продемонстрирована реализация инструментального контроля за динамикой гидротермического состояния почвы в режиме реального времени с помощью беспроводных сенсорных систем.

В разделе 3 рассмотрена перспектива масштабирования результатов, полученных научным коллективом в рамках реализации проекта.

1. МЕТОДЫ И ПОДХОДЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТА

Научно-технологический прорыв в сельскохозяйственном производстве определяется не только техническим и ресурсным оснащением хозяйствующих субъектов, но и уровнем информационного обеспечения. Эффективным подходом к информационному обеспечению точного земледелия (ТЗ) является количественная оценка внутриполевой неоднородности, поскольку технологии ТЗ основаны на результатах исследования внутриполевой неоднородности распределения тех или иных управляемых агроэкологических параметров, влияющих на продуктивность возделываемой культуры. Например, степень варьирования потребности посева в азоте определяет эффективность проведения дифференцированных подкормок. Для проведения таких подкормок строится электронная карта-задание на дифференцированное внесение агрохимиката при помощи прецизионной сельскохозяйственной техники [1]. Однако многие сельскохозяйственные производители не практикуют технологии ТЗ из-за недостатка знаний и финансовых возможностей. Действительно, для перехода к дифференцированному внесению агрохимикатов необходимы затраты на переоборудование техники и обучение сотрудников. При этом преимущества перехода к технологиям точного земледелия продемонстрированы в многочисленных исследованиях, которые подтвердили экономическую и экологическую эффективность их применения [2–6]. В ряде работ данный вопрос изучался с учетом вариабельности параметров почвы [7, 8], а также возможностей наземных мобильных информационно-измерительных комплексов, оснащенных навигационным оборудованием и специализированным программным обеспечением, позволяющим автоматизировать процессы обследования сельскохозяйственных полей и выделения на них границ и уровней варьирования агрохимических и агрофизических показателей [9].

В данном разделе рассмотрены два новых метода определения внутриполевой неоднородности. Один из них использует главный геостатистический инструментарий – вариограммный анализ, а другой базируется на комплексной оценке физиологического состояния посевов на основе динамики изменения их оптических характеристик.

1.1. Вариограммный анализ в количественной оценке пространственной неоднородности агроландшафтов для точного земледелия

Геостатистический анализ – перспективный инструментарий для решения задач точного земледелия, позволяющий исследовать внутриполевую пространственную структуру распределения различных параметров почвы и растений. Внутриполевая пространственная неоднородность широко изучается с момента возникновения точного земледелия (ТЗ). 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 посредством создания карт-заданий, учитывающих ее интенсивность и границы изменчивости, для последующего пространственно-дифференцированного управления. Такие электронные карты главным образом создаются на основе тех агрономических показателей, которые характеризуются относительно более высокой степенью пространственной изменчивости и легче поддаются управлению.

1.1.1. Практика использования геостатистических исследований в сельскохозяйственной науке

Исследования в области пространственной статистики (геостатистики) берут начало с экспериментов по оценке неоднородности сельскохозяйственных полей [10, 11]. Данные эксперименты были основаны на предположении, что внутриполевую дисперсию (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 [12–15]. Cambardelle index, Opportunity index, или Technical opportunity indices, получены с применением вариограммы – инструмента, широко используемого в пространственной статистике [16]. Существует ряд зарубежных исследований, в которых анализ значений относительной наггет-дисперсии и индекса Камбарделла использовался для решения следующих актуальных задач точного земледелия: изучение внутриполевой неоднородности

[17, 18], мониторинг мелиоративных систем и применение прецизионных ирригационных систем [19, 20], определение оптимального размера сетки для отображения пространственных данных высокого разрешения [21] и др. Особо следует отметить работу [8], в которой с помощью анализа значений относительной нагдет-дисперсии определялась целесообразность применения технологий точного земледелия на небольших полях во Фландрии. Однако во всех перечисленных работах в качестве экспериментальных данных использовались только различные почвенные характеристики. Кроме того, отсутствует обобщенная апробированная методика применения геостатистики для оперативного принятия решений о применении прецизионных технологий на конкретной сельскохозяйственной территории.

Вариограммный анализ является эффективным методом, позволяющим охарактеризовать структуру пространственной изменчивости данных о состоянии почвы или растений [22–28]. Он широко применяется для улучшения классификации изображений [29–31], пространственной интерполяции характеристик пикселей снимков [32–35], выбора оптимальной схемы отбора проб [36], 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 [37].

1.1.2. Теоретические основы вариограммного анализа

Для описания статистической структуры исследуемого параметра Z используется полувариограмма (или просто вариограмма) [38]:

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

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

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

где $N(\vec{h})$ – число пар экспериментальных точек, разделенных вектором $\vec{h}$. Для простоты в дальнейшем будем предполагать, что анизотропия отсутствует (анализ проводится без учета направления), соответственно, векторная величина $\vec{h}$ заменяется на ее абсолютное значение $h = |\vec{h}|$.

На рис. 1 схематично представлен график вариограммы, где отображены ее основные компоненты: самородок c_0 – величина вариограммы при $h = 0$; порог $c = c_0 + c_1$ – предельное значение вариограммы (если оно достигается); ранг a – расстояние, на котором оно достигается.

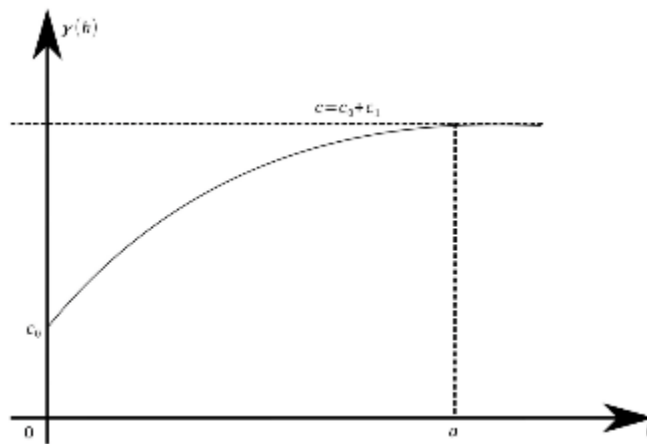


Рис. 1. Основные компоненты вариограммы (сферическая модель)

На следующем этапе вариограммного анализа необходимо на базе полученной экспериментальной вариограммы построить ее теоретическую модель. Ниже приведены основные аппроксимационные модели.

1. Сферическая модель:

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

2. Экспоненциальная модель:

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

3. Гауссова модель:

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

4. Модель с эффектом дырок (скважинный эффект):

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

Следует также кратко упомянуть о геостатистической модели неоднородности территории. Пространственную вариабельность исследуемого параметра Z на заданном сельскохозяйственном поле можно представить в виде суммы трех составляющих [39]:

$$z(\vec{r}) = m(\vec{r}) + s(\vec{r}) + \varepsilon(\vec{r}), \quad (3)$$

где $z(\vec{r})$ – поле точечных значений параметра Z радиуса-вектора $\vec{r}$. Первая составляющая $m = m(\vec{r})$ называется макрокомпонентой, отражающей низкочастотные пространственные изменения параметра, связанные, как правило, с особенностями ландшафта. Вторая составляющая $s = s(\vec{r})$ называется мезокомпонентой, описывающей изменчивость параметра в пределах масштаба сельскохозяйственного поля. Третья компонента $\varepsilon = \varepsilon(\vec{r})$ называется

микрокомпонентой, характеризующей случайную микромасштабную вариабельность параметра. Микрокомпонента, по сути, представляет пространственно некоррелированный случайный шум с нулевым средним и неизменной в пределах поля конечной дисперсией, известной в геостатистике как наггет-дисперсия.

В основе предложенного метода лежит геостатистическая модель (3). Для того чтобы переход к технологиям прецизионного производства растениеводческой продукции был оправдан, необходимо, чтобы внутриполевое варьирование агроэкологических показателей вносило существенный вклад в общую картину неоднородности конкретной сельскохозяйственной территории. То есть, если выраженная неоднородность на 90 % определяется вариабельностью средних условий на отдельных полях и лишь на 10 % связана с внутриполевой изменчивостью данных условий, то применение технологий точного земледелия нецелесообразно.

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

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

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

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

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

В данном случае μ можно условно назвать масштабом поля, который зависит не только от его физических размеров, но и от особенностей статистической структуры исследуемого параметра (а именно от ранга a). При этом в качестве h здесь выступает не шаг построений, а характерный размер конкретного поля (рис. 2).

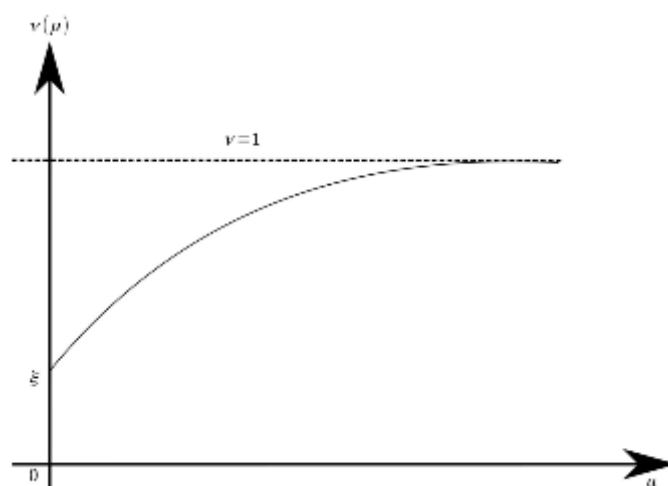


Рис. 2. Общий вид нормированной вариограммы

Введем еще один важный показатель:

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

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

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

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

Таким образом, рассматриваемый подход можно условно представить в виде следующей последовательности вычислительных шагов.

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 (варианты дополнительно 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 $\nu(\mu)$, параметров μ , θ – описание также продемонстрировано в табл. 1.

Этап 4. Анализ расчетов и принятие решения. Значение $v(\mu)$ 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 .

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

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

1.1.3. Особенности и специфика использования метода при анализе данных дистанционного зондирования

Данные со спутников [40], а также с бортовых датчиков, установленных на сельскохозяйственной технике [41–43] и беспилотных летательных аппаратах [44], позволяют очень точно охарактеризовать различные агрономические показатели. Однако при использовании полученных данных возникают новые вопросы, в том числе такой: как эффективно обрабатывать большие объемы исходной информации, которые непрерывно

увеличиваются? Например, объем информации, получаемой при гиперспектральной съемке, в пределах одного условного кадра может составлять от 0,4 до ~5,3 Гб [45]. 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 связи с этим дополнительной задачей настоящей работы являлось описание подхода к оценке целесообразности предварительной обработки аэрокосмических снимков посевов в зависимости от их пространственного разрешения для уменьшения объема исходных данных до оптимального. Апробация разработки осуществлена на примере решения одной из важнейших задач ТЗ, связанной с определением экономически оправданного момента перехода к прецизионным технологиям внесения агрохимикатов на основе вариограммного анализа внутриполевой изменчивости оптических характеристик растений.

Объектом исследований являлись спутниковые снимки опытных полей полигона АФИ, полученные с помощью космических аппаратов Sentinel-2A и Landsat 8, а также данные аэрофотосъемки указанной территории. Получение соответствующих изображений осуществлялось при помощи беспилотной авиационной системы Геоскан-401, оснащенной мультиспектральной камерой RedEdge-MX высокого пространственного разрешения. Для сравнения в табл. 2 представлены основные характеристики аппаратуры дистанционного зондирования, а в табл. 3 показана связь между пространственным разрешением съемки местности и количеством пикселей на 1 га изображения. Из табл. 3 видно, что при использовании съемочной аппаратуры высокого разрешения резко возрастает количество пикселей, отображающих отснятую территорию. Как следствие, задача проведения вариограммного анализа по данным таких снимков усложняется из-за большого объема исходной информации и недостаточной мощности обычных компьютеров. При ее решении возникает очевидный вопрос: можно ли уменьшить объем данных снимка до такого, который обеспечит проведение геостатистических исследований при существенном сокращении времени вычислений и сохранении качества полученного результата?

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 [46] экспериментальных измерений, распределенных в опыте на площади 2–3 га, является достаточным количеством для вариограммного анализа.

Таблица 2. Основные характеристики аппаратуры дистанционного зондирования

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	зеленый	560,0	10 м
	4	красный	664,5	10 м
	5	вегетационный красный край	703,9	20 м
	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	зеленый	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 RedEdge-MX	1	синий	475	8 см
	2	зеленый	560	8 см
	3	красный	668	8 см
	4	красный край	717	8 см
	5	ближний ИК	840	8 см

В полевых условиях получение такого объема данных является трудоемким и дорогостоящим процессом. Это явилось одной из причин недостаточного использования методов геостатистики в аграрной науке России. Использование данных ДЗЗ существенно повышает потенциал их применения в вариограммном анализе и открывает возможности для обоснования технологий ТЗ. Приведенные в табл. 2 и 3 данные свидетельствуют о целесообразности включения всех пикселей при вариограммном анализе спутниковых снимков низкого пространственного разрешения без дополнительной обработки.

Таблица 3. Зависимость детализации съемки 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

Методика обоснования целесообразности предварительного уменьшения объема данных снимков высокого разрешения базируется на анализе эмпирических вариограмм и их нормированных аппроксимаций, функционально описывающих статистическую структуру варьирования агроэкологического параметра на сельскохозяйственном поле и построенных на основе различных объемов исходных данных конкретного изображения. Ранее было продемонстрировано, что целесообразность перехода к технологиям ТЗ в каждом конкретном случае зависит от соотношения мезо- и микрокомпоненты, 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 к технологиям ТЗ может решаться только на основе значения наггет-дисперсии [47], которая определяет долю микрокомпоненты в общей неоднородности сельскохозяйственного поля. Это следует из того, что с увеличением площади поля его неоднородность все в большей степени определяется мезокомпонентой, в то время как доля микрокомпоненты в общей картине неоднородности постепенно снижается, то есть чем меньше величина наггет-дисперсии, тем перспективнее изучаемое поле для применения на нем 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 объема исходной информации до оптимального.

В качестве примера апробации методики, предназначенной для оценки возможности уменьшения количества пикселей снимка высокого разрешения, рассмотрим задачу обоснования применения прецизионных технологий на конкретной сельскохозяйственной территории с помощью вариограммного анализа и наггет-дисперсии (п. 1.2). В рамках данной задачи исходной информацией для анализа избыточности данных ДЗЗ являются аэрофотоснимки высокого разрешения, полученные, как было указано выше, с помощью

системы Геоскан-401, оснащенной мультиспектральной камерой. Изображения предварительно обрабатываются с использованием программ GeoScan Planner и PhotoScan. Данные для геопривязки передаются во время полета по радиомодему и регистрируются программой GeoScan Planner. После посадки создаются файлы привязки для дальнейшей обработки в программе PhotoScan. Последующая обработка данных производится в программе PhotoScan (проверка снимков, выравнивание изображений, построение ортофотоплана и т. п.).

Для повышения эффективности обработки аэрофотоснимка необходимо учитывать не все пиксели изображения, а только сокращенную выборку равномерно распределенных точек. Для получения предварительных выводов проведен эксперимент, позволяющий наглядно сравнить влияние процента пикселей, используемых при расчете экспериментальной вариограммы. В качестве примера были взяты два ортофотоплана поля № 9 (дата съемки: 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. Для эксперимента был вырезан участок карты, соответствующий площади 4,825 га (рис. 3). Все построения выполнены с помощью программы SAGA GIS. Общее число пикселей на получившемся снимке составило около 4 млн.

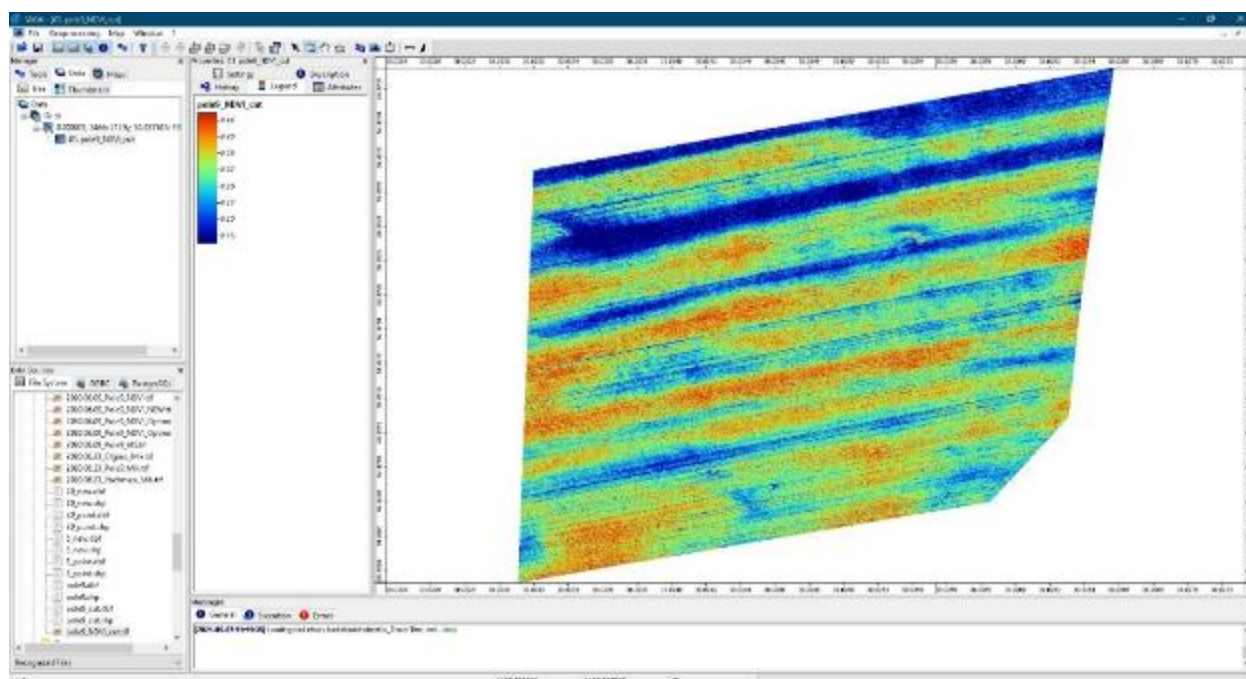


Рис. 3. Карта распределения вегетационного индекса NDVI для выделенного участка опытного поля № 9 (дата съемки: 9 июня 2020 г.)

Для сравнения были построены экспериментальные вариограммы без учета анизотропии для различного количества равномерно распределенных 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. 4 представлены полученные графики для каждого объема данных.

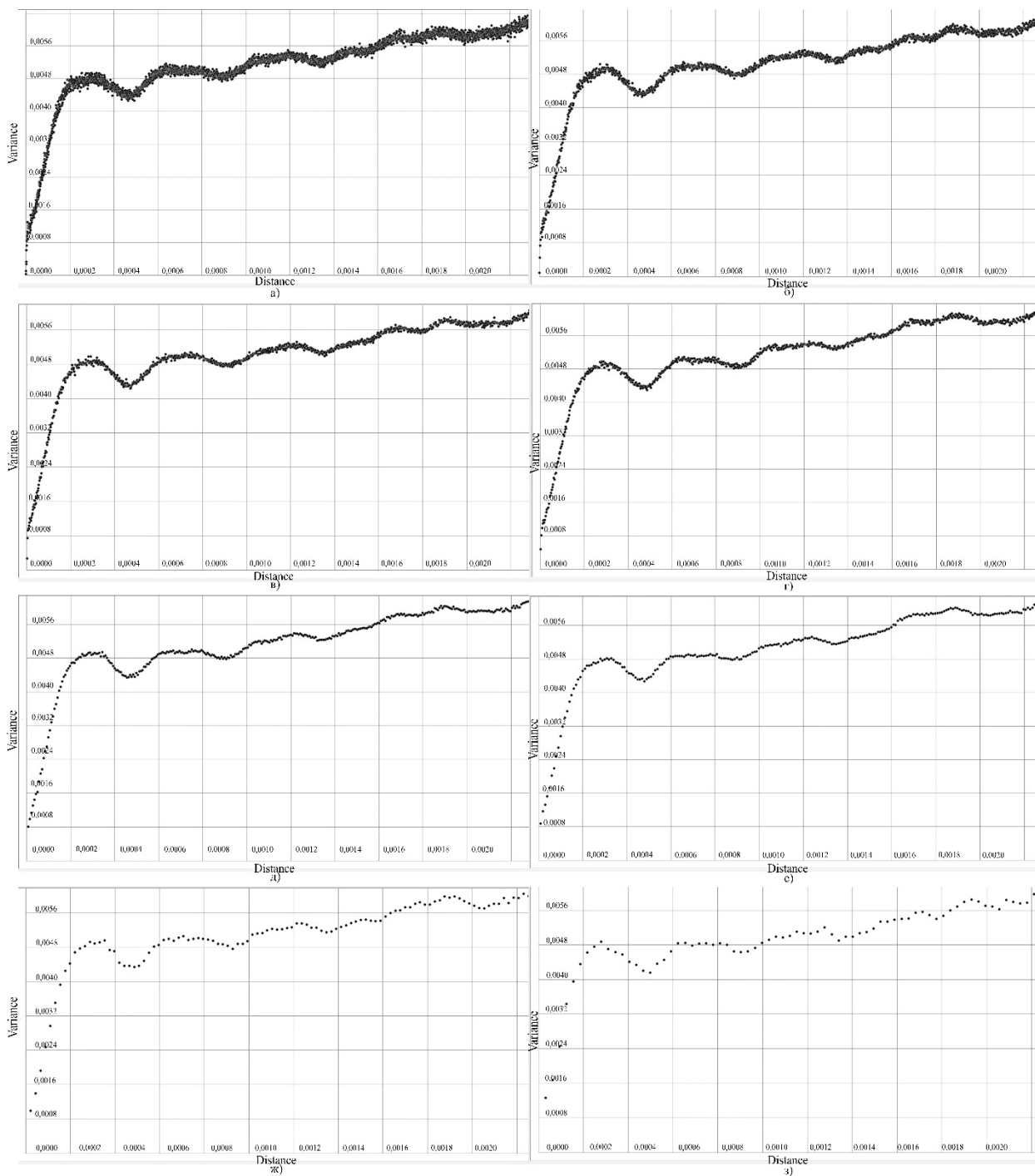


Рис. 4. Экспериментальные вариограммы для обследуемого участка с различным количеством пикселей в качестве исходных наборов данных:
а) 100 % пикселей; б) 20 %; в) 10 %; г) 5 %; д) 1 %; е) 0,5 %; ж) 0,1 %; з) 0,05 %

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. 4 представлены результаты построения теоретических моделей. Из таблицы видно, что основные показатели изменяются незначительно в зависимости от объема исходной информации (значения наггет-дисперсии резко увеличились при использовании 0,05–0,1 % пикселей от общего объема, однако на общие выводы данное изменение не оказало влияния). Следует отметить, что в данном примере масштаб μ оказался малым, в связи с чем анализ для принятия решения о дифференцированном внесении агрохимикатов целесообразно проводить только на основе наггет-дисперсии. По результатам построений видно, что она не превышает 0,2, в связи с чем 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.

Таблица 4. Параметры построенных вариограмм для обследуемого участка с различным количеством пикселей в качестве исходных наборов данных

Объем информации, %	c_0	c	a	ξ	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

Следует отметить, что помимо равномерно распределенного набора данных, инструментарий SAGA GIS позволяет построить традиционную сетку наблюдений. На рис. 5 представлен пример двух наборов точек для той же карты NDVI, где объем 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 примере – значений NDVI): «Add grid values to points»;
- сохранение результатов: «Save as».

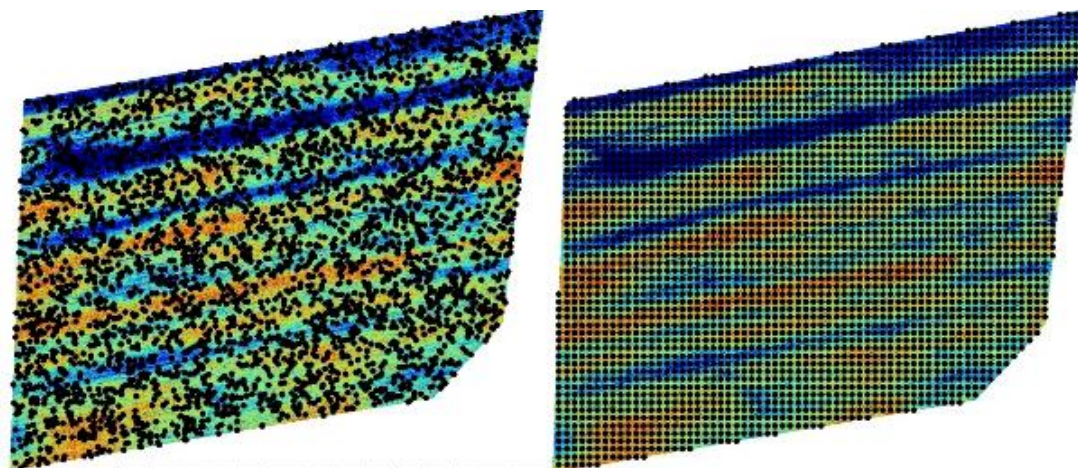


Рис. 5. Пример двух наборов точек, где объем данных составил 0,1 % от общего числа пикселей: случайное равномерное распределение и сетка

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.

Таким образом, предложенный подход позволяет определить оптимальный объем данных снимка сельскохозяйственной территории высокого разрешения, когда при решении задач точного земледелия возникает проблема их избыточности, а также сократить время выполнения расчетов и повысить эффективность вычислений без снижения качества последующего анализа. Как показал проведенный эксперимент, при использовании изображения с разрешением 10 см на пиксель целесообразно учитывать только 0,5–1,0 % 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, т. к. в его рамках учитывается пространственная вариабельность сельскохозяйственного поля. Для снимков с другим разрешением оценка проводится по аналогии.

1.1.4. Вычислительные эксперименты, демонстрирующие эффективность выявления пространственной неоднородности при анализе космических и аэрофотоснимков сельскохозяйственных полей

В ходе трехэтапного исследования осуществлялись ежегодные вычислительные эксперименты, позволяющие проанализировать практические аспекты применения предложенного геостатистического подхода к выбору оптимальной агротехнологии (интенсивной или дифференцированной).

Эксперимент 1. В первую очередь, для подтверждения работоспособности метода, был проведен эксперимент с использованием ретроспективных данных [48].

В качестве объекта исследования было выбрано опытное сельскохозяйственное поле № 26, расположенное в филиале Агрофизического научно-исследовательского института в д.

Меньково Ленинградской области (рис. 6). В 2011 г. на указанном поле проводился



Рис. 6. Аэрофотоснимок опытного поля Меньковского филиала Агрофизического научно-исследовательского института (дата съемки: 10.06.2011 г.).

эксперимент по дифференцированному внесению удобрений, выращиваемая культура – пшеница. За вегетационный период осуществлялись две подкормки: 07.06.2011 г. и 01.07.2011 г. Для подтверждения работоспособности предлагаемого метода целесообразно провести анализ аэрофотоснимков, сделанных до и после внесения удобрений, которое оба

раза проводилось дифференцированно, так как очевидно, что после внесения агрохимикатов вариабельность характеристик растений на сельскохозяйственной территории снизится, а поле станет существенно более однородным. При этом оптимально анализировать данные за первую дату подкормки, когда изменчивость исследуемого параметра выражена наиболее ярко.

В качестве исходных данных были отобраны два набора аэрофотоснимков: дата съемки 03.06.2011 г. и 10.06.2011 г., съемка проводилась в ближнем инфракрасном и видимом диапазонах с помощью беспилотного радиоуправляемого летательного аппарата самолетного типа. Построение ортофотопланов осуществлялось с помощью программы Agisoft Photoscan, геопривязка – в программе QGIS, с использованием встроенной SAGA GIS были сгенерированы две карты распределения индекса NDVI на данном поле. Кроме того, в той же программе были получены два набора случайных точек с помощью инструмента Create random points. На рис. 7 представлены построенные карты распределения индекса NDVI для двух дат съемки с отмеченными наборами случайно сгенерированных точек (для первой даты получен набор из 233 точек, для второй – из 242 точек).

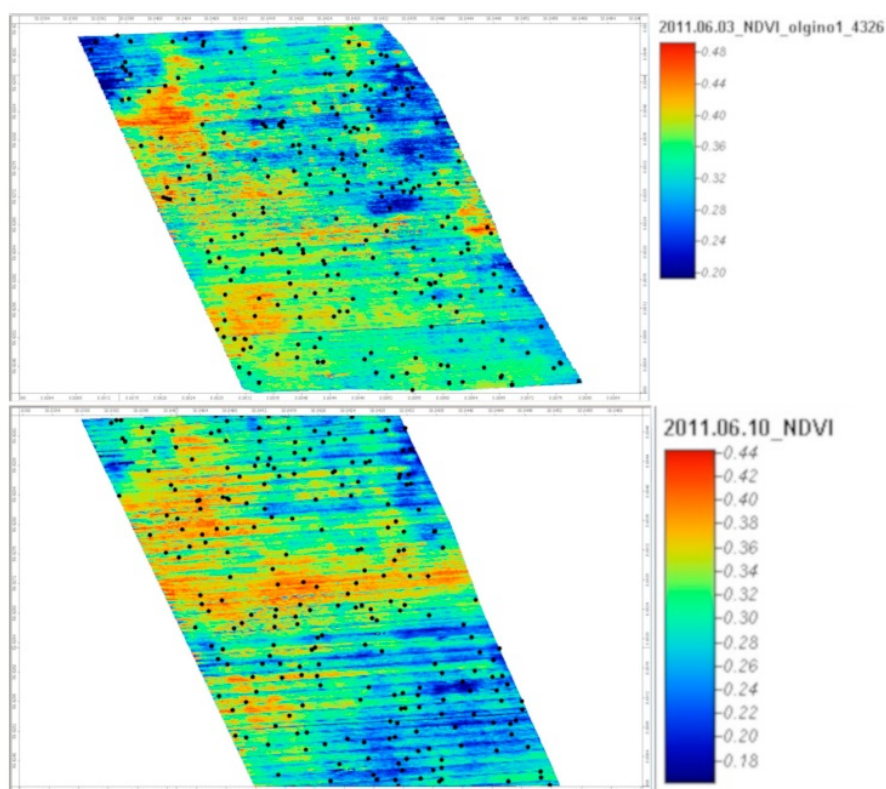


Рис. 7. Построенные карты распределения NDVI на опытном сельскохозяйственном поле с наборами точек, сгенерированных случайным образом (даты съемок: 03.06.2011 г. и 10.06.2011 г.)

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

- В ходе предварительного анализа были выявлены выбросы в данных только для второго набора из 242 точек, которые были устранены отсечением по 2.5 %-ным двухсторонним квантилям.
- Для первого набора данных оценка линейной корреляции исследуемого параметра Z с координатами выявила наличие статистически значимой ненулевой корреляции параметра с обеими координатами (применялась функция `cor.test`), при оценке линейной корреляции переменной Z с координатой X величина $p.value$ составила 0.06, а с координатой Y – $4 \cdot 10^{-10}$, то есть исходные данные противоречат условию стационарности матожидания $m(x)$. В связи с этим было выполнено ее преобразование к некоторой новой переменной, удовлетворяющей необходимым условиям геостатистики, для чего была построена модель тренда $\hat{m}(x)$ методом множественной регрессии. После этого были получены остатки путем вычитания модельных значений из экспериментальных данных, дальнейшие методы анализа применялись не к самой переменной Z , а к остаткам.
- Для второго набора данных оценка линейной корреляции параметра Z с координатами также выявила наличие статистически значимой ненулевой корреляции параметра с обеими координатами (при оценке линейной корреляции переменной Z с координатой X величина $p.value$ составила $2 \cdot 10^{-18}$, а с координатой Y – $6 \cdot 10^{-6}$). В связи с этим были проведены аналогичные преобразования данных.
- Для выбора величины шагов и их количества с целью дальнейшего получения экспериментальной вариограммы были построены гистограммы расстояний для каждого набора данных (рис. 8).

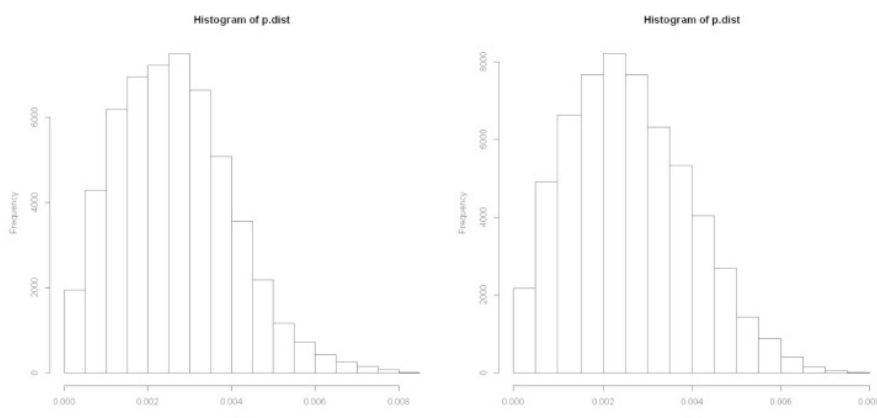


Рис. 8. Гистограммы расстояний для двух наборов данных за даты съемки 03.06.2011 г. (слева) и 10.06.2011 г. (справа)

В результате были построены экспериментальные вариограммы по 4-м направлениям для каждого набора данных. В обоих случаях присутствует эффект самородков, анизотропия отсутствует. Для аппроксимации выбрана наиболее близкая экспоненциальная модель (2). На рис. 9 представлены наложения теоретических моделей на экспериментальные вариограммы для двух наборов данных. Параметры полученных вариограмм для каждого набора экспериментальных точек представлены в табл. 5.

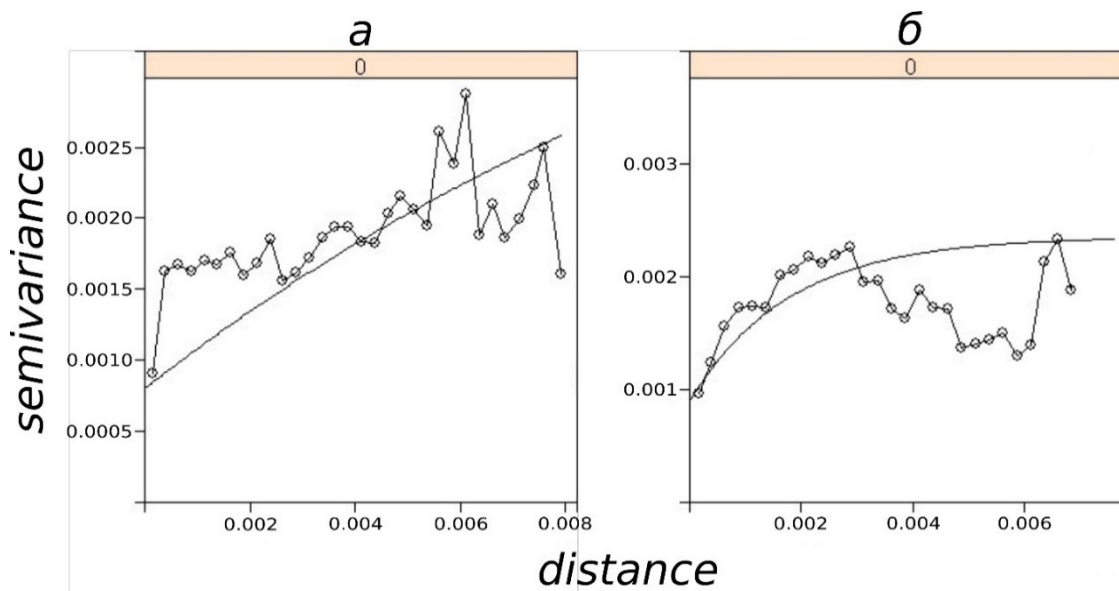


Рис. 9. Результат построения теоретических моделей с наложением на экспериментальные вариограммы (слева – для набора данных за 03.06.2011 г., справа – за 10.06.2011 г.).

Так как в рассматриваемом примере для аппроксимации экспериментальной вариограммы в обоих случаях использована экспоненциальная модель, то необходимо привести формулу нормированной полудисперсии $\nu(\mu)$, как и в случае со сферической моделью, разделив обе части выражения (2) на c :

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

где $T(\mu)$ определяется равенством

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

Характерный размер исследуемого поля $h = 0.008$. В дальнейшем для каждого набора данных были рассчитаны значения μ , ν и θ по формулам (4) и (5). В табл. 6 приведены результаты проведенных расчетов для двух анализируемых наборов данных.

Таблица 5. Параметры построенных вариограмм

Дата съемки	c_0 – самородок	c_1	c – порог	a – ранг	ξ – наггет-дисперсия
03.06.2011 г.	0.0008	0.0035	0.0043	0.0148	0.186
10.06.2011 г.	0.0009	0.00055	0.00145	0.0018	0.62

Таблица 6. Результаты расчетов для двух анализируемых наборов данных

Дата съемки	h	μ	ν	θ
03.06.2011 г.	0.008	0.54	0.53	0.35
10.06.2011 г.	0.008	4.4	0.995	0.623

Из таблицы 6 видно, что значение нормированной вариограммы для второго набора данных близко к единице, исходя из чего предполагается, что пространственная неоднородность исследуемой территории на момент съемки, проведенной 10.06.2011 г., на 99.5 % определяется внутриполевой изменчивостью и лишь на 0.5 % связана с варьированием условий между отдельными полями. Необходимо также сравнить полученные значения θ . Видно, что до внесения удобрений данный показатель был равен 0.35. Исходя из этого предполагается, что в данном случае доля случайных вариаций составляет 35 %, соответственно, оставшиеся 65 % могут быть компенсированы за счет применения технологии дифференцированного внесения агрохимикатов. При этом после подкормки показатель существенно увеличился и стала равен 0.623. Безусловно, за три дня (от даты подкормки до даты съемки) однородность сельскохозяйственной территории не может быть достигнута в полной мере, однако большая часть полезных веществ будет усвоена растениями. Таким образом, полученные оценки полностью соответствуют проведенному эксперименту.

Эксперимент 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. 10) [49].



Рис. 10. Спутниковый снимок (Sentinel-2, L2A, дата: 23.06.2019 г.) с двумя выбранными для анализа сельскохозяйственными полями (Ленинградская обл.)

В первую очередь с помощью программы QGIS были построены карты распределения NDVI для двух выбранных сельскохозяйственных полей. При этом использовались спутниковые снимки в 4-м и 8-м каналах, которые соответствуют красному и ближнему инфракрасному спектру. После этого был выделен необходимый для проведения анализа набор значений NDVI, представляющий собой случайный набор точек, равномерно распределенный на карте. Для первого поля был получен набор из 255 точек, для второго – из 222 точек (рис. 11).

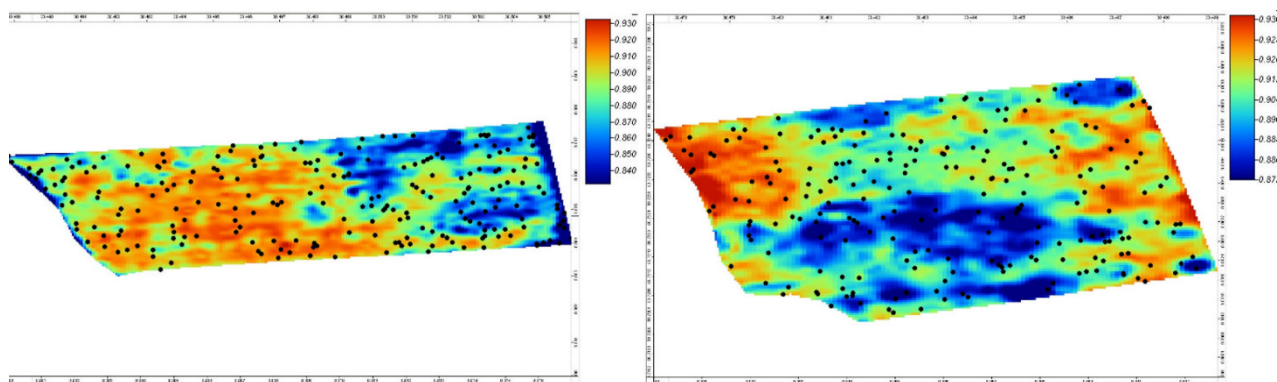


Рис. 11. Построенные карты распределения NDVI на двух выбранных сельскохозяйственных полях с набором точек, сгенерированных случайным образом

Для каждого набора данных проводился поэтапный анализ с помощью средств языка программирования *R*. Предварительный анализ в обоих случаях выявил выбросы в данных, которые были успешно исключены. Корреляция исследуемого параметра NDVI с координатами оказалась несущественной. Оба набора данных прошли проверки на выполнение необходимых условий геостатистики. В результате были построены экспериментальные вариограммы по 4-м направлениям для каждого набора данных. В обоих случаях присутствует эффект самородков, анизотропия отсутствует. Для аппроксимации выбрана наиболее близкая сферическая модель (1). На рис. 12 представлены наложения теоретических моделей на экспериментальные вариограммы.

Параметры построенных вариограмм для каждого из выбранных сельскохозяйственных полей представлены в табл. 7.

Таблица 7. Параметры построенных вариограмм

Номер поля	c_0 – самородок	c_1	c – порог	a – ранг	ξ – наггет-дисперсия
1	0.0001	0.00045	0.00055	0.01	0.182
2	0.0001	0.00011	0.00022	0.006	0.46

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

эффективности применения внутриполевых дифференцированных агротехнологий может решаться исходя из полученных значений ξ .

Как видно из табл. 7, для первого поля наггет-дисперсия достаточно мала (0.182), следовательно, переход к прецизионному производству растениеводческой продукции будет целесообразен. В случае со вторым полем уровень случайной вариабельности исследуемого параметра приближается к 50 % (0.46). Это свидетельствует о том, что переход к технологиям точного земледелия на нем будет менее эффективным, чем на первом.

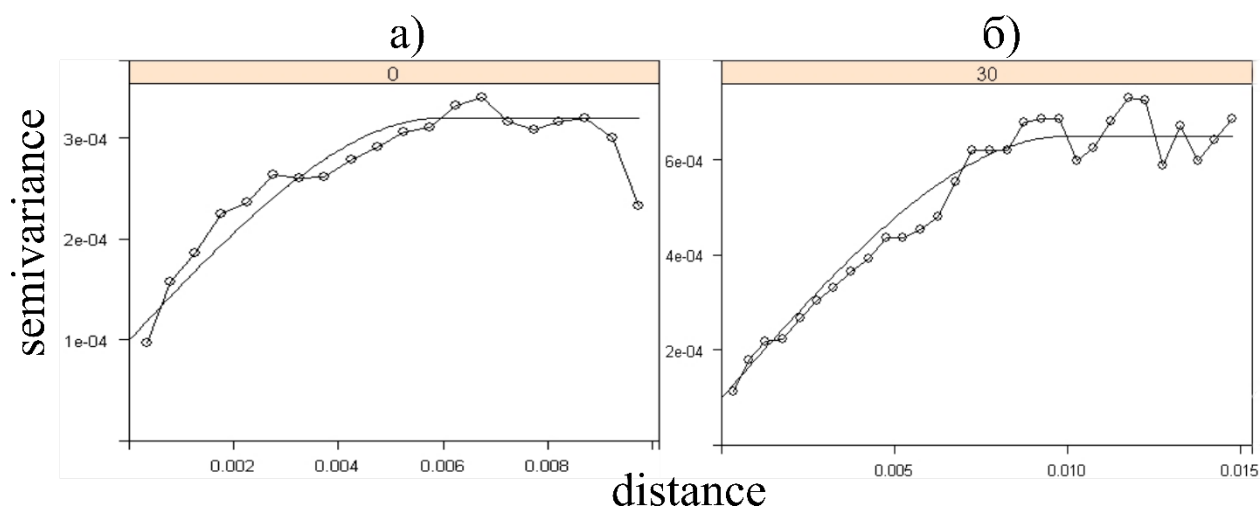


Рис. 12. Результат построения теоретических моделей
(слева а) – для второго поля, справа б) – для первого)

Эксперимент 3. 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. 13 продемонстрирован результат построения);
- формирование выборки точек, равномерно распределенных по карте.

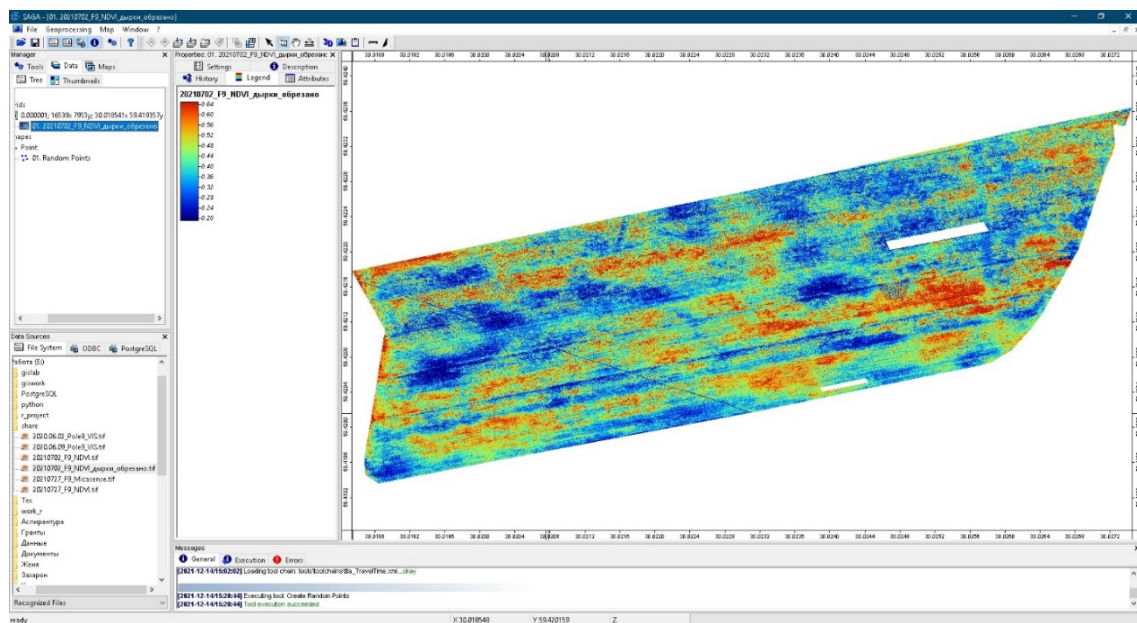


Рис. 13. Карта распределения NDVI на опытном сельскохозяйственном поле, расположенном на биополигоне АФИ (дата съемки: 02.07.2021 г., культура: яровая пшеница)

Для простоты анизотропия не учитывалась, вариограммный анализ осуществлялся средствами программы SAGA GIS. Наилучшей аппроксимационной моделью оказалась экспоненциальная (2) со следующими параметрами: $c_0 = 0,010744$, $c = 0,012836$, $a = 0,00264$, $\xi = 0,837$. В связи с тем, что размер поля существенно выше лага (ранга) вариограммы, то 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 скомпенсировать дифференцированными технологиями внесения азотсодержащих удобрений. Таким образом, на рассмотренном поле, несмотря на явную визуальную неоднородность, в период съемки применение технологии ТЗ представлялось не эффективным.

1.1.5. Инструментарий автоматизации построения эмпирических вариограмм и их аппроксимаций для функционального описания и аналитического выявления внутриполевого изменчивости

Для проведения валидации модели вариограммы, определения ее параметров, анализа анизотропии и осуществления других этапов эксперимента необходимо большое количество численных расчетов. Поскольку провести их вручную весьма сложно, то необходима автоматизация данных процессов. В табл. 8 представлены наиболее часто используемые бесплатные программы, включающие в себя ряд этапов геостатистического анализа. Однако следует отметить, что большинство из них исключают определенные действия, которые могут

иметь важное значение при решении задач ТЗ (нет возможности исследования анизотропии или пространственного тренда, ограничено число теоретических моделей вариограммы и т.п.). Целесообразно особо выделить язык программирования R, который ориентирован на решение множества задач с помощью статистического анализа. Главным его недостатком является необходимость глубоких экспертных знаний для пользователей в области решения практических и научно-исследовательских задач. В связи с этим для специалистов АПК, использующих системы ТЗ, язык программирования R является слишком сложным. Поэтому следует автоматизировать решение определенного круга задач путем создания первой очереди геостатистического модуля.

Таблица 8. Наиболее часто используемые бесплатные программы, включающие в себя методы геостатистики

Характеристики	Программные инструменты				
	GeoDa	GMT	GSLIB	R (GStat, geoR,...)	SAGA GIS
Вариограммный анализ	–	–	+	+	+
Кригинг	–	–	+	+	+
Кокригинг	–	–	+	+	–
Альтернативные методы пространственной интерполяции	+	+	–	+	+
ГИС-функции	+	–	–	–	+
ОС	Windows, MacOS, Linux	Windows, MacOS, Linux	Windows, Dos, Linux	Windows, MacOS, Linux	Windows, Linux
Последняя версия	1.14.0 (2019)	6.0.0 (2019)	1.5 (2009)	4.0.0 (2020)	7.6.2 (2020)
Страна	США	США	США	междунар. проект	Германия

1.1.5.1. Геостатистический модуль для автоматизации предложенного подхода

Геостатистический модуль, автоматизирующий вариограммный анализ для задач ТЗ, предлагается внедрить в программный веб-сервис, созданный научным коллективом и представленный на рис. 14. Платформа предназначена для оперативного сбора, хранения и всесторонней обработки разнородных данных, используемых для решения широкого круга востребованных задач в области производства растениеводческой продукции.

Для реализации рассматриваемого модуля представляется оптимальным использование языка программирования R, обладающего некоторыми существенными преимуществами: открытый исходный код и бесплатный доступ, большое количество поддерживаемых и регулярно пополняемых пакетов, широкие графические возможности, высокая совместимость с другими языками программирования (например, Python, который предполагается применять для реализации веб-сервиса и геоприложения), кроссплатформенность, значительный набор

инструментов статистического анализа и машинного обучения. На рис. 15 схематично представлен общий алгоритм реализации вариограммного анализа.

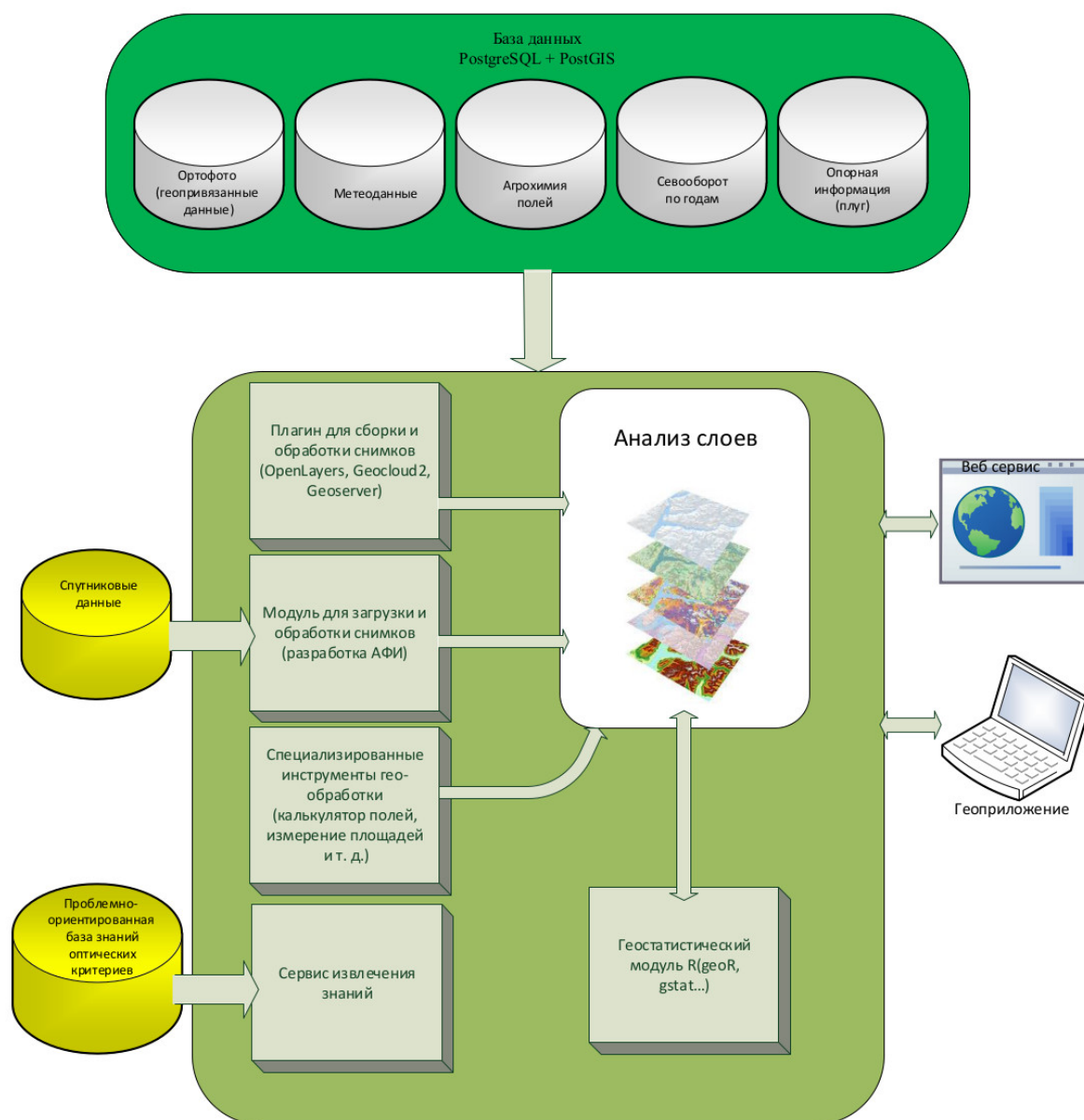


Рис. 14. Структурная схема веб-сервиса, разрабатываемого в Агрофизическом НИИ

При реализации модуля предполагается, что пользователю будут доступны дополнительные функции анализа (не по умолчанию, а в качестве отдельных опций), например для анализа выбросов в экспериментальных данных. Основной алгоритм можно также схематично представить следующим образом:

Data: $Z(x, y) = (Z_1, \dots, Z_n)$ - набор агроэкологических геопривязанных данных, $x = (x_1, \dots, x_n)$, $y = (y_1, \dots, y_n)$ - координаты экспериментальных точек, n - количество наблюдений.

Result: График вариограммы и основные результаты построения (параметры модели, наггет-дисперсия и т. п.).

//

Визуализация исходных данных (plot);

Output: карта распределения исследуемого параметра;

// Блок предварительного анализа:

trend ← оценка присутствия пространственного тренда (линейная корреляция переменной с координатами, cor.test);

if trend == TRUE **then**

{

Сообщение пользователю об обнаружении дрефта;

Устранение тренда построением его модели (строятся несколько основных, сравниваются коэффициенты детерминации, выбирается наилучшая) и элиминацией (вычитаются модельные значения из данных, дальнейший анализ проводится на остатках);

}

Построение гистограммы расстояний (hist);

Расчет оптимальных значений шага и числа лагов с помощью оценки разброса расстояний, их запись;

Output: рекомендуемые параметры экспериментальной вариограммы;

Input: пользователь либо принимает рекомендуемые, либо вводит свои параметры экспериментальной вариограммы;

// Блок построения экспериментальной вариограммы:

anis ← оценка присутствия анизотропии (строятся экспериментальные вариограммы в разных направлениях и рассчитываются отклонения полученных построений друг от друга, в случае превышения допустимого значения запоминаются направления анизотропии и возвращается TRUE, variogram);

Расчет и запись основных параметров теоретической вариограммы (определяются начальное и предельное значение, а также расстояние, на котором оно достигается);

if anis == TRUE **then**

{

В параметры теоретической вариограммы записывается информация об анизотропии;

Output: графики экспериментальной вариограммы по направлениям, сообщение пользователю, рекомендуемые параметры теоретической вариограммы;

}

else

Output: график экспериментальной вариограммы, рекомендуемые параметры теоретической вариограммы;

Input: пользователь либо принимает рекомендуемые, либо вводит свои параметры теоретической вариограммы, из выпадающего списка выбирает модель;

// Блок построения теоретической вариограммы:

Построение теоретической модели (vgm);

Output: наложение на график экспериментальной вариограммы теоретической модели;

Подгонка теоретической модели (валидация, fit.variogram);

Output: скорректированный график, результаты построений.

//



Рис. 15. Общий алгоритм автоматизации вариограммного анализа

При использовании существующих программных инструментов, реализующих геостатистические подходы, возникают две основные проблемы: либо расчеты чрезмерно упрощены для пользователя, соответственно, упускается часть важных статистических проверок и результатов, либо применение средств автоматизации требует от пользователя глубоких экспертных знаний. Данный модуль отличается от существующих аналогов рядом особенностей: на каждом этапе построений рассчитываются оптимальные параметры для дальнейшего анализа, пользователь может согласиться использовать предложенные программой или ввести свои показатели; полученные результаты могут быть автоматически

напрямую применены для решения определенной задачи ТЗ (например, может быть выдано заключение о целесообразности перехода к дифференцированным технологиям на конкретном сельскохозяйственном поле на основе вычисленной наггет-дисперсии).

Реализация предварительного прототипа модуля была осуществлена на языке программирования R с применением специализированного пакета для создания веб-интерфейсов shiny. Приложение состоит из четырех основных вкладок: визуализация карты распределения данных, где диаметр кругов соответствует уровню показателя (map); анализ пространственного тренда (trend); построение гистограммы расстояний (hist); итоговые построения вариограммного анализа (vario). На рис. 16 и 17 представлены скриншоты двух вкладок. Разработка геостатистического модуля носит прототипный характер, необходима доработка (не весь функционал, предусмотренный алгоритмом, уже реализован).

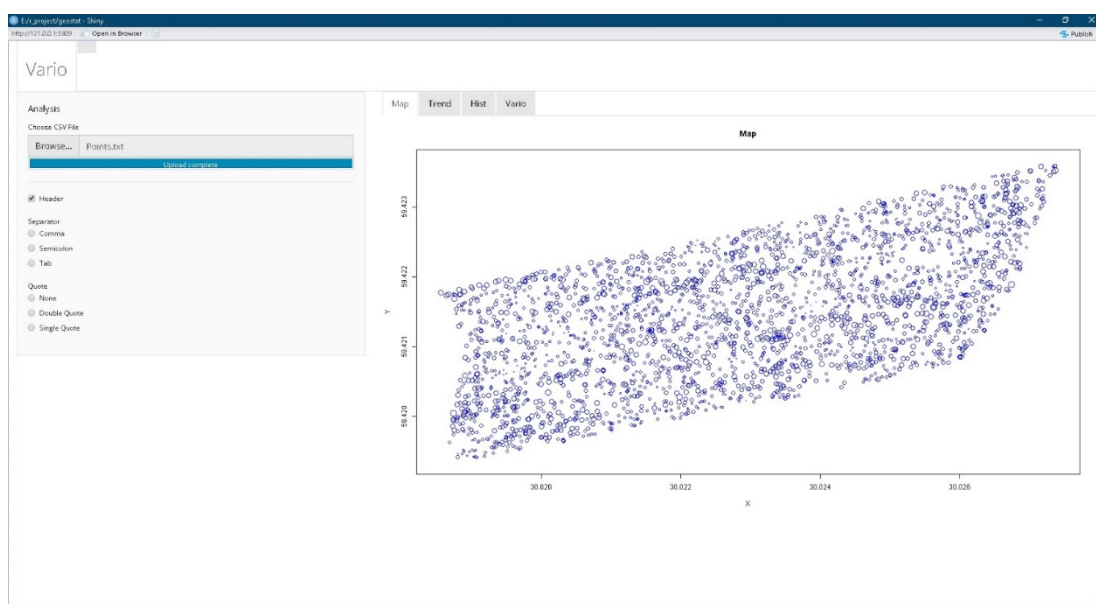


Рис. 16. Скриншот вкладки «Map» разработанного прототипного модуля

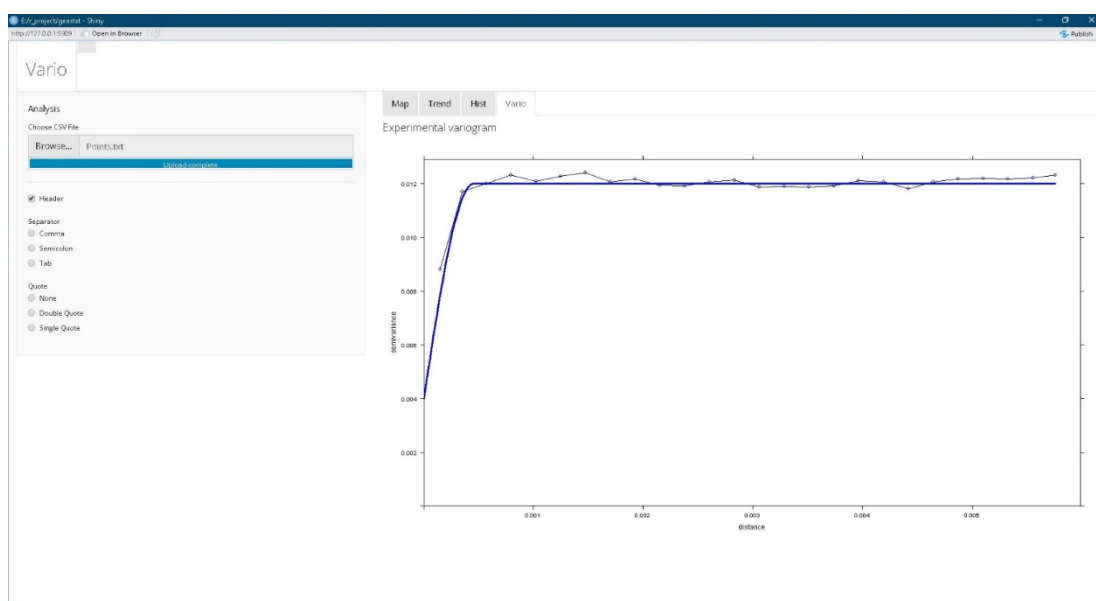


Рис. 17. Скриншот вкладки «Vario» разработанного прототипного модуля

1.2. Диагностика физиологического состояния посевов по динамике изменения их оптических характеристик

Пространственная неоднородность состояния посевов обусловлена многими факторами (почвенными, климатическими, биологическими, технологическими и др.) и зависит от оптических свойств листьев, архитектоники растений и структуры посевов. Основная функция сформированного растительного покрова – это поглощение радиации для фотосинтеза и других метаболических процессов. Поскольку рост и урожайность растений определяются в основном фотосинтезом, данные показатели зависят от количества поглощенного света и эффективности его преобразования в хлоропластах. Поэтому агрофитоценоз, который обеспечивает большее поглощение света и наиболее эффективное его использование, обычно характеризуется более высокой интенсивностью фотосинтеза составляющих его растений и, в итоге, большей урожайностью.

В дополнение к селекции, которая позволяет получать растения, особенности метаболизма и строение которых обеспечивают максимально эффективное использование солнечной энергии, структура посева может быть в определенной степени изменена благодаря технологиям возделывания. Подбор оптимальной нормы высева или оптимального расстояния между растениями, внесение удобрений, полив, применение других средств химизации способны повысить эффективность поглощения и усвоения солнечной энергии.

Спектральная характеристика отраженной растениями радиации, так же как и растительного покрова в целом, в значительной степени определяется содержанием и спектральными особенностями фотосинтетических пигментов (хлорофиллов и каротиноидов), наличием в тканях антоцианов, флавоноидов, особенностями внутренней структуры листьев [50–52]. На ухудшение условий вегетации растения реагируют изменением содержания пигментов, структуры мезофилла, а также свойств поверхности листьев и влагосодержания в них.

Дистанционный мониторинг дает возможность существенно усовершенствовать методы прогноза урожая и оперативного контроля за состоянием посевов как в глобальном, так и локальном масштабе. На начальных этапах развития и усовершенствования методов дистанционной диагностики и, главным образом, дешифрования получаемых данных необходимо их сопоставление с результатами наземных обследований посевов. Сравнение данных, полученных при дистанционном и наземном обследовании посевов в одни и те же сроки и на одних и тех же участках полей, необходимо для увеличения точности диагностики и выявления критериев и идентификационных показателей состояния посевов [50–56]. При дистанционном и наземном мониторинге наиболее широко применяются методы и показатели, позволяющие оценить особенности оптических характеристик листьев, индекс

листовой поверхности и/или проективное покрытие почвы, характерные для конкретного посева.

Экспериментальные данные, полученные в ходе проведения исследований, предназначены для наполнения и ведения базы знаний о спектральных характеристиках листьев растений и агрофитоценозов и их изменении в зависимости от внешних условий и применяемых технологий управления посевами, а также для усовершенствования методов и алгоритмов дешифрования аэрофотоснимков с целью применения методов дистанционной диагностики при мониторинге состояния посевов в системах точного земледелия.

1.2.1. Методы диагностики в полевых условиях и описание наиболее перспективных индексов для комплексной оценки физиологического состояния посевов

1.2.1.1. Условия выращивания растений в поле

В полевых условиях для количественного определения азотного статуса растений и выделения гомогенных зон для пространственно-дифференцированного внесения удобрений использовались регрессионные зависимости между спектральными характеристиками листьев растений и дозой азота на тестовых площадках, заложенных на поле Меньковской опытной станции. Площадь одной тестовой площадки составляла 25 м². Различные дозы нитрата аммония (0, 40, 80, 120, 160, 200 кг га⁻¹) вносились вручную в почву тестовых площадок в виде аммофоски и аммиачной селитры (первое удобрение внесено перед посевом в количестве 2/3 дозы азота, второе - в период трубкувания).

1.2.1.2. Стадии развития растений и погодные условия при выполнении измерений спектральных характеристик диффузного отражения листьев

Измерения спектральных характеристик отраженной от листьев радиации контактным сенсором спектрометрической системы Ocean Insight (США) и температуры растительного покрова, сформированного посевом озимой и яровой пшеницы на тестовых площадках, с помощью тепловизора выполнены на стадиях ВВСН 25-27 (завершение кущения), ВВСН 30-31 (выход в трубку), ВВСН 59-61 (завершение колошения – начало цветения), ВВСН 71-73 (водная спелость- ранняя молочная спелость). Эксперимент проводился в течение 3-х лет (2020–2022 гг). Данные о температуре, влажности воздуха и наличии осадков в годы и даты проведения измерений в поле приведены в табл. 9. Оптические характеристики листьев озимой пшеницы измерены на стадии выхода в трубку. В день регистрации спектров отражения температура воздуха в середине дня (14 часов), согласно данным метеостанции «Белогорка», составляла 10°C, поверхность почвы была влажной, растения не испытывали дефицита воды. Условия роста яровой пшеницы в разные вегетационные сезоны существенно различались. Сезон 2021 г. был более жарким и сухим,

чем сезон 2022 г. В 2021 г. средняя температура воздуха за 3 дня до проведения измерений в период завершения кущения, выхода в трубку и колошения была на 4,7, 7,4 и 3,9°C выше соответственно. В 2022 г. в период завершения колошения – начала цветения прошли дожди, и растения не испытывали дефицита влаги. На тех же этапах развития в 2021 г. осадков не было. В целом вегетационный сезон 2021 г. был более теплым и сухим.

Таблица 9. Характеристика погодных условий на даты измерений оптических характеристик растений пшеницы в полевых условиях

Дата	Стадия развития по шкале ВВСН	Т°С воздуха	Влажность, %	Осадки	Поверхность почвы
Озимая пшеница					
20.05.2020	30–32	10,4	49		влажная
21.05.2020		4,3	98	нет	влажная (вода застаивается на поверхности, образуются малые или большие лужи)
22.05.2020		10,2	44	нет	влажная
яровая пшеница					
16.06.2021	25–27	20,5	38	нет	сухая (без трещин, заметного количества пыли или сыпучего песка)
17.06.2021		23,8	39	нет	
18.06.2021		28,0	34	нет	
23.06.2021	30–31	33,4	35	нет	сухая (без трещин, заметного количества пыли или сыпучего песка)
24.06.2021		25,6	63	нет	
25.06.2021		23,8	77	нет	
30.06.2021	59–61	25,0	48	нет	сухая (без трещин, заметного количества пыли или сыпучего песка)
01.07.2021		25,4	45	нет	
02.07.2021		22,0	61	нет	
05.06.2022	25–27	19,3	49	нет	сухая (без трещин, заметного количества пыли или сыпучего песка)
06.06.2022		18,6	32	нет	
07.06.2022		20,4	35	нет	
21.06.2022	30–31	17,3	52	нет	сухая (без трещин, заметного количества пыли или сыпучего песка)
22.06.2022		19,9	45	нет	
23.06.2022		23,5	41	нет	
09.07.2022	59–61	21,1	66	дождь	влажная
10.07.2022		20,1	72	дождь	
11.07.2022		19,5	91	дождь	
17.07.2022	71–73	18,5	59	дождь	влажная
18.07.2022		15,7	73	дождь	
19.07.2022		21,2	52	нет	

Примечание: приведены значения температуры и влажности в середине дня (14 часов), полученные из архива метеостанции «Белогорка» (Ленинградская область).

1.2.1.3. Регистрация спектров отражения листьев и индексы отражения

Спектры отражения листьев яровой пшеницы сорта Дарья и озимой пшеницы сорта Галина регистрировались в диапазоне 360–1000 нм с шагом 0,3 нм в средней части закончивших рост листьев верхних ярусов с помощью оптоволоконной спектрометрической системы (Ocean Insight, США). В состав системы входит

спектрометр HR2000, специальное программное обеспечение OceanView, эталонный вольфрам-галогеновый источник света LS-1, спектралоновый эталон WS-1, стандартный зонд отражения/обратного рассеяния R-200-7-UV-VIS и другие средства, необходимые для проведения измерений. По спектрам отраженной радиации рассчитывались индексы отражения, характеризующие активность фотосинтетического аппарата (табл. 10).

Для удобства интерпретации полученных данных и получения положительных значений индексов отражения по всем вариантам опыта в расчетные формулы PRI, ARI и FRI была введена константная величина C (табл. 10), из которой вычитались значения перечисленных индексов. Были получены модифицированные индексы отражения: $PRI_{mod} = C_1 - PRI$, $ARI_{mod} = C_2 - ARI$, $FRI_{mod} = C_3 - FRI$. Величины C_1 – C_3 подбирались экспериментально. Обычно для растений пшеницы, выращиваемых при естественном освещении, C_1 была равна 0,5; C_2 и C_3 – 0,7 [50, 57].

Таблица 10. Индексы диффузного отражения листьев, которые использовались для диагностики физиологического состояния растений

Индекс	Измеряемый параметр	Формула для расчета	Авторы индекса
ChlRI	Содержание хлорофилла, емкость фотосинтетического аппарата	$(R_{750}-R_{705})/(R_{750}+R_{705}-2R_{445})$	Sims, Gamon, 2002
PRI_{mod}	Фотохимическая активность фотосинтетического аппарата. Позволяет оценить интенсивность нефотохимического тушения, тесно связан с превращением пигментов ксантофиллового цикла.	$C_1 - [(R_{570}-R_{531}) / (R_{570}+R_{531})]$	Peñuelas et al., 1995
ARI	Содержание антоцианов, накопление которых обычно является признаком фотоингибирования, угнетения растений и торможения их роста	$C_2 + [(1/R_{550}) - (1/R_{700})] * R_{750}$	Merzlyak et al., 2003
FRI	Содержание флавоноидов, накопление которых обычно является признаком фотоингибирования, угнетения растений и торможения их роста	$C_3 + ((1/R_{410}) - (1/R_{460})) * R_{800}$	Merzlyak et al., 2003
R_{800}	Показатель рассеяния света, тесно связанный с внутренней структурой листа	R_{800}	Sims, Gamon, 2002
WRI	Индекс водной полосы, характеризует содержание воды в листе	$(R_{920}-R_{970})/(R_{920}+R_{970})$	Plasad et al., 2007

Примечание: в таблице R – коэффициент диффузного отражения; цифры – длина отраженной волны.

Для каждого варианта опыта записывалось не менее 15 спектров. Рассчитывались средние значения коэффициентов отражения (индексов отражения), характеризующих активность фотосинтетического аппарата. Связь индексов отражения с физиологическими процессами, протекающими в листьях при оптимальных условиях окружающей среды и при воздействии некоторых абиотических стрессоров, была описана ранее [50, 58, 59].

1.2.1.4. Регистрация температуры растительного покрова яровой пшеницы с помощью тепловизора

Температура растительного покрова, сформированного растениями яровой пшеницы сорта Дарья, определялась с помощью тепловизора RGK TL-80 со специальным программным обеспечением. Инфракрасные изображения фрагментов растительного покрова на каждой из тестовых площадок, различающихся в зависимости от дозы внесенных азотных удобрений, были получены в утренние часы (10 часов) на стадиях BBCH 25-27 (завершение кущения), BBCH 0-31 (выход в трубку), BBCH 71-73 (водная спелость – ранняя молочная спелость). На стадии BBCH 71-73 измерения выполнены также днем (14 часов). Все измерения проведены в 5-кратной повторности с расстояния 2–2,5 м в полевых условиях Меньковской опытной станции. При обработке полученных инфракрасных снимков определялась температура растительного покрова и открытых участков почвы.

1.2.1.5. Оценка оптических характеристик листьев яровой пшеницы при дефиците азота и воды в контролируемых условиях

Растения пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Красноуфимская 100 выращивались в светоустановках с лампами ДNaT 400 при облученности на уровне верхних листьев 50 ± 5 Вт м⁻² и фотопериоде 16 ч в полипропиленовых сосудах емкостью 3 л, наполненных дерново-подзолистой почвой с содержанием нитратного азота 18,2 мг кг⁻¹ и аммонийного азота 34,6 мг кг⁻¹. Опыт включал два варианта: без дополнительного внесения удобрения (низкий уровень азотного питания – LN) и с 2-кратным внесением удобрения (высокий уровень азотного питания – HN). В варианте HN перед посевом в почву была внесена мочевины в количестве 0,107 мг/кг почвы. Еще два дополнительных внесения азота в такой же дозе были проведены в периоды кущения и завершения трубкования. Влажность почвы до стадии трубкования была равна 80 % от полной влагоемкости (ПВ) – контроль. Продолжительность почвенной засухи в период от завершения трубкования до начала колошения составляла 7 дней. Влажность почвы при создании засухи поддерживалась равной 30 и 50% от ПВ, в контроле – 80 % от ПВ. Работа выполнена в контролируемых условиях защищенного грунта с целью исключения влияния других неблагоприятных факторов среды.

1.2.1.6. Статистическая обработка результатов

Статистическая обработка данных проводилась с применением программ Excel 2010 и Statistica 8 («Stat-Soft, Inc.» США). Определялись средние значения изучаемых показателей, доверительные интервалы, коэффициенты вариации. Для многофакторных экспериментов были проведены дисперсионный и корреляционный анализы. Достоверность различий между вариантами оценивалась при помощи методов параметрической (t-критерий Стьюдента) и непараметрической (критерий парных сравнений Уилкоксона) статистики. Сила факторного эффекта η^2 (уровень азотного питания и содержание воды в почве) определена в процентах как отношение соответствующей суммы квадратов отклонений оптических и биометрических показателей от их средних значений к общей сумме квадратов по результатам дисперсионного анализа, выполненного в программе Statistica 8. Различия между вариантами считались достоверными при $p \leq 0,05$.

1.2.2. Спектральные характеристики диффузного отражения листьев яровой и озимой пшеницы на разных стадиях развития в зависимости от уровня азотного питания

Анализ спектральных характеристик отраженной от поверхности листьев радиации позволил выявить тесную положительную взаимосвязь индекса хлорофилла (ChlRI) и тесную отрицательную взаимосвязь фотохимического индекса отражения (PRI) с дозой внесенных азотных удобрений (рис. 18, 19). Связь величины ChlRI и PRI с дозой внесенного в почву азота линейная, четко выраженная на всех этапах развития растений пшеницы (табл. 10). В табл. 11 приведены только те индексы, для которых выявлена статистически значимая связь с дозой внесенных азотных удобрений. Достоверная взаимосвязь дозы азота с индексами R_{800} и ARI_{mod} не выявлена ни на одном из сроков проведения анализов, связь с индексами SIPI и FRI_{mod} обнаружена только на ранних этапах развития растений яровой пшеницы (стадия кущения), в более поздние сроки из-за значительного варьирования величины данных индексов достоверной связи выявить не удалось.

Опыты, проведенные на растениях озимой пшеницы, позволили выявить тесную связь между индексами отражения, характеризующими емкость (ChlRI) и эффективность (R_{800} , PRI_{mod} и FRI_{mod}) работы фотосинтетического аппарата, и дозой внесенных азотных удобрений (табл. 11). Данные, представленные в табл. 11, позволяют заключить, что на стадии кущения озимой пшеницы при температуре 10,2°C и увлажненной почве только индексы SIPI и ARI_{mod} не имели достоверной связи с уровнем азотного питания растений. Обнаружено, что величины остальных выбранных для оценки физиологического состояния растений индексов имеют тесную корреляционную связь с уровнем азотного питания, созданным на тестовых площадках поля Меньковской опытной станции АФИ.

Таблица 11. Взаимосвязь между величиной индексов отражения и дозой внесенных азотных удобрений в зависимости от этапа развития и условий вегетации растений яровой пшеницы в вегетационные сезоны 2021 и 2022 г.

Индекс отражения	Стадия развития ВВСН	Уравнение связи между индексом отражения и дозой азота (N)	r	r^2	p
Яровая пшеница (данные 2022 г.)					
ChlRI	25-27	$0.382+(0,0004 \times N)$	0.946	0.95	0.0046
	30-31	$0.414+(0,007 \times N)$	0.995	0.99	0.00004
	59-61	$0.422+(0,0012 \times N)$	0.955	0.91	0.0042
	71-73	$0.435+(0,0016 \times N)$	0.945	0.90	0.0042
PRI _{mod}	25-27	$1.760-(0,0033 \times N)$	-0.895	0.80	0.0400
	30-31	$1.201-(0,0011 \times N)$	-0.942	0.89	0.0050
	59-61	$1.004-(0,0008 \times N)$	-0.918	0.84	0.0096
	71-73	$1.519-(0,0032 \times N)$	-0.945	0.89	0.0045
SIPI	25-27	$1.090-(0,0003 \times N)$	-0.958	0.92	0.042
FRI _{mod}	25-27	$9.621-(0,0368 \times N)$	-0.961	0.92	0.039
Яровая пшеница (данные 2021 г.)					
ChlRI	25-27	$0,4134+(0,0008 \times N)$	0.973	0.946	0.001
	30-31	$0.479+(0,0014 \times N)$	0.963	0.927	0.0021
PRI _{mod}	25-27	$1.091-(0,0014 \times N)$	-0.843	0.710	0.035
	30-31	$1.051-(0,0017 \times N)$	-0.899	0.810	0.015
ARI _{mod}	25-27	$2.552-(0,0013 \times N)$	-0.898	0.806	0.015
	30-31	$2.210-(0,008 \times N)$	-0.989	0.978	0.0002
SIPI	25-27	$0.995-(0,00001 \times N)$	-0.910	0.829	0.012
FRI _{mod}	25-27	$18.58-(0,007 \times N)$	-0.921	0.849	0.009
Озимая пшеница (опыт 2020 г.)					
ChlRI	30-31	$0.362+(0,0003 \times N)$	0.991	0.983	0.0001
R ₈₀₀	30-31	$34.2-(0,006 \times N)$	-0.917	0.840	0.010
PRI _{mod}	30-31	$0.992-(0,0008 \times N)$	-0.969	0.938	0.0015
FRI _{mod}	30-31	$4.772-(0,0091 \times N)$	-0.929	0.863	0.034

Примечание: приведены только те индексы, для которых обнаружена статистически достоверная связь с уровнем азотного питания. N – доза азотных удобрений, внесенных в почву тестовых площадок, варьировалась от 0 до 200 кг/га с шагом 40 кг/га.

Вне зависимости от погодных условий вегетационных сезонов 2021 и 2022 гг., которые в основном характеризовались средними температурами в июне-августе, индекс хлорофилла (ChlRI) и фотохимический индекс отражения (PRI_{mod}) были тесно связаны с дозой внесенных азотных удобрений. Обнаруженная на ранних этапах развития связь между показателями сохранялась и в более поздние сроки вегетации вплоть до стадии молочной спелости. Характерно, что величина индексов SIPI и FRI_{mod} имела отрицательную корреляционную связь с дозой внесенных азотных удобрений только на ранних сроках развития растений (стадия ВВСН 25-27, завершение кущения). На более поздних этапах развития (стадия ВВСН 30-31,

выход в трубку) зависимости указанных индексов от обеспеченности растений азотом не выявлено.

Индекс антоцианов (ARI_{mod}), достоверная связь которого с содержанием азота в почве не была выявлена в более прохладный вегетационный сезон 2022 г., обнаружена в более теплый вегетационный сезон 2021 г. (табл.11).

На рис. 18 представлены значения индекса отражения хлорофилла (ChlRI), характерные для растений яровой пшеницы в зависимости от стадии развития и уровня азотного питания, созданного на тестовых площадках. Видно, что содержание хлорофилла в листьях возрастает с дозой внесенного в почву азота. Индекс хлорофилла характеризует емкость фотосинтетического аппарата и потенциальную способность растений поглощать свет. Данный показатель тесно связан с урожайностью растений. Выявлена тесная корреляционная связь числа и массы семян, формируемых в колосе главного побега, с ChlRI (измерение спектральных характеристик отраженной от поверхности листьев радиации выполнены на стадии выхода в трубку):

$$МЗ_{гк} = 2.907 + (9.304 \times ChlRI), r = 0.69, r^2 = 0.48, p = 0.009,$$

$$ЧЗ_{гк} = 33.99 + (133.5 \times ChlRI), r = 0.58, r^2 = 0.33, p = 0.039,$$

где МЗ гк и ЧЗ гк – масса зерен и число зерен, сформированных в главном колосе.

Поскольку ChlRI имеет достоверную положительную корреляционную связь с показателями урожайности (число и масса семян), данный индекс может рассматриваться в качестве признака потенциальной продуктивности.

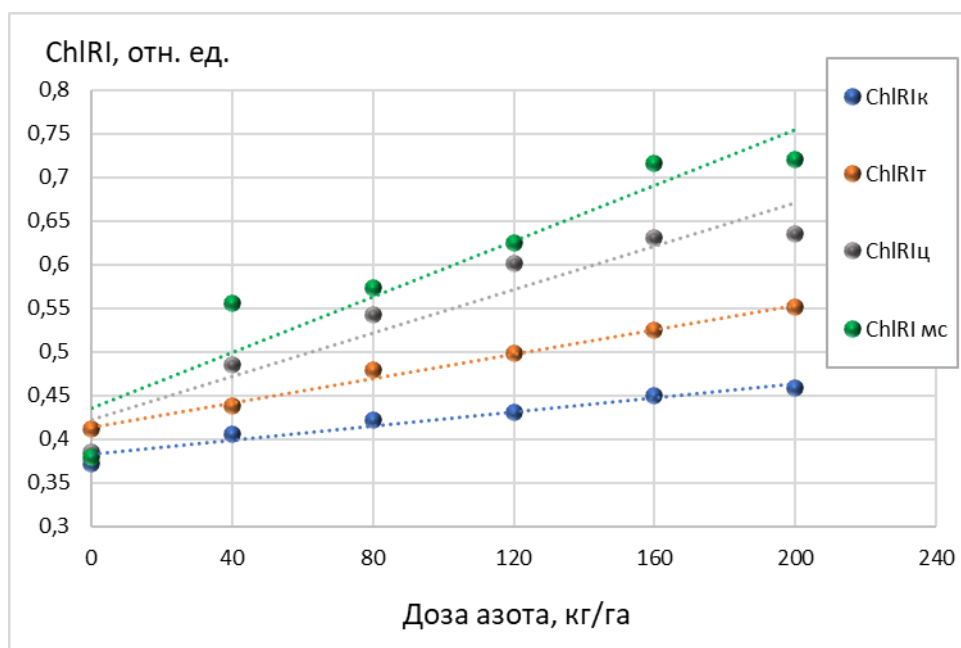


Рис. 18. Индекс отражения хлорофилла (ChlRI) листьев пшеницы в зависимости от дозы внесенных азотных удобрений. Приведены значения ChlRI, полученные на стадиях кущения (ChlRI к), выхода в трубку (ChlRI т), цветения (ChlRI ц) и молочной спелости (ChlRI мс).

Фотохимический индекс отражения (PRI_{mod}) характеризует эффективность превращения света в фотохимических процессах фотосинтеза. Увеличение PRI_{mod} свидетельствует об усилении тепловой диссипации и является показателем снижения эффективности фотосинтетических процессов. С повышением дозы внесенных азотных удобрений PRI_{mod} уменьшается (рис. 19).

Связь между величиной PRI_{mod} и уровнем азотного питания сохраняется от ранних этапов развития растений (кущение) до поздних (молочная спелость).

Индексы отражения $SIPI$, R_{800} , ARI и FRI , помимо обеспеченности растений азотом, реагируют на изменение условий окружающей среды и, по-видимому, могут быть полезны при оценке специфической ответной реакции растений на действие различных стрессоров, например, повышенную температуру воздуха или дефицит почвенной влаги.

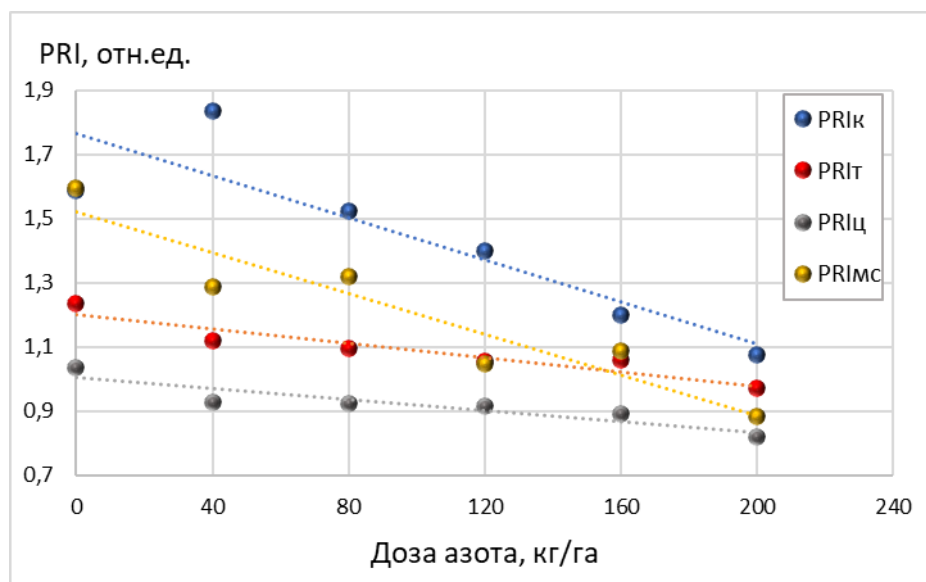


Рис. 19. Фотохимический индекс отражения (PRI_{mod}) листьев пшеницы в зависимости от дозы внесенных азотных удобрений. Приведены значения PRI_{mod} , полученные на стадиях кущения ($PRI_{к}$), выхода в трубку ($PRI_{т}$), цветения ($PRI_{ц}$) и молочной спелости ($PRI_{мс}$)

1.2.3. Влияние почвенной засухи на спектральные характеристики диффузного отражения листьев растений, вегетирующих при различном уровне азотного питания

В табл. 12 приведены значения силы факторного влияния дефицита азота и низкой влажности почвы (30 % и 50 % от ПВ) для $ChlRI$ и других индексов отражения, которые были описаны ранее [60]. $ChlRI$ является единственным из изученных индексов, на который умеренная (50 % от ПВ, потеря воды листьями составила 32%) почвенная засуха оказала незначительное воздействие ($\eta^2=4\%$).

Таблица 12. Сила влияния дефицита азота и кратковременной почвенной засухи на индексы отражения листьев пшеницы.

Индекс отражения	Влияние азота		Влияние засухи	
	η^2	p	η^2	p
ChlRI	<i>Почвенная засуха 50 % от ПВ</i>			
	20	1.4×10^{-7}	4	0.0147
SIPI	2	0.0714	14	7.6×10^{-6}
R ₈₀₀	2	0.0452	28	4.2×10^{-11}
PRI _{mod}	15	1.4×10^{-7}	30	9.1×10^{-14}
ARI _{mod}	1	0.8893	9	0.0007
FRI _{mod}	12	4.4×10^{-6}	20	1.2×10^{-8}
WRI	2	0.0297	55	1.8×10^{-24}
ChlRI	<i>Почвенная засуха 30 % от ПВ</i>			
	10	0.0001	17	9.7×10^{-8}
SIPI	1	0.3567	22	0.0004
R ₈₀₀	2	0.020	67	5.9×10^{-37}
PRI _{mod}	1	0.573	24	2.3×10^{-9}
ARI _{mod}	24	0.7×10^{-4}	5	0.006
FRI _{mod}	1	0.098	22	3.7×10^{-9}
WRI	4	7.9×10^{-20}	4	0.283

Характерно, что на фоне умеренного водного дефицита о дефиците азота, ухудшении физиологического состояния и возможном снижении урожайности растений свидетельствует уменьшение значений ChlRI и рост значений PRI_{mod} и FRI_{mod}. В случае действия кратковременной, но более сильной почвенной засухи, о дефиците азота в первую очередь сигнализирует рост значений ARI_{mod}.

Различия в реакции растений на недостаток азота и почвенной влаги можно также наблюдать, сравнивая значения SIPI, R₈₀₀, ARI_{mod}, WRI и оценивая силу влияния, которое на данные индексы оказывают дефицит азота и воды. Обнаружено, что сила влияния умеренной почвенной засухи на перечисленные индексы высока (WRI – 55 %, R₈₀₀ – 28 %, SIPI – 15 %, ARI_{mod} – 9 %), что существенно превосходит силу влияния дефицита азота. При умеренной почвенной засухе в условиях эксперимента влияние дефицита азота на SIPI и ARI_{mod} было недостоверным, а на R₈₀₀ и WRI – невысоким (3 и 2 % соответственно).

Наиболее сильное влияние умеренная почвенная засуха оказала на показатель R₈₀₀ и особенно на индекс водной полосы 970 нм WRI. Оба стрессора (почвенная засуха и дефицит азотного питания) привели к усилению тепловой диссипации (увеличение PRI_{mod}) и способствовали накоплению флавоноидов (увеличение FRI_{mod}). При сильной почвенной засухе (30 % от ПВ, потеря воды листьями составила 60 %) обнаружено достоверное уменьшение содержания хлорофилла не только при пониженном уровне азотного питания, но и при дефиците воды в почве. Наибольшее влияние сильная засуха (30 % от ПВ) оказала на

показатель рассеяния света R_{800} ($\eta^2 = 67\%$). Однако в условиях значительного обезвоживания листьев, которое произошло при сильной почвенной засухе (30 % от ПВ), достоверных изменений значений WRI не обнаружено (табл. 12).

Сравнение η^2 азотного дефицита и почвенной засухи позволяет сделать вывод, что почвенная засуха оказала более сильное влияние на изучаемые показатели, чем пониженный уровень азотного питания (табл. 12). На фоне умеренной почвенной засухи дефицит азота оказал наибольшее влияние на значения ChlRI, почвенная засуха – на значения SIPI, R_{800} , ARI_{mod} и WRI. При более сильной почвенной засухе достоверно изменялись величины всех изучаемых индексов отражения, за исключением WRI. Таким образом, в условиях умеренной почвенной засухи индекс WRI может служить надежным критерием при оценке водного статуса растений, однако если растения испытывают значительный водный дефицит и листья теряют большую часть запасов воды, данный показатель, в отличие от R_{800} , изменяется незначительно.

Как и следовало ожидать, низкий уровень азотного питания стал причиной существенной потери урожая зерна, главным образом из-за формирования меньшего числа зерен в колосе ($\eta^2 = 61\%$). Несмотря на то, что сформированные при дефиците азота зерна были более крупными, чем в варианте с дополнительным внесением азотных удобрений, это лишь частично компенсировало общее снижение массы сформированных на растении семян. Кратковременная почвенная засуха (30 % от ПВ) в период от завершения трубкования до начала колошения, так же как и дефицит азота, способствовала снижению урожайности растений пшеницы. Общая потеря урожая зерна достигла 27 % при дефиците азота на фоне оптимального полива (влажность почвы 80 % от ПВ). Кратковременная почвенная засуха при недостаточном азотном питании привела к потере более 47 % урожая зерна. Сила влияния почвенной засухи на число формирующихся на одном растении зерен очень низкая (3 %) и недостоверная, что вполне объяснимо, поскольку к началу засухи растения уже прошли этапы органогенеза, на которых закладываются структуры, определяющие величину показателя «число зерен». Более низкая урожайность подвергнутых засухе растений объясняется формированием мелких семян. Степень влияния засухи η^2 на показатель «масса 1000 семян» составила 23 %, а η^2 дефицита азота – 7 %.

В рассмотренной работе [60] индекс отражения воды (WRI) соответствует индексу $NWI-4 = [R_{970} - R_{920}] / [R_{970} + R_{920}]$, который был использован при оценке засухоустойчивости генотипов пшеницы [61]. В рамках настоящего исследования было установлено, что величина данного индекса и ее изменение при засухе в значительной степени зависит от силы засухи. При умеренной почвенной засухе индекс WRI может быть надежным показателем реакции растений на стрессовое воздействие. В случае, если стрессовое воздействие является более

жестким, данный показатель становится недостаточно надежным. В значительной степени подобная реакция WRI на стресс определяется слишком слабым поглощением радиации 970 нм. Кроме того, радиацию данного диапазона поглощает также крахмал. Поэтому при оценке водного статуса целесообразно использовать более мощные полосы поглощения, например 1450 или 1650 нм.

Результаты, приведенные в разделах 1.2.2 и 1.2.3, явились основой для создания и реализации базового алгоритма выявления границ внутриполевой изменчивости физиологического состояния посевов по гиперспектральным снимкам и оптическим критериям [62, 63].

1.2.4. Базовый алгоритм обнаружения и выделения границ внутриполевой неоднородности

На рис. 20 представлена укрупненная функциональная блок-схема базового алгоритма обнаружения и выделения границ внутриполевой неоднородности по гиперспектральным спутниковым снимкам и оптическим критериям. В правой части рисунка (режим «1») отражен процесс формирования проблемно ориентированной базы знаний (БЗ) оптических критериев. В БЗ накапливаются формализованные сведения о формулах расчета различных оптических показателей (индексов отражения) по тем или иным спектральным диапазонам, а также систематизируются и сохраняются значения соответствующих величин, характеризующих физиологическое состояние посевов сельскохозяйственных культур в оптимальных и стрессовых условиях. Статистика изменений оптических показателей по ряду критериев, характеризующих оптимальные и стрессовые условия азотного и водного режимов формирования урожая яровой пшеницы, приведена выше (см. табл. 12, раздел 1.2.3).

В левой части рис. 20 (режим «2») представлена поэтапная последовательность заполнения базы данных (БД) спутниковой гиперспектральной информацией для расчета оптических показателей посевов по критериям, содержащимся в БЗ. Для этого целесообразно применять новые разработки ИКИ РАН, связанные с созданием методов, подходов и технологий работы с распределенными архивами данных [64]. В частности, предполагается использовать уникальную научную установку ВЕГА-Science (<http://sci-vega.ru/>), входящую в состав ЦКП «ИКИ-Мониторинг», которая обеспечивает пользователям доступ к необходимой предварительно обработанной информации из постоянно пополняющихся архивов спутниковых данных. При наличии у заказчика опорной информации появляется возможность за счет дальнейшей верификации и калибровки повысить репрезентативность данных космической съемки, предназначенных для расчетов оптических критериев на заданной территории.

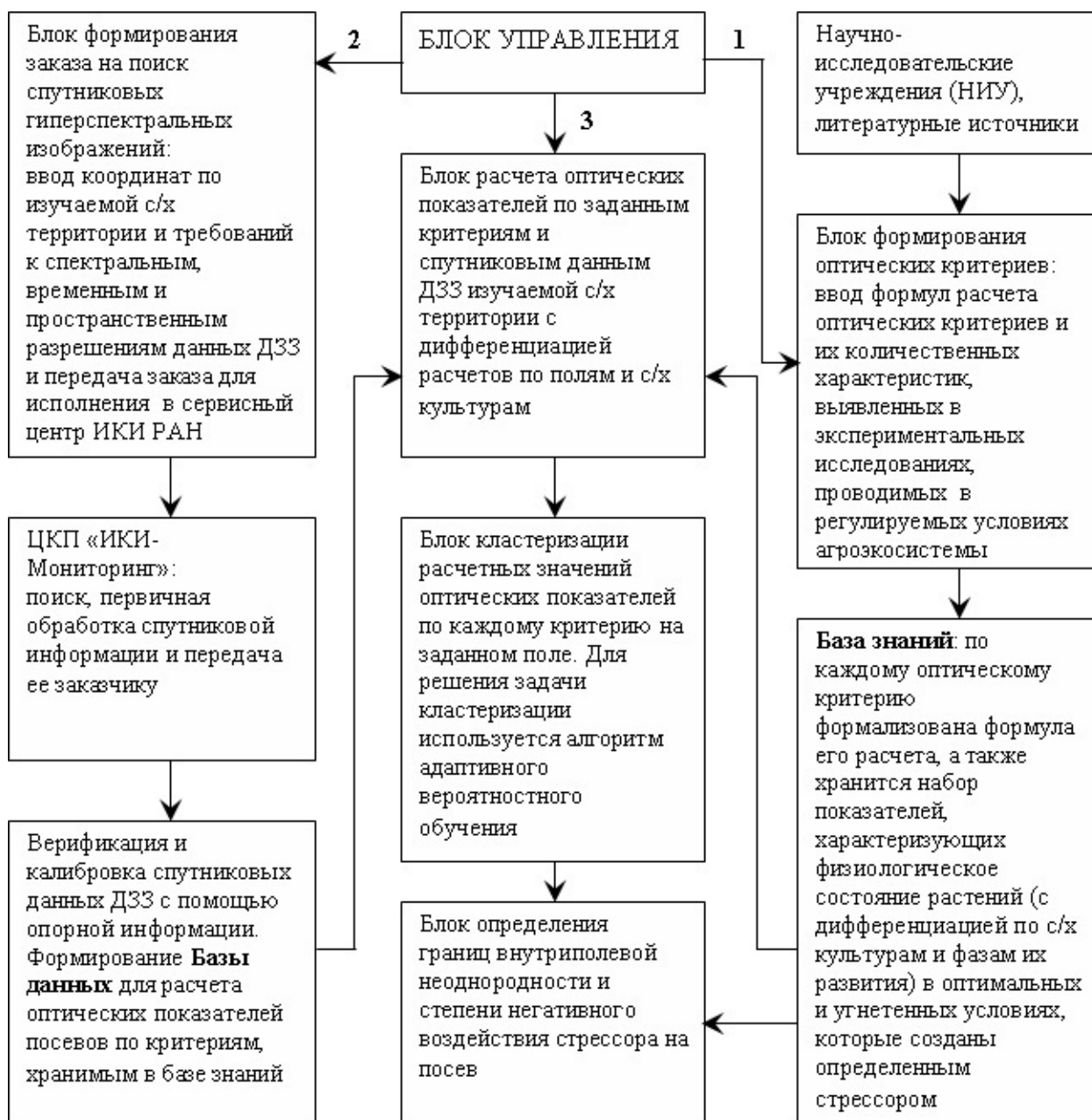


Рис. 20. Укрупненная функциональная блок-схема базового алгоритма обнаружения и выделения внутриполевой неоднородности

Центральным звеном базового алгоритма (режим «3») являются блоки расчета оптических показателей по заданным критериям, их кластеризации на сельскохозяйственных полях по каждому критерию и выделения границ внутриполевой неоднородности и степени стрессового воздействия на посев. Наиболее сложной задачей в данном сегменте является кластеризация значений оптического показателя, вычисленных по заданному критерию на конкретном поле. Для решения данной задачи (выделения зон однородности) предлагается использовать подход, основанный на разделении смеси вероятностных распределений, при котором каждые компоненты смеси моделируются нормальными распределениями с различными параметрами. При этом математическое ожидание соответствует среднему

значению оптического показателя внутри одной зоны, а дисперсия характеризует разброс внутри зоны однородности.

Общая математическая модель смеси распределений, характеризующая изменение значений оптического показателя на поле, имеет вид:

$$f(x) = \sum_{j=1}^k p_j \cdot f(x, \Theta_j),$$

где k – число кластеров (зон однородности); $f(x, \Theta_j)$ – плотность нормального распределения (описывает закон распределения значений оптического показателя x внутри зоны однородности с номером j); $\Theta_j = (a_j, \delta_j^2)$ – неизвестные параметры (математическое ожидание и дисперсия) распределения компоненты с номером j ; p_j – доля зоны однородности (относительная доля наблюдений из данной зоны по отношению к общему числу наблюдений).

В статистической литературе представлены разнообразные подходы и методы решения задачи разделения смеси распределений, но в любом случае процесс решения является довольно трудоемким, поскольку он связан с организацией сложных вычислительных процедур. Ранее авторами были разработаны алгоритм адаптивного вероятностного обучения и его программная реализация для выделения на поле однородных зон по электронным картам урожайности [65, 66]. Такие карты формируются автоматически при уборке зерновых культур с помощью комбайнов, оборудованных мониторами, приемниками GPS/ГЛОНАСС, датчиками массы и влажности зерна, с привязкой показателей урожайности к глобальной системе координат. Электронная карта урожайности состоит из большого числа участков размером в несколько квадратных метров, причем для каждого элементарного участка известна величина урожайности с точной привязкой к координатам ее получения на поле. Электронная карта вычисленных значений оптического показателя на заданном поле также состоит из большого числа пикселей (его размер – пространственное разрешение исходных космических снимков). Каждый пиксель является конкретным значением оптического показателя с точными координатами на сельскохозяйственном поле. Сходная структурная организация и идентичность математических моделей смеси распределений исходных данных позволяют предложить использовать разработку авторов [66] для решения задач кластеризации значений заданного оптического показателя на конкретном поле и последующего выделения соответствующих границ внутривополевой неоднородности.

Для определения степени негативного воздействия стресса на посев следует воспользоваться результатами кластеризации. Кластеризация позволяет получить значения математического ожидания и дисперсии оптического показателя для каждой выделенной зоны

однородности (квазиоднородности) на конкретном поле. Решение задачи осуществляется путем сравнительного анализа данных величин с содержащимися в БЗ диапазонами значений оптимального и угнетенного состояния растений, вызванного конкретным стрессором.

1.2.5. Программная реализация базового алгоритма

Для программной реализации алгоритма [67, 68] формализации и хранения в базе знаний (БЗ) информации о спектральных диапазонах и формулах расчета различных оптических критериев, а также сведений об их значениях, характеризующих физиологическое состояние посева в оптимальных и стрессовых условиях, была разработана специализированная база данных (БД). Структура БД отвечает третьей нормальной форме баз данных, что означает применение принципов нормализации для уменьшения дублирования данных, предотвращения аномалий данных, обеспечения ссылочной целостности и упрощения управления данными (рис. 21).

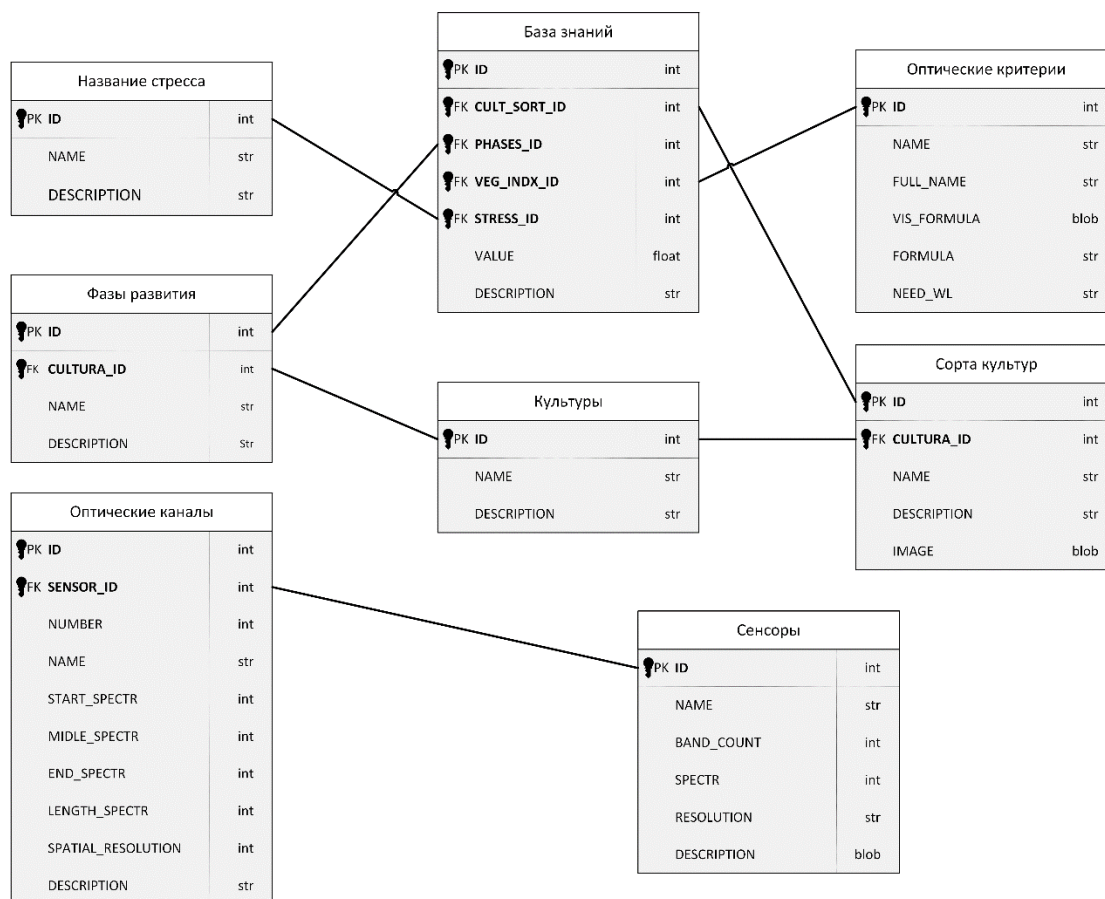


Рис. 21. Структура базы данных

В таблице **Сенсоры** сохраняются названия сенсоров, количество оптических каналов, характеристика охватываемого диапазона, разрешение получаемых снимков и текстовое описание сенсора.

В таблице **Оптические каналы** хранится подробное описание каждого спектрального канала сенсора, которое включает следующую информацию:

- номер по порядку;
- наименование канала;
- левая граница спектрального диапазона;
- середина спектрального диапазона;
- правая граница спектрального диапазона;
- ширина канала;
- пространственное разрешение;
- текстовое описание.

В таблице **Оптические критерии** хранятся:

- краткое название критерия (общепринятая аббревиатура);
- полное название критерия;
- графическое представление формулы (для удобства восприятия человеком);
- машинная запись формулы, содержащая спектральные каналы и арифметические операторы;
- используемые при расчете критерия спектральные диапазоны.

Также в базе данных представлены следующие таблицы:

Культура, в которой содержатся название и описание исследуемых культур:

- номер по порядку;
- наименование культуры;
- расширенное текстовое описание.

В таблице **Сорта культур** содержатся:

- номер по порядку;
- ссылка на культуру, к которой относится сорт;
- наименование культуры;
- расширенное текстовое описание;
- графическое изображение сорта.

В таблице **Фазы развития** содержатся описания этапов развития культур в процессе вегетации:

- номер по порядку;
- ссылка на культуру, к которой относится фаза развития;
- наименование фазы развития;
- расширенное текстовое описание.

В таблице **Стрессы** содержится информация об исследуемых стрессах:

- номер по порядку;
- наименование стресса, который не зависит от типа культуры;
- расширенное текстовое описание.

В таблице **База знаний** содержится следующая информация:

- номер по порядку;
- ссылка на сорт, для которого регистрируется значение оптического критерия;
- ссылка на фазу развития, в которую было произведено измерение;
- ссылка на оптический критерий, который был рассчитан по формуле по результатам измерений;

- стресс, который воздействовал на культуру в момент измерения;
- количественное значение критерия;
- текстовое описание.

Для наполнения базы данных был разработан программный модуль с пользовательским графическим интерфейсом на языке Паскаль в программной среде Rad Studio 11, который позволяет заполнить базу знаний значениями оптических критериев, характеризующих состояние исследуемых сельскохозяйственных культур, подверженных различным стрессам, в основные фазы развития.

1.2.5.1. Формализация и хранение формул расчета различных индексов отражения

Хранение формул расчета различных индексов отражения осуществляется в таблице **Оптические критерии**, атрибуты которой описаны выше. Рассмотрим подробнее описание оптического критерия «содержание хлорофилла».

Таблица 13. Описание оптического критерия в БД

Короткое название критерия	ChlRI
Полное название критерия	Содержание хлорофилла
Графическое представление формулы	$ChlRI = \frac{(R_{750} - R_{705})}{(R_{750} + R_{705} - 2 * R_{445})}$
Машинная запись формулы	$([750;10] - [705;10]) / ([750;10] + [705;10] - 2*[445;10])$
Используемые в расчете критерия спектральные диапазоны	440:450;700:710;745:755

В поле «Графическое представление формулы» имеющим тип blob хранится растровое изображение, понятное человеческому восприятию, но для автоматизации машинного расчета, выражение расчета записывается в машинной записи в поле «машинная запись формулы».

При описании формулы предложено в квадратных скобках указывать границы спектральных каналов, используемых при расчете критерия, которые записываются через двоеточие. Такая запись позволяет в автоматическом режиме выбирать из базы данных конкретные оптические каналы сенсора, которые используются при расчете оптического критерия.

При выборе пользователем нужного критерия из базы данных автоматически выбираются те сенсоры, по комбинации каналов которых возможно рассчитать данный критерий. В качестве примера приведем запись спектральных каналов сенсора Sentinel-2 и Landsat-8 в табл. 14 и 15 «*Оптические каналы*».

Таблица 14. Описание сенсора Sentinel-2 в базе данных

Наименование канала	Левая граница канала	Центр канала	Правая граница канала	Ширина канала	Пространственное разрешение
B1	433	443	453	20	60
B2	458	490	522	65	10
B3	543	560	577	35	10
B4	650	665	680	30	10
B5	698	705	712	15	20
B6	733	740	747	15	20
B7	773	783	793	20	20
B8	785	842	899	115	10
B8a	855	865	875	20	20
B9	935	945	955	20	60
B10	1360	1375	1390	30	60
B11	1556	1610	1655	90	20
B12	2100	2280	2280	180	20

Таблица 15. Описание сенсора Landsat-8 в базе данных

Наименование канала	Левая граница канала	Центр канала	Правая граница канала	Ширина канала	Пространственное разрешение
B1	435	440	451	20	30
B2	452	480	512	60	30
B3	533	560	590	60	30
B4	646	655	673	30	30
B5	851	865	879	28	30
B6	1556	1610	1651	80	30
B7	2107	2200	2294	180	30
B8	503	590	676	180	15
B9	1363	1370	1384	20	30
B10	10600	10895	11190	590	100
B11	11500	12005	12510	1010	100

Например, из представленного в табл. 13 описания индекса содержания хлорофилла следует, что необходимо найти те сенсоры, значения оптических диапазонов каналов которых позволят получить оптический критерий, т.е. необходимо выбрать те каналы, значения которых охватывают спектральный диапазон 440–450 нм, 700–710 и 745–755. Для сенсора Sentinel-2 это будут каналы B1, B5 и B6 соответственно, а значения сенсора Landsat-8 не охватывают необходимые спектральные каналы. Таким образом, при расчете оптического критерия содержания хлорофилла из базы данных изображений будут выбраны только те каналы сенсоров, которые позволят рассчитать значение критерия.

Встречаются случаи, когда характеристики критерия охватывают слишком широкий спектральный диапазон. Например, при расчете NDVI используется спектр красного от 645 до

760 нм и ближний инфракрасный от 781 до 1399 нм. В подобном случае выбирается канал, который наиболее полно входит в требуемый диапазон и является самым широким. Для Sentinel-2 из трех подходящих каналов красного диапазона будет выбран B4, а из ближнего инфракрасного – B8, для Landsat-8 это будут B4 и B5 соответственно.

В случае, если формула вычисления оптического критерия требует наличия спектрального диапазона, границы которого охватывают два канала сенсора и полностью не закрывают ни один из них, то выбирается тот канал, центр которого наиболее близок к границе спектрального диапазона оптического критерия.

1.2.5.2. Расчет индексов отражения по заданному оптическому критерию и фазе развития посева

Значения новых критериев заносятся в базу знаний вручную или извлекаются из подгруженных аэрофотоснимков, на которых четко различаются тестовые площадки с заданным стрессором. При наполнении БЗ данными с аэрокосмических снимков пользователь сначала выбирает, для каких культуры, сорта, фазы вегетации, стресса производится измерение. Следующий шаг – на снимке в ручном режиме выделяется зона с известным стрессом, после чего программа рассчитает среднее значение для всех оптических критериев, которые возможно вычислить по конкретному снимку с учетом всех спектральных каналов (рис. 22).

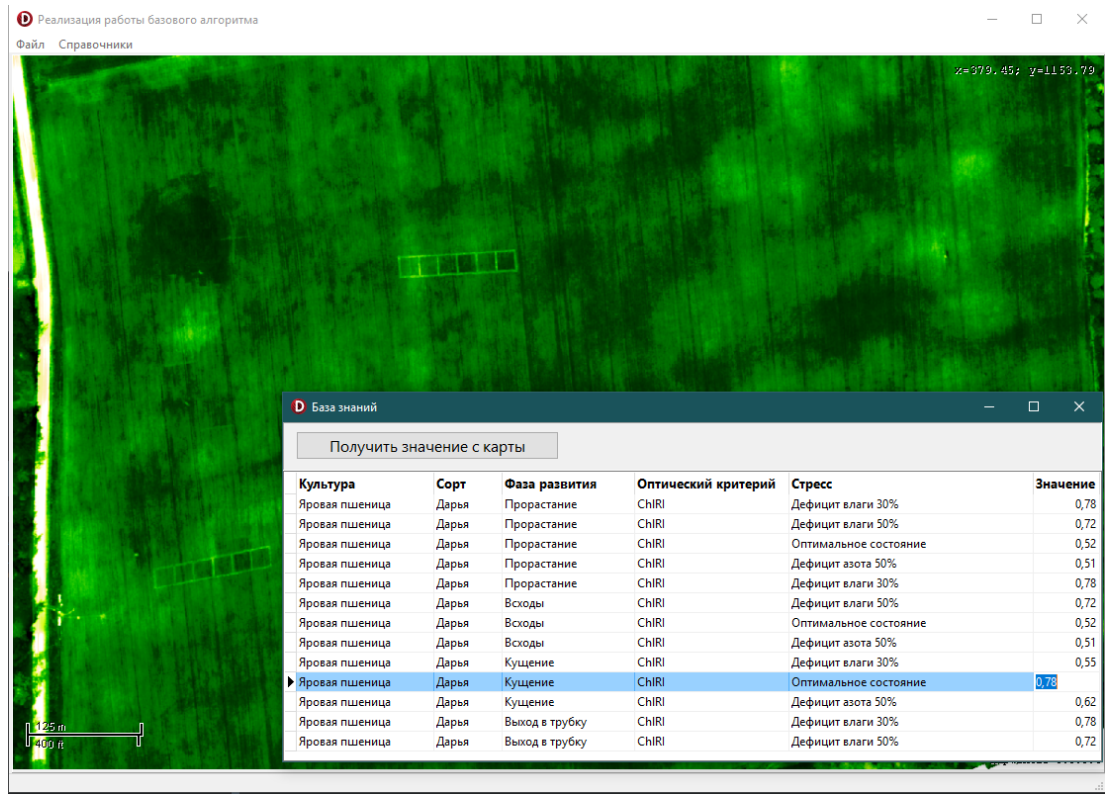


Рис. 22. Пример наполнения базы знаний значениями оптических критериев посева с гиперспектрального снимка

После заполнения БЗ значениями оптических критериев для исследуемых культур возможен переход в режим автоматического обнаружения и выделения границ внутриполевой изменчивости по аэрокосмическим снимкам. Алгоритм работы представлен на рис. 23. Пользователь выбирает имеющийся снимок нужного поля из базы данных, а в случае его отсутствия регистрирует в базе данных новый снимок, указывая, при помощи какого сенсора он был получен, если программа автоматически не распознала тип сенсора. Затем необходимо выбрать контур поля в векторном формате, либо подгрузить его из внешнего источника. Наличие контура поля позволяет уменьшить объем вычислений и снизить вероятность возникновения ошибок, так как алгоритм производит расчеты только в указанных границах. Далее выбираются культура, сорт и фаза развития растений в выделенном контуре. После чего происходит расчет оптических критериев с выделением однородных зон и определением возможных стрессовых факторов в каждой зоне.

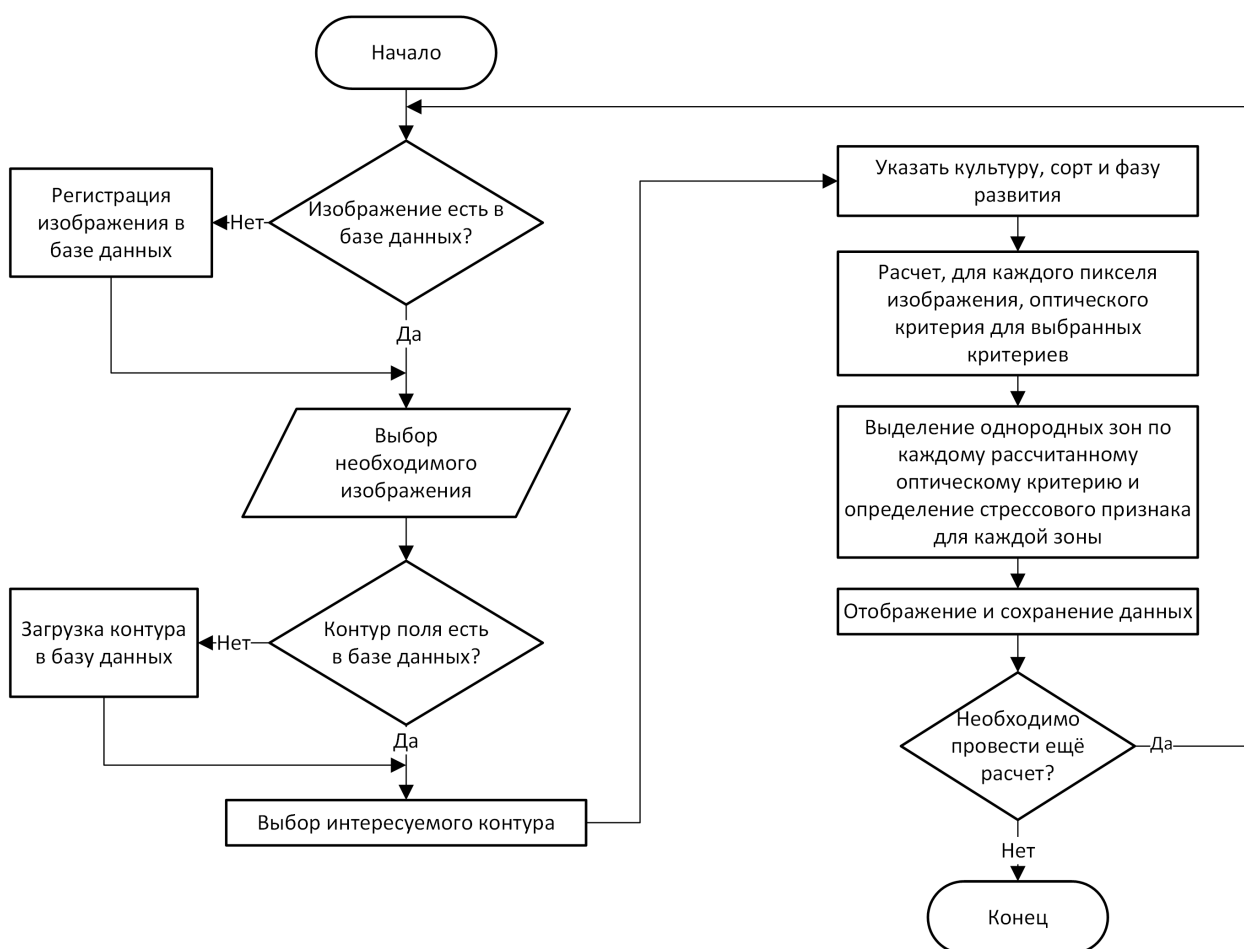


Рис. 23. Алгоритм работы программного модуля обнаружения и выделения границ внутриполевой изменчивости по гиперспектральным снимкам и оптическим критериям

На рис. 24 представлен пример апробации программной реализации алгоритма на экспериментальном поле с тестовыми площадками, на которых физически смоделированы два типа стресса: дефицит азота и различная водообеспеченность посева. В частности, для яровой пшеницы сорта Дарья в фазу кущения определены зоны оптимального развития посева (внесение удобрений не требуется), зоны, где необходимо проведение подкормок азотными удобрениями в дозе 50 % от оптимальной, и зоны, в которых посевы испытывают недостаток влаги, а внесение удобрений нецелесообразно.

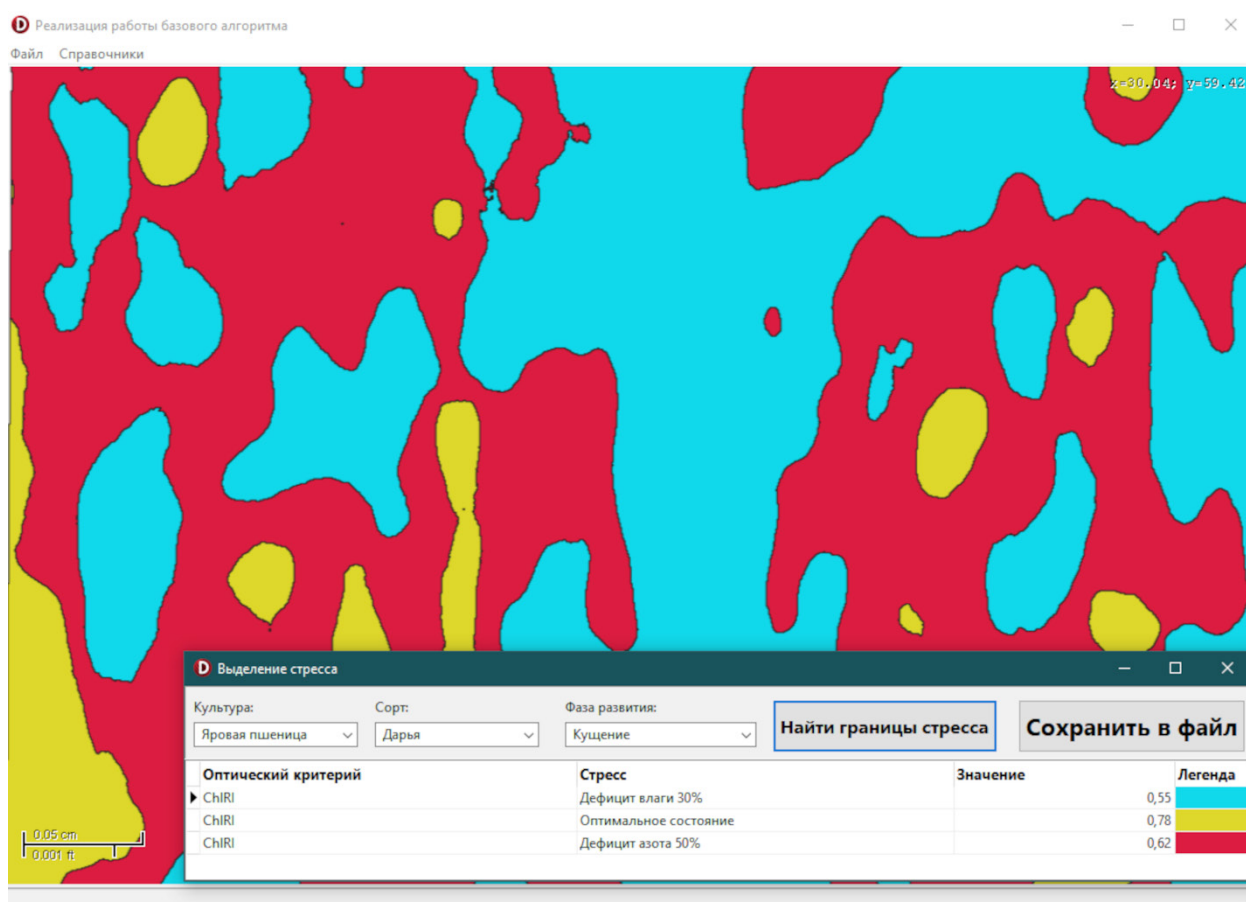


Рис. 24. Пример выделения зон внутриполевой неоднородности с определением типа стресса

Результаты расчета сохраняются в векторном формате, что позволяет в дальнейшем определить дифференцированное воздействие для выделенных зон с целью получения оптимальной урожайности.

2. НАУЧНАЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФРАСТРУКТУРА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТА

Перспективным подходом к выявлению внутривидовой изменчивости для целей точного земледелия (ТЗ) является использование данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Однако процесс интерпретации данных ДЗЗ весьма сложен и пока малоэффективен при решении задач непосредственного управления производственным процессом сельскохозяйственных культур. Необходимы новые методы исследования корреляционных связей дистанционно и контактно измеренных оптических характеристик посевов и выявления функциональных зависимостей между ними и динамикой изменяемых неуправляемых и управляемых факторов продуктивности (дозы удобрений, нормы высева семян, нормы полива и др.). Для получения такой информации была разработана и создана научно-методическая и технологическая инфраструктура для планирования и проведения комплексных исследований по сопряженной дистанционной и наземной диагностике, мониторингу и оценке состояния посевов в основные фазы развития посредством физического моделирования различных условий возделывания растений в полевых условиях. Организация и проведение таких комплексных исследований включали в себя закладку специализированных прецизионных опытов, в рамках которых одновременно проводилась дистанционная и наземная диагностика. Разнородные данные, получаемые таким образом с помощью различных дистанционных и наземных измерительных систем в одни и те же сроки и на одних и тех же участках, необходимы для повышения точности диагностики и определения критериев и идентификационных показателей состояния посевов. Рассмотрим более подробно методологические подходы и концептуальную схему проведения комплексных исследований, направленных на расширение возможностей использования данных ДЗЗ в информационном обеспечении современных систем точного земледелия, включая создание геопространственной базы разнородных данных, а также перспективы использования беспроводных сенсорных сетей (БСС) для оперативного контроля и прогноза изменений гидротермических характеристик и неуправляемых метеорологических показателей, влияющих на рост и развитие посевов.

2.1. Объекты и методологические основы организации полевых исследований

Объектом исследования являлись посевы зерновых культур (озимая и яровая пшеница, ячмень) на опытных полях севооборотов биополигона Меньковского филиала Агрофизического научно-исследовательского института (Ленинградская обл., 59°34' с. ш., 30°08' в. д.). Природно-климатические условия биополигона площадью 538 га достаточно изучены [69]. Почвенный покров, представленный дерново-подзолистыми почвами, является

типичным для пахотных земель Ленинградской области и Северо-Западного региона в целом. Электронная почвенная карта полигона в масштабе 1:10000 построена по результатам почвенного обследования 2005 г., заложено и описано 347 разрезов глубиной от 1 до 1,5 метров. Агрохимическое обследование опытных полей осуществлено в 2019 г. с помощью разработанного в АФИ мобильного комплекса с навигационным и геоинформационным обеспечением. Площадь элементарных участков для отбора средней пробы составляла 1 га. Анализ почвенных проб показал, что содержание общего азота в почве опытных полей полигона варьировалось от 0,15 % до 0,41 %, фосфора — от 160 до 720 мг кг⁻¹. Содержание калия в почве также было высоким и составляло от 169 до 367 мг кг⁻¹, содержание гумуса – 3,6–5,6 %. По величине pH почвы полигона относятся к группе слабокислых или близких к нейтральным. Детальное описание результатов почвенного обследования земель полигона и мониторинг изменений тех или иных показателей поддерживаются с помощью геоинформационного модуля ГИС-АФИ [70].

На рис. 25 представлена концептуальная схема научно-методической инфраструктуры для выявления идентификационных показателей, необходимых для оценки состояния посевов на основе результатов сопряженных дистанционных и наземных исследований. Для формирования такой информации разработана методология организации и проведения прецизионных экспериментов с использованием тестовых площадок и результатов сопряженных дистанционных исследований, осуществляемых при помощи беспилотных летательных аппаратов [55, 71].

2.1.1. Роль тестовых площадок

Для количественной оценки состояния посевов на всей площади поля и выделения однородных технологических зон закладываются тестовые площадки. Тестовые площадки — это незначительные по площади участки поля. Их площадь составляет от 10 м² до 100 м² в зависимости от задачи исследования, используемого инструментария и сельскохозяйственной техники. При дистанционной оценке состояния посевов и выделении технологических зон внесения удобрений и других агрохимикатов с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) площадь тестовых площадок должна быть достаточной, чтобы провести их идентификацию по аэрофотоснимкам и выполнить все необходимые измерения оптических характеристик растительного покрова в пределах каждой площадки. На тестовых площадках физически моделируются стрессовые и благоприятные для роста и развития сельскохозяйственных культур условия, в результате растения на тестовых площадках имеют различные оптические характеристики. Таким образом, тестовые площадки играют роль источника опорной информации и своеобразных эталонов для выявления различных связей

между оптическими показателями и изучаемым интервалом изменений управляемых факторов продуктивности сельскохозяйственных культур (дозы удобрений, нормы высева и др.) [1]. Определение оптических показателей основано на расчете индексов отражения, представляющих собой те или иные комбинации (формулы) фиксируемых величин отражения радиации от посевов или почвы в различных спектрах электромагнитного излучения. В связи с этим территория для закладки тестовых площадок выбирается на основе сложившегося на опытном поле распределения агрохимических показателей с целью минимизации влияния любой почвенной неоднородности, кроме моделируемой.



Рис. 25. Концептуальная схема выявления идентификационных показателей оценки состояния посевов на основе сопряженных дистанционных и наземных исследований

Так, например, тестовые площадки для оценки эффективности применения различных агроприемов оперативного прецизионного управления азотным режимом зерновых культур – это участки поля с различными дозами азотных удобрений. Для растений создаются различные, но известные условия азотного питания, охватывающие весь спектр доз от 0 до избыточной нормы внесения. В результате на тестовых площадках формируется растительный покров, который имеет оптические характеристики, соответствующие различным уровням обеспеченности растений азотом [72]. Растения, размещенные на тестовых участках площадью от 10 м² до 25 м², хорошо различаются на аэрокосмических снимках, что позволяет определить значения оптических показателей на каждой тестовой площадке и построить калибровочную функцию связи показателей с дозами азотных удобрений. Использование тестовых площадок с различным содержанием азота в почве позволяет выделить на поле ареалы с разной потребностью растений в азоте. Данный подход обеспечивает оперативное решение задачи пространственно-дифференцированного внесения азотных удобрений без использования дополнительного измерительного оборудования, что существенно снижает стоимость производства и может эффективно применяться при прецизионном возделывании зерновых культур на всей территории России.

Для реализации проекта ежегодно закладывались прецизионные полевые эксперименты с тестовыми площадками (квадратные участки площадью по 100 м²), засеянными различными зерновыми культурами. Непосредственно перед посевом в почву площадок вносилась строго контролируемая линейка доз азотных удобрений, включающая оптимальные для растений значения содержания азота в почве, а также его дефицит. На фоне различной обеспеченности азотом моделировались другие виды стрессов.

В сезон 2019–2020 гг. были заложены полевые эксперименты с тремя зерновыми культурами: озимой пшеницей, яровой пшеницей и ячменем. В посевах каждой культуры было заложено по 12 тестовых площадок (всего 36) с различными дозами азотных удобрений в диапазоне от 0 до 200 кг д.в. га⁻¹ с шагом 40 кг для озимой и яровой пшеницы, от 0 до 150 кг д.в. га⁻¹ с шагом 30 кг для ячменя. Кроме того, в почве половины площадок был искусственно сохранен дефицит содержания калия в почве. В результате на площадках был смоделирован весь спектр азотного питания растений трех зерновых культур, испытывающих стресс, связанный с недостатком азотного питания на фоне оптимального обеспечения макроэлементами (фосфор и калий) и дефицита калия.

В 2021 г. был заложен эксперимент с яровой пшеницей. На шести тестовых площадках, помимо различных доз азотных удобрений (от 0 до 200 кг д.в. га⁻¹ с шагом 40 кг), были предусмотрены две нормы высева семян. Для формирования различной густоты посевов

каждая тестовая площадка была разделена на два участка площадью по 50 м², на одном из которых высевалось по 500, а на другом – по 600 штук семян на квадратный метр.

В 2022 г. в посевах яровой пшеницы было заложено 12 тестовых площадок площадью 100 м² (по 6 на двух участках поля - избыточно увлажненном в низине и на возвышенности, где отмечается дефицит влаги). Дозы азота варьировались от 0 (удобрения не вносились) до 200 кг га⁻¹ с шагом 40 кг га⁻¹. Таким образом, на площадках были физически смоделированы два типа стресса: дефицит азота и различная водообеспеченность посевов.

В течение каждого вегетационного сезона площадки дважды прокашивались триммером по периметру для лучшей визуализации на аэрофотоснимках. В основные фенологические фазы развития зерновых культур (кущение, выход в трубку, колошение, цветение) осуществлялась аэрофотосъемка тестовых площадок с посевами при помощи квадрокоптера Геоскан 401, оснащенного мультиспектральной камерой RedEdge-MX высокого пространственного разрешения, позволяющей получать изображения посевов одновременно в пяти каналах (синий, зеленый, красный, красный край и ближний ИК), для дистанционной оценки динамики развития и состояния возделываемых культур. Параллельно с аэрофотосъемкой в те же даты на тестовых площадках проводился отбор образцов растений для последующего измерения индексов отражения от поверхности растений с помощью миниатюрного оптоволоконного спектрометра HR 2000 фирмы Ocean Optics (США). Измерения позволили получить оперативные значения оптических характеристик в различных спектральных диапазонах, соответствующие заданным условиям развития растений на тестовых площадках, а также определить динамику изменения агрофизических, агрохимических показателей и метеопараметров. Для систематизации, хранения и обеспечения доступа к разнородной информации разработана структура и создан инструментальный интерфейс формирования геопространственной базы данных.

2.2. Геопространственная база разнородных данных

2.2.1. Научно-методические основы и инструментарий для ее создания

Стремительное развитие информационных технологий способствовало расширению применения в задачах точного земледелия больших геопространственных данных. При этом актуальным и перспективным направлением становится использование в качестве исходной информации разнородных данных, в том числе данных дистанционного зондирования. Следует отметить, что большинство подобных проектов основано на использовании находящихся в открытом доступе спутниковых снимков (Landsat, Sentinel и т.п.) с низким пространственным разрешением (10–30 м/пиксель), причем количество снимков в исходном

наборе данных, как правило, не превышает несколько тысяч, и аэрофотоснимки используются в основном в четырех диапазонах (красный, зеленый, синий, ближний инфракрасный).

По результатам анализа современного состояния исследований в области хранения и систематизации опытной геопривязанной информации для целей ТЗ был сформирован ряд основных требований к геопространственной БД:

- Экспериментальные данные должны быть привязаны к географическим координатам (в том числе результаты наземных измерений).
- БД должна содержать полигоны тестовых площадок и сельскохозяйственных полей.
- Основные типы данных, которые необходимы для решения задач, поставленных в рамках проекта РФФИ: спутниковые и аэрофотоснимки, метеоданные, результаты наземных измерений (агрохимические и агрофизические показатели), информация о севообороте, агрооперациях и урожайности.
- Экспериментальные данные также должны быть датированы.
- Снимки, хранящиеся в БД, должны быть предварительно обработаны.
- Реализация БД должна позволять использовать функционал для пространственной работы с данными (расчет площадей, расстояний и т.п.).
- БД должна легко имплементироваться в различные проекты (Госзадание, РФФИ и др.).
- При имплементации БД должен быть предусмотрен доступ к ней пользователей разного уровня: администратор, редакторы (с возможностью внесения данных), читатели (без возможности внесения новой информации), внешние пользователи.
- Для реализации БД предпочтительно использование бесплатного инструментария.

Для создания геопространственной БД была использована свободная объектно-реляционная система управления базами данных PostgreSQL с пространственным расширением PostGIS для реализации стандартизованного типа данных и соответствующих функций. Выбор инструментов обоснован возможностью поддержки большого числа ГИС-пакетов, в том числе свободных, например QuantumGIS, NextGIS, Open Jump, GRASS и др. Кроме того, открытость СУБД способствует появлению множества бесплатных программных библиотек для разработчиков ГИС-систем и интернет-приложений (MapServer, GeoServer, GeoTools) [73].

2.2.1.1. Первичная обработка, накопление и хранение космических и аэрофотоснимков

Наряду с экспериментальной информацией, такой как данные агрофизических, агрохимических обследований, метеоданные и др., привязанные к географическим координатам, основным элементом БД также являются предобработанные изображения сельскохозяйственных полей (ортофотопланы). Они формируются на основе аэрофотосъемки с использованием беспилотных летательных аппаратов (БЛА), автоматизированных

беспилотных авиационных систем (БАС) и спутниковой съемки (Landsat и Sentinel). Аэрофотосъемка в АФИ проводится с 2003 г. с помощью БЛА самолетного типа собственной разработки. С 2015 г. для этого используется БАС Геоскан-401. С 2022 г. дополнительно применяется БЛА DJI Matrice 600 pro. Все указанные аппараты позволяют получать мультиспектральные и гиперспектральные изображения высокого качества. Перечень и основные характеристики используемого оборудования представлены на рис. 26.

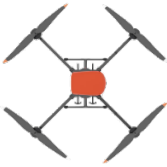
БАС	
"Геоскан 401" 	"DJI Matrice 600 pro" 
Комплектация: - БЛА с бортовым комплексом(4 винта, 2 аккумулятора 10S, GPS-приемник, RTK-приемник, система автопилотирования, плата ориентации в пространстве и т.д.) - Наземная станция управления (ноутбук с ПО geoscan planner, радиомодуль)	Комплектация: - БЛА с бортовым комплексом(6 винтов, 6 аккумуляторов, GPS-приемник, система автопилотирования, плата ориентации в пространстве и т.д.) - Наземная станция управления (ноутбук с ПО, пульт управления, планшет)
Время полета коптеров	
-до 60 минут	-до 30 минут
Радиус действия радиосигнала	
-до 50 километров	-до 5 километров
Рабочая высота	
- 30 - 200 метров	- 30 - 200 метров
Площадь съемки за 1 полет	
- до 50 гектаров	- до 20 гектаров
Максимальная допустимая скорость ветра	
- 10 м/с	- 16 м/с
Полезная нагрузка	
 Micasense RedEdge-MX (5 каналов)	 Resonon Pika-L (281 канал)
GNSS система	
	Базовая станция и Ровер RTK Emlid Reach RS2

Рис. 26. Перечень и основные характеристики оборудования для получения аэрофотоснимков

Получение спутниковых снимков обеспечивается программным модулем автоматизированной загрузки изображений из открытых источников. Результатом применения данного инструментария являются предобработанные ортофотопланы заданной сельскохозяйственной территории.

Аэрофотосъемка осуществляется на биополигоне АФИ в течение вегетационного сезона с периодичностью один раз в декаду. Полетное задание формируется на базе наземной станции управления с помощью программы Geoscan Planner. Полетная группа в программе устанавливает границы участка съемки, площадь которого не превышает максимально допустимую, а также другие параметры аэрофотосъемки (высота полета, число точек на маршруте и т.п.). На рис. 27 представлен пример построенного в программе полетного задания для БЛА Геоскан-401. Для получения изображений высокого пространственного разрешения (5–7 см/пиксель) в качестве полезной нагрузки используются мультиспектральная камера Micasense Rededge MX и гиперспектральная камера PIKA L (рис. 26). Для привязки к географическим координатам высокой точности используется GNSS (Global Navigation Satellite System) система.

Предварительная обработка данных осуществляется автоматически в программах GeoScan Planner и Metashape. Данные для геопривязки передаются во время полета по радиомодему и регистрируются программой GeoScan Planner. После этого создаются файлы привязки для дальнейшей обработки в программе Metashape. Последующая обработка данных проводится в программе Metashape и включает в себя все необходимые шаги для построения ортофотоплана (выравнивание снимков, построение плотного облака точек и трехмерной полигональной модели и др.).



Рис. 27. Пример полетного задания, построенного в программе Geoscan Planner для БАС Геоскан-401

На последнем этапе предварительной обработки аэрофотоснимков осуществляется построение ортофотоплана на основе полученной мозаики изображений. Ортофотоплан представляется как цифровое трансформированное изображение объекта, построенное по перекрывающимся исходным снимкам. Программа автоматически находит так называемые особые точки (разреженные точки изображений, контуры, точки экстремума яркости изображения и т.п.), которые совпадают на снимках. После этого происходит сшивка изображений. В связи с этим целесообразно обеспечивать максимально возможное перекрытие аэрофотоснимков. На рис. 28 представлен пример построенного ортофотоплана местности.

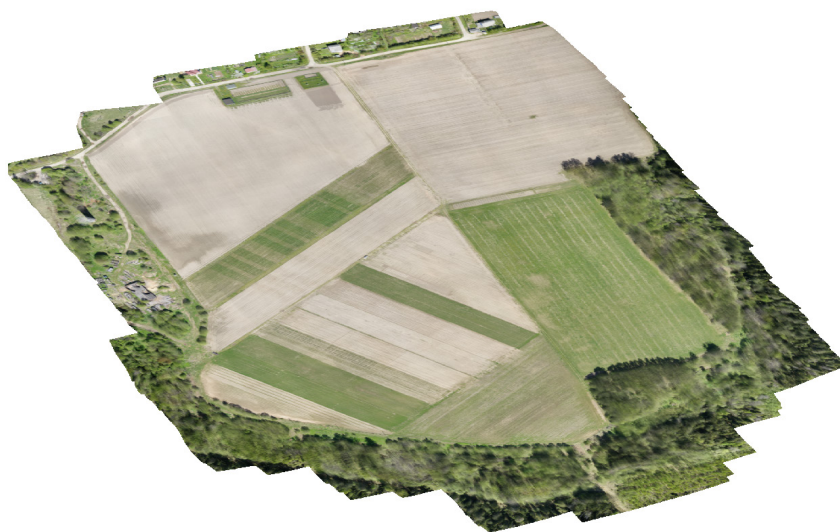


Рис. 28. Пример построенного ортофотоплана биополигона АФИ

2.2.1.2. Структура и содержание созданной БД

На рис. 29 представлена структура разработанной геопространственной БД с указанием типов данных. Представленная база содержит информацию, собранную на биополигоне, на основе которой можно выделить несколько тематических разделов. В БД реализуется 9 таблиц:

- Ortophoto – содержит предобработанные снимки, разбитые на отдельные каналы (от 3 до 281 спектра);
- Crop rotation – данные о севообороте в опытах: культура, цели ее размещения, исполнитель эксперимента;
- Agrotechnology – информация о проводимых на сельскохозяйственном поле технологических мероприятиях;
- Meteo – метеоданные, получаемые на ближайшей метеостанции;
- Yield – данные об урожайности;
- Ground samples – результаты наземных измерений (агрохимические и агрофизические показатели);

- Dictionary – справочник единиц измерения (для агрохимии, метеоусловий и т.п.);
- Field – базовая информация о сельскохозяйственном поле (контуры задействованных территорий, центральные координаты, номера полей);
- Calendar – календарь для датирования информации.

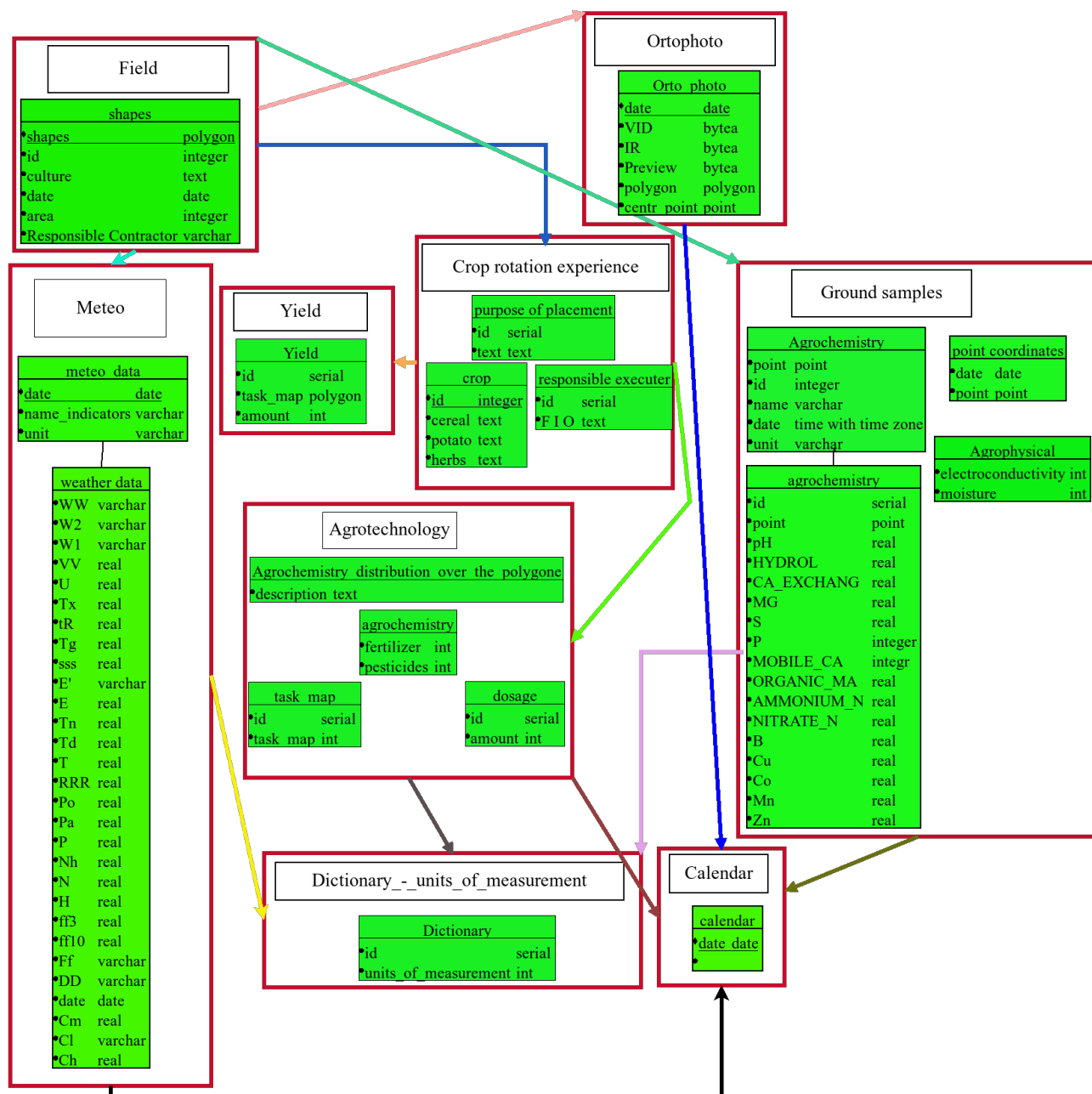


Рис. 29. Структура БД с указанием типов данных.

В настоящее время осуществляется наполнение базы, на сегодняшний день она содержит более 10 000 элементов. Отработаны простые и сложные запросы для обеспечения удобного поиска и доступа к необходимой информации. Проводится разработка графического интерфейса для дальнейшего внедрения и пользовательской работы с базой.

2.3. Применение систем измерения и передачи опорной гидротермической и метеорологической информации для интерпретации аэрокосмических снимков и формирования базы данных

При выполнении работ в рамках гранта использовался комплексный подход с привлечением всех источников информации – данных, полученных со спутников, беспилотных летательных аппаратов, результатов наземных измерений состояния сельскохозяйственных культур, почв и метеоданных. Анализ полученной информации является неотъемлемым этапом обоснования внедрения технологий точного земледелия (ТЗ).

Информационно-измерительные системы (ИИС) для оперативного сбора данных на основе беспроводных датчиков играют важную роль как в качестве опорной информации для интерпретации данных дистанционного зондирования, так и в качестве основного источника данных, характеризующих почвенные и метеорологические условия, в которых развиваются посевы, а также имеют существенное значение для оценки потенциальных рисков поражения посевов. В ТЗ необходимо понимание степени пространственной и временной изменчивости почвенных и иных факторов продуктивности в пределах отдельного сельскохозяйственного поля. Беспроводные сенсорные сети (БСС) как ядро Интернета вещей (IoT) в последние годы постоянно развиваются, и включение БСС для сбора информации является одной из перспективных технологий мониторинга сельскохозяйственных полей. Использование сенсорных сетей открывает возможность для осуществления инструментального контроля в режиме реального времени за динамикой гидротермического состояния почвы и параметрами окружающей среды. Влажность почвы – быстро изменяющаяся характеристика, поэтому задача оперативного высокоточного определения ее значений в полевых условиях является весьма актуальной. Получаемая с помощью БСС информация необходима для повышения точности диагностики, а также выявления критериев и идентификационных показателей состояния посевов на тестовых площадках в специализированных полевых опытах, проводимых в рамках реализации проекта.

В ходе проводимых исследований использовалась разработанная в АФИ ИИС, включающая сенсорные узлы с датчиками наземного и подземного размещения, базовую станцию, оснащенную метеодатчиками, и сервер (рис. 30–33) [37].



Рис. 30. Сенсорный узел, оснащенный оптическим датчиком для мониторинга состояния растительности



Рис. 31. Расположение ИИС на экспериментальном поле



Рис. 32. Сенсорный узел с выдвижной антенной и пятиканальным влагомером полностью подземного размещения



Рис.33. Базовая станция с интернет-каналом передачи данных для мониторинга метеорологических параметров

Автономные сенсорные узлы предназначены для оперативного мониторинга влажности и температуры почвы с высоким временным разрешением. Базовая станция с интернет-каналом передачи данных для мониторинга метеорологических параметров оснащена датчиками, обычно используемыми на метеостанциях для измерения температуры и влажности воздуха, скорости и направления ветра, интенсивности фотосинтетически активной радиации (ФАР), количества атмосферных осадков. Базовая станция также оснащена фотоэлектрическим солнечным модулем поликристаллического типа и аккумулятором с высокой разрядной характеристикой и эксплуатационной устойчивостью, расположенном в герметичном боксе. Сервер обеспечивает беспроводной сбор и обработку данных, полученных сенсорными узлами и базовой станцией. Основное преимущество заключается в том, что разработанная аппаратная и программная архитектура для регистрации, обработки и хранения данных позволяет удаленно управлять системой и подключать другие датчики, используя стандартные беспроводные (ZigBee, LoRa) или проводные интерфейсы (I²C, SDI-12, UART, RS-232 и RS-485).

В 2022 г. проведено усовершенствование печатной платы и корпуса емкостных датчиков скважинного влагомера. Точность измерения диэлектрической проницаемости печатной платы с R-R-C делителем, микроконтроллером и преобразователем интерфейса увеличена за счет повышения плотности монтажа, уменьшения габаритов и массы электронной аппаратуры и, соответственно, печатных плат, и применения полуавтоматизированного метода трассировки плат с учетом обеспечения электромагнитной совместимости электронных компонентов. При этом увеличилась сложность ручного монтажа электронных компонентов, что привело к необходимости использования технологического оборудования, приобретенного за счет средств гранта (автоматического установщика компонентов QiHe TVM802A, трафаретного принтера PUNUI 300x240 и паяльного комплекса Quick 702 ESD). Применение роботизированной системы многократно увеличивает точность установки и повышает качество изготавливаемых плат для влагомеров и контроллеров сенсорных узлов ИИС. Уменьшение размеров платы до 7 см позволило размещать емкостные датчики скважинного влагомера с шагом 10 см, в отличие от шага в 20 см, которым были ограничены влагомеры предыдущего поколения.

Применение ИИС на опытных полях биополигона АФИ в 2020-2022 гг. позволило наполнить базу разнородных данных (см. раздел 2.2) измерительной информацией, что способствовало успешной реализации проекта в части использования в режиме реального времени комплексированных пространственно-атрибутивных опорных показателей для интерпретации аэрокосмических снимков.

3. ПЕРСПЕКТИВЫ МАСШТАБИРОВАНИЯ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Точное земледелия (ТЗ) общепризнанно является мировым трендом адаптации агротехнологий к внутриполевой изменчивости управляемых факторов продуктивности. Обоснованное применение технологий ТЗ невозможно без количественной оценки диапазона внутриполевой вариабельности факторов продуктивности на возделываемых сельскохозяйственных полях. Степень варьирования внутриполевой изменчивости, в свою очередь, определяет целесообразность и эффективность дифференцированного подхода к возделыванию сельскохозяйственных культур на конкретной сельскохозяйственной территории. Нужно признать факт пока еще недостаточного использования в России при производстве растениеводческой продукции наиболее активно развивающихся методов и технологий «умного сельского хозяйства» и его ключевого сегмента – ТЗ. При складывающихся условиях и тенденциях развития мировой экономики резко возрастает необходимость ускоренной реализации мер по совершенствованию информационно-технической базы интеллектуализации систем управления сельским хозяйством. Эффективная

база для устойчивого развития отрасли - ее цифровая трансформация. За счет получения и обработки больших объемов разнородных данных появляется возможность включения в производственный процесс ценной актуальной информации и использования ее для интеллектуализации управления. Интеллектуализация управления в ТЗ направлена на оказание помощи агроному при планировании и оптимальном выборе агротехнологий в сложившихся и ожидаемых условиях и их реализации в поле [74].

Полученные в рамках реализации проекта РФФИ результаты позволяют по оптическим характеристикам посева и на основе их комплексного анализа при помощи методов математической статистики и геостатистики определять внутриполевую изменчивость и степень ее интенсивности. Данная возможность обеспечивает выбор планируемой агротехнологии, которая наиболее подходит для возделывания той или иной сельскохозяйственной культуры на заданной территории. В современном земледелии эффективность производства достигается за счет проектирования биологически и экономически обоснованных севооборотов, а также планирования и последующей реализации адаптивных агротехнологий различной интенсивности, включая технологии точного земледелия. В настоящее время в зависимости от уровня интенсификации процесса производства растениеводческой продукции принято различать четыре категории технологий: экстенсивные (ЭТ), нормальные (НТ), интенсивные (ИТ) и технологии точного земледелия (ТЗ). ЭТ базируются на эксплуатации только естественного плодородия почв. НТ предполагают применение удобрений и средств по уходу за посевами в таких объемах, которые позволят поддерживать средний уровень окультуренности почв. ИТ подразумевают получение действительно возможного урожая высокого качества. Для этого удобрения, стимуляторы роста и развития растений, средства защиты посевов от вредных организмов и полегания применяются в необходимых и достаточных количествах. Важно отметить, что НТ и ИТ предполагают внесение удобрений и других средств по уходу за посевами равномерными дозами по всему полю. Из этого следует, что целесообразность применения НТ и ИТ зависит от внутриполевой пространственной изменчивости. Чем выше вариабельность внутриполевой изменчивости, тем менее эффективны НТ и ИТ (они эффективны, если поле является однородным), а целесообразность использования агроприемов ТЗ в подобном случае повышается. Отличительной особенностью ТЗ является дифференцированный подход к расчету и внесению дорогостоящих средств по уходу за посевами, определяющих конечный результат. Чем выше неоднородность посева, тем эффективнее применение ТЗ.

Вместе с тем переход к технологиям ТЗ требует затрат на приобретение прецизионной сельскохозяйственной техники и навигационного оборудования. Многие руководители хозяйств не решаются на это, поскольку не уверены, что затраты окупятся, и используют

обычные сельскохозяйственные машины для реализации НТ и ИТ. Поэтому решение данной актуальной проблемы позволит осуществлять обоснованный выбор в пользу применения технологий ТЗ или НТ и ИТ и обеспечит снижение технологических рисков в современном земледелии. Без решения данной проблемы отечественное сельское хозяйство будет развиваться лишь по догоняющей модели.

При решении актуальной проблемы обоснованного выбора той или иной агротехнологии в зависимости от степени интенсивности ее применения первостепенное значение имеет количественная оценка внутриполевой изменчивости. Данная ключевая задача ТЗ решается с помощью двух новых методов, разработанных и апробированных в ходе реализации проекта РФФИ. Один из них позволяет определить внутриполевую неоднородность и степень ее интенсивности с помощью вариограммного анализа аэрокосмических снимков. Другой метод основан на комплексной оценке динамики изменения значений оптических показателей различных индексов отражения, характеризующих физиологическое состояние посевов в оптимальных и стрессовых условиях. Однако для практического использования и масштабируемости полученных результатов перспективно разработать автоматизированную систему дистанционного определения целесообразности использования агроприемов ТЗ на заданной сельскохозяйственной территории. По сути речи идет о создании новой системы дистанционного мониторинга (СДМ), которую поддерживает Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных Института космических исследований (ИКИ) РАН (ЦКП «ИКИ-Мониторинг»). Центр ИКИ РАН в настоящее время поддерживает более 20 специализированных СДМ, которые созданы для изучения различных явлений и процессов, а также решения конкретных задач в научных или прикладных целях. Создание новой СДМ в интересах «умного сельского хозяйства» и ее успешная апробация позволят включить программный функционал в ЦКП «ИКИ-Мониторинг» для дальнейшей использования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дистанционный мониторинг позволяет существенно увеличить масштабы прогнозирования урожая и повысить эффективность оперативного контроля за состоянием посева для управления продукционным процессом при помощи систем точного земледелия. Однако процесс дешифрирования информации, потенциально заложенной в оптических характеристиках растений, довольно сложен и пока является малоэффективным. Поэтому любые новые методы исследований, а особенно результаты определения внутриполевой изменчивости, оказываются весьма актуальными. В рамках работ по проекту научным коллективом развиты теоретические представления об использовании методов геостатистики

применительно к количественной оценке целесообразности перехода к агроприемам ТЗ на заданном сельскохозяйственной поле, разработан соответствующий инструментарий для функционального описания эмпирических вариограмм и аналитического выявления степени неоднородности, а также создано алгоритмическое и программное обеспечение для обнаружения и выделения границ неоднородности по оптическим критерием и гиперспектральным снимкам.

По сути, главная цель исследований, которая заключалась в существенном расширении возможностей количественной оценки внутриполевой неоднородности по данным дистанционного зондирования Земли и наземной измерительной опорной информации, достигнута. Об этом свидетельствуют результаты проведенных вычислительных экспериментов и апробации разработанного инструментария в полевых условиях. По мере создания в перспективе автоматизированной системы дистанционного мониторинга и ее включения в функционал ЦКП «ИКИ-Мониторинг» ИКИ РАН масштабы применения полученных результатов в реальном секторе производства растениеводческой продукции и сырья беспрецедентно возрастут.

Список литературы

1. 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.
2. 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. P. 990–1009.
3. Godwin R. J., Richards T. E., Wood G. A., Welsh J. P., Knight S. M. An economic analysis of the potential for precision farming in UK cereal production // *Biosystems Engineering*. 2003. Vol. 84, is. 4. P. 533–545.
4. Korotchenya V. Digital agriculture and agricultural production efficiency: exploring prospects for Russia // *Revista ESPACIOS*. 2019. Vol. 40, no. 22. P. 22–35.
5. Mulla D. J. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps // *Biosystems Engineering*. 2013. V. 114. Iss. 4. P. 358–371.
6. Sylvester-Bradley R., Lord E., Sparkes D.L., Scott R.K., Wiltshire J. J. J., Orson J. An analysis of the potential of precision farming in Northern Europe // *Soil Use and Management*. 1999. V. 15. Iss. 1. P. 1–8.
7. 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. P. 42–51.
8. Van Meirvenne M. Is the soil variability within the small fields of Flanders structured enough to allow precision agriculture? // *Precision Agriculture*. 2003. Vol. 4, is. 2. P. 193–201.
9. Точное сельское хозяйство (Precision Agriculture): учебно-практ. пособие / под ред. Д. Шпаара, А.В. Захаренко, В.П. Якушева. СПб., 2009. 397 с.
10. Mercer W. B., Hall A. D. The experimental error of field trials // *Journal of Agricultural Science*. 1911. Vol. 4. P. 107–132.
11. Fairfield S. H. An empirical law describing heterogeneity in the yield of agricultural crops // *The Journal of Agricultural Science*. 1938. Vol. 28. No. 1. P. 1–23.
12. 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 Journal*. 1994. Vol. 58. No. 5. P. 1501–1511.
13. 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. P. 273–292.
14. 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. P. 130–145.
15. 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. P. 101–113.
16. Matheron G. Principles of geostatistics // *Economic Geology*. 1963. Vol. 58. No. 8. P. 1246–1266.
17. 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. P. 562–590.
18. 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. P. 107.
19. Jiang Q. X., Fu Q., Wang Z. L. Research on precision irrigation in Western Semiarid Area of Heilongjiang province in China based on GIS // in *IFIP International Federation for Information Processing*, Volume 258; *Computer and Computing Technologies in Agriculture*. 2008. Vol. 1. P. 359–370.
20. 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. P. 1–19.
21. 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. P. 957–971.
22. Eldeiry A. A., Garcia L. A. Comparison of ordinary kriging, regression kriging, and cokriging techniques to estimate soil salinity using LANDSAT images // *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 2010. Vol. 136. No. 6. P. 355–364.
23. Adjorlolo C., Mutanga O. Integrating remote sensing and geostatistics to estimate woody vegetation in an African savanna // *Journal of Spatial Science*. 2013. Vol. 58. No. 2. P. 305–322.

24. Viggiano M., Busetto L., Cimini D., Di Paola F., Gerdali 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. P. 107590.
25. 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. P. 116-128.
26. 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.
27. 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. P. 107204.
28. Castrignano A., Belmonte A., Antelmi I., Quarto R., Quarto F., Shaddad S., Sion V., Muolo M. R., Ranieri N. A., Gadaleta G., Bartocetti E., Riefole 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. P. 141814.
29. 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. P. 3736–3759.
30. 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. P. 159–170.
31. Park N. W., Kyriakidis P. C. A geostatistical approach to spatial quality assessment of coarse spatial resolution remote sensing products // *Journal of Sensors*. 2019. Vol. 2019. P. 7297593.
32. 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. P. 309-323.
33. 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. P. 316-327.
34. Yang B., Tong S. T. Y., Fan R. Sharpening land use maps and predicting the trends of land use change using high resolution airborne image: A geostatistical approach // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2019. Vol. 79. P. 141-152.
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. P. 112381.
36. 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. No. 12. P. 1463-1471.
37. 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.
38. Демьянов В. В., Савельева Е. А. Геостатистика: теория и практика. М.: Ин-т проблем безопасности развития атомной энергетики РАН; Наука, 2010. 327 с.
39. Якушев В. П., Жуковский Е. Е., Петрушин А. Ф., Якушев В. В. Вариограммный анализ пространственной неоднородности сельскохозяйственных полей для целей точного земледелия: метод. пособие. СПб.: АФИ. 2010. 52 с.
40. 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. P. 471–487.
41. 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. P. 285–302.
42. Roudier P., Tisseyre B., Poilve H., Roger J.M. Management zone delineation using a modified watershed algorithm // *Precision Agriculture*. 2008. Vol. 9. No.5. P. 233–250.
43. 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. P. 335–343.
44. 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. P. 105100–105115.

45. Бондур В.Г., Современные подходы к обработке больших потоков гиперспектральной и многоспектральной аэрокосмической информации // Исследование Земли из космоса. 2014. № 1. С. 4–16.
46. Oliver M. A. An overview of geostatistics and precision agriculture // *Geostatistical applications for precision agriculture*. Netherlands: Springer, 2010. P. 1-34.
47. Webster R., Oliver M. A. *Geostatistics for environmental scientists*, Second edition. USA, NY: John Wiley and Sons, Ltd, 2007. 330 p. DOI:10.1002/9780470517277
48. Якушев В. П., Буре В. М., Митрофанова О. А., Митрофанов Е. П. Применение методов геостатистики для анализа целесообразности перехода к технологиям дифференцированного внесения агрохимикатов // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2020. Т. 16. № 1. С. 31-40.
49. 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. 2020. Т. 17. № 2. С. 114–122.
50. Kanash E.V., Osipov Ju.A. 2009. Optical signals of oxidative stress in crops physiological state diagnostics. Proc. 7th European Conference on Precision Agriculture (Wageningen, Netherlands, 2009) /E.J. van Henten, D. Goense, C. Lokhorst (eds.). Wageningen, 2009. P. 81-89.
51. Якушев В.П., Канаш Е.В., Осипов Ю.А., Лекомцев П.В., Воропаев В.В. 2010. Оптические критерии при контактной и дистанционной диагностике состояния посевов // Сельскохозяйственная биология. № 3. С. 94–101.
52. Yakushev V.P., Kanash E.V. 2011. Evaluation of plants nitrogen status by colorimetric characteristics of crop canopy presented in digital images // *Precision Agriculture*, edited by John V. Stafford, Ampthill, UK. Papers presented at the 8th European Conference on Precision Agriculture, 2011, Prague, Czech Republic, 11–14 July 2011, P. 341–351.
53. Семёнов В. А. Полевой опыт в аграрной науке (новая концепция). М.: Россельхозакадемия, 2004. 32 с.
54. 5 Иванов А. И., Лекомцев П. В. Методология мониторинга неоднородности состояния мелиорированных земель на основе развития физико-технической базы адаптивно-ландшафтного земледелия. СПб., 2013.
55. Якушев В.П., Канаш Е.В., Конев А.А. и др. 2010. Теоретические и методические основы выделения однородных технологических зон для дифференцированного применения средств химизации по оптическим характеристикам посева (практическое пособие). СПб.: АФИ. 2010. 60 с.
56. Yakushev V., Kanash E., Rusakov D., Blokhina S. Specific and non-specific changes in optical characteristics of spring wheat leaves under nitrogen and water deficiency. *Advances in Animal Biosciences: Precision Agriculture (ECPA) 2017*, (2017), 8:2, pp 229–232. The Animal Consortium 2017. doi:10.1017/S204047001700053X
57. Kanash E.V., Panova G.G., Blokhina S.Yu. Optical criteria for assessment of efficiency and adaptogenic characteristics of biologically active preparations. *Acta Horticulturae*. 2013. № 1009. С. 37-44.
58. Ю. В. Чесноков, Е. В. Канаш, Г. В. Мирская, Н. В. Кочерина, Д. В. Русаков, У. Ловассер, А. Бёрнер Картирование QTL индексов диффузного отражения листьев яровой гексаплоидной пшеницы (*Triticum aestivum* L.). – Физиология растений, Том 66, номер 1, 2019
59. Якушев В.П., Канаш Е.В., Русаков Д.В., Якушев В.В., Блохина С.Ю., Петрушин А.Ф., Блохин Ю.И., Митрофанова О.А., Митрофанов Е.П. Корреляционные зависимости между вегетационными индексами, урожаем зерна и оптическими характеристиками листьев пшеницы при разном содержании в почве азота и густоте посева.- Сельскохозяйственная биология, 2022, том 57, N 1, с. 98-112
60. Yakushev V., Kanash E., Rusakov D., Blokhina S. Specific and non-specific changes in optical characteristics of spring wheat leaves under nitrogen and water deficiency. *Advances in Animal Biosciences: Precision Agriculture (ECPA) 2017*, (2017), 8:2, pp 229–232. The Animal Consortium 2017.
61. Prasad B, Carver BF, Stone ML, Babar MA, Raun WR, Klatt AR. Genetic analysis of indirect selection for winter wheat grain yield using spectral reflectance indices. *Crop Science*. 2007. V.47 P. 1416–1425.
62. Якушев В.П., Канаш Е.В., Якушев В.В., Матвеев Д.А., Русаков Д.В., Блохина С.Ю., Петрушин А.Ф., Митрофанов Е.П. Новые возможности автоматизации процесса обнаружения внутриполевой неоднородности по гиперспектральным снимкам и оптическим критериям // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 24-32.
63. Якушев В. П., Матвеев Д. А., Петрушин А. Ф., Блохина С. Ю., Канаш Е. В., Якушев В. В. Новый метод количественной оценки внутриполевой изменчивости по оптическим характеристикам

- посевов для точного земледелия // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2020. №2. С. 4-10. DOI: 10.30850/vrsn/2020/2/4-10
64. Лупян Е.А., Бурцев М.А., Прошин А.А., Кобец Д.А. Развитие подходов к построению информационных систем дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 3. С. 53–66. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-53-66.
65. Буре В.М. Методологические аспекты статистического анализа в точном земледелии // Докл. российской академии с.-х. наук. 2007. № 6. С. 54–56.
66. Буре В.М., Петрушин А.Ф., Якушев В.В. Автоматизированная система стохастического выделения однородных технологических зон на сельскохозяйственном поле по данным урожайности. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 20008614663 от 29 сентября 2008 г.
67. Автоматизация процесса обнаружения и выделения границ внутриполевой изменчивости по аэрокосмическим снимкам и оптическим критериям // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 6. С.
68. Якушев В.П., Блохин Ю.И., Блохина С.Ю., Буре В.М., Канаш Е.В., Матвеев Д.А., Митрофанов Е.П., Митрофанова О.А., Петрушин А.Ф., Якушев В.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022 г.
69. Шпанев А.М. Экспериментальная база для дистанционного зондирования фитосанитарного состояния агроэкосистем на Северо-Западе РФ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 61-68. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-61-68
70. Якушев В.П., Якушев В.В., Матвеев Д.А. Интеллектуальные системы поддержки технологических решений в точном земледелии // Земледелие. 2020. №1. С. 33-37. DOI: 10.24411/0044-3913-2020-10109
71. Якушев В.В. Точное земледелие: теория и практика. СПб.: ФГБНУ АФИ, 2016. 364 с.
72. Матвеев Д.А., Якушев В.В., Канаш Е.В., Петрушин А.Ф. Методические подходы к проведению дифференцированных азотных подкормок с использованием тестовых площадок // Агрохимический вестник. 2017. №1. С. 19–24
73. Митрофанов Е.П., Митрофанова О.А., Петрушин А.Ф. Экспериментальные данные для решения задач точного земледелия // Свидетельство о государственной регистрации базы данных. 2021. № 2021620305
74. Михайленко И.М., Якушев В.П. Информационно-техническая база интеллектуализации управления агротехнологиями // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2022. №2. С. 4–11.

ISBN 978-5-905200-49-6



*Якушев Виктор Петрович,
Блохин Юрий Игоревич,
Блохина Светлана Юрьевна,
Буре Владимир Мансурович,
Канаи Елена Всеволодовна,
Матвеев Дмитрий Александрович,
Митрофанов Евгений Павлович.,
Митрофанова Ольга Александровна,
Петрушин Алексей Фёдорович,
Якушев Вячеслав Викторович*

**Теоретические основы дистанционной и наземной количественной оценки
внутриполевой изменчивости для точного земледелия**

Подписано в печать 27.12.2022. Заказ №1
Отпечатано в ФГБНУ АФИ
195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., д. 14.
Тираж 100.