

РОЛЬ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ В ТОЧНОМ ЗЕМЛЕДЕЛИИ

© 2023 г. В. П. Якушев^{a,*}, В. В. Якушев^{a,**}, С. Ю. Блохина^{a,***}, Ю. И. Блохин^{a,****},
Д. А. Матвеев^{a,*****}

^aАгрофизический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: vyakushev@agrophys.ru

**E-mail: mail@agrophys.com

***E-mail: sblokhina@agrophys.ru

****E-mail: blohin3k4@gmail.com

*****E-mail: dmatveenko@inbox.ru

Поступила в редакцию 24.04.2023 г.

После доработки 03.07.2023 г.

Принята к публикации 15.07.2023 г.

Проведена оценка возрастающей роли данных дистанционного зондирования Земли, методов, сервисов и средств их получения и использования в растениеводстве. Рассмотрены основные проблемы, сдерживающие масштабируемость применения аэрокосмических снимков в точном земледелии. Подчеркнута необходимость создания новой методологии исследований, формирования соответствующей физико-технической и экспериментальной инфраструктуры для преодоления обозначенных проблем. Продемонстрировано применение методологии планирования и проведения специализированных экспериментов в сочетании с дистанционным и наземным мониторингом полевых опытов с тестовыми площадками с целью обнаружения внутривидовой неоднородности и определения степени её интенсивности. Для этого создан функционал, реализующий возможности двух новых методов выявления внутривидовой изменчивости и границ её интенсивности по аэрофотоснимкам. В первом случае используется главный инструментальный геостатистики – вариограммный анализ, во втором – системная количественная оценка динамики изменения интегральных оптических характеристик посева.

Ключевые слова: точное земледелие, данные дистанционного зондирования, прецизионные полевые опыты, тестовые площадки, инфраструктура проведения исследований, вариограммный анализ, вегетационные оптические индексы, алгоритмы и программы.

DOI: 10.31857/S0869587323100110, EDN: AACJGA

В настоящее время усиливается роль ряда негативных факторов (изменение климата, прогнозируемый рост населения мира, ограниченность водных и энергетических ресурсов, сокращение площади пахотных земель и др.), оказывающих

существенное влияние на глобальную продовольственную безопасность [1–3]. Актуальным научно обоснованным ответом на необходимость обеспечения продовольственной безопасности России выступает масштабирование процесса перевода сельскохозяйственного производства на новый технологический уклад “умного сельского хозяйства” [4–6]. В основе развития современного агропромышленного комплекса (АПК) лежит природный потенциал нашей страны. В России сосредоточено 9% мировой продуктивной пашни, более половины мировых чернозёмов и 20% запасов пресной воды. Тем не менее без разработки средств автоматизации, обеспечивающих построение адаптивно-ландшафтных систем земледелия для конкретных хозяйств, внедрения биологиче-

ЯКУШЕВ Виктор Петрович – академик РАН, руководитель отдела моделирования адаптивных агротехнологий АФИ. ЯКУШЕВ Вячеслав Викторович – член-корреспондент РАН, заведующий лабораторией информационного обеспечения точного земледелия АФИ. БЛОХИНА Светлана Юрьевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник АФИ. БЛОХИН Юрий Игоревич – научный сотрудник АФИ. МАТВЕЕНКО Дмитрий Александрович – кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник АФИ.

ски и экономически обоснованных севооборотов и соответствующих агротехнологий, включая технологии точного земледелия (ТЗ), отечественному АПК будет крайне затруднительно увеличить производство сельскохозяйственных культур и достичь более высоких экономических показателей. Информационные технологии ТЗ признаны перспективным направлением адаптации агротехнологий к внутритропковой неоднородности агроландшафтов.

Сельскохозяйственные территории нашей страны характеризуются существенной естественной (природной) пространственно-временной неоднородностью, а также антропогенной изменчивостью из-за многочисленных нарушений регламентов и технологий землепользования. В пределах даже одного поля может наблюдаться значительное варьирование агрохимических, агрофизических, фитосанитарных и прочих количественных или качественных показателей, от которых зависит урожайность. Точное земледелие — комплексный подход к управлению производством растениеводческой продукции. Особое внимание уделяется анализу пространственной вариативности показателей, влияющих на формирование урожая, которыми можно управлять посредством дифференциации норм технологического воздействия на посевы в пределах отдельного сельскохозяйственного поля. Особую роль в развитии методологии прецизионного производства играют коммуникационные технологии и сенсорные сети, обеспечивающие автоматизированный сбор разнородной информации и интеллектуальный анализ, что существенно расширяет представление о реальных потребностях сельхозпроизводителей [7, 8]. В процессе планирования и принятия обоснованных управленческих решений используются дополнительные возможности для достижения более высокой производительности и снижения антропогенной нагрузки на систему “посев — среда обитания” [9]. Необходимо признать факт недостаточного использования в нашей стране наиболее активно развивающихся методов и технологий “умного сельского хозяйства” и его ключевого сегмента — точного земледелия — при производстве растениеводческой продукции.

В настоящее время для выявления внутритропковой неоднородности, как правило, применяются преимущественно контактные методы, требующие значительных материальных и временных затрат. Для анализа используются агрохимические и агрофизические показатели дискретно отобранных образцов почвы и растений. Поэтому такое определение изменчивости субъективно, так как обусловлено той или иной схемой отбора образцов [10–12]. Более перспективный, хотя и затратный метод внутритропковых исследований — применение мобильных комплексов для

измерения в движении и картирования основных характеристик пахотного слоя почвы: объемной влажности, электропроводности, температуры и сопротивления горизонтальной пенетрации¹ [13]. Пространственное распределение агрофизических параметров, измеренных с помощью мобильных комплексов, используется для сбора опорной информации, необходимой для дешифрирования аэрокосмических снимков [14].

Данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) позволяют осуществлять интеллектуальный анализ информации, характеризующей состояние посевов на значительных площадях, что практически невозможно при проведении наземных исследований. Учитывая весьма существенную площадь территории России, средствам и технологиям ДЗЗ нет альтернативы при решении задач эффективного управления землями сельскохозяйственного назначения.

В работе [15] авторы предприняли попытку комплексно проанализировать состояние информационного обеспечения процесса проектирования адаптивно-ландшафтных систем земледелия с установлением объективных причин, которые не позволяют повсеместно обеспечить высокие и устойчивые урожаи, потенциально возможные в конкретных почвенно-климатических условиях. Рассмотрены перспективные методы и технологии совершенствования уровня информационного обеспечения сельскохозяйственной отрасли, включая средства и технологии дистанционного зондирования. Так как со времени публикации статьи [15] существенно изменились возможности оперативного получения и анализа данных ДЗЗ (применение мультиспектральной и гиперспектральной камер на платформах беспилотных летательных аппаратов) и был разработан функционал новых методов выявления внутритропковой неоднородности в рамках междисциплинарного гранта РФФИ, авторы посчитали целесообразным обобщить материалы по информационному обеспечению точного земледелия на основе данных дистанционного зондирования. В связи с этим цель настоящей работы — дать оценку современного уровня применения методов, сервисов и средств ДЗЗ в информационном обеспечении сельского хозяйства и систем точного земледелия. Рассмотрены основные проблемы, ограничивающие масштабируемость применения данных ДЗЗ в прецизионном производстве растениеводческой продукции, и обоснована необходимость создания новой методологии исследований и формирования соответствующей физико-технической экспериментальной инфраструктуры для решения указанных проблем. Проанализированы результаты, полученные в рамках развиваемой

¹ Пенетрация — косвенный метод определения физико-механических свойств грунтов внедрением наконечника.

в Агрофизическом научно-исследовательском институте (АФИ) методологии обоснования применения агроприёмов точного земледелия на заданной сельскохозяйственной территории и определения по данным ДЗЗ степени интенсивности внутриполевой изменчивости на основе вариограммного анализа и комплексной оценки динамики изменения ряда оптических индексов, характеризующих состояние посева, а также их сопряжённого использования в специализированных вычислительных экспериментах.

Современное использование дистанционного зондирования в информационном обеспечении точного земледелия. Дистанционное зондирование в сельском хозяйстве основано на оценке взаимодействия отражённого электромагнитного излучения с почвой или растительностью. Радиация, отражённая от посевов сельскохозяйственных культур, содержит информацию о биохимическом составе, физиологическом состоянии растений и позволяет по спектральным характеристикам оценить их реакцию на действие различных стрессоров [16]. Оптические характеристики открытой поверхности почвы в первую очередь зависят от её влажности и содержания органического вещества, а также глинистых минералов и карбонатов кальция или оксидов железа [17, 18]. Из-за этого наблюдается их высокая вариабельность, что затрудняет интерпретацию свойств почвы.

Дистанционные методы в сельском хозяйстве применяются с 1972 г. [19, 20], когда был запущен спутник Landsat 1. Размещённая на нём много-спектральная сканирующая аппаратура позволяла получать изображения с пространственным разрешением 80 м. Запуски в 1984 г. спутника Landsat 5 с аппаратурой для получения изображений с пространственным разрешением 30 м в синем, зелёном, красном, ближнем инфракрасном и трёх инфракрасных диапазонах, а в 1986 г. — спутника SPOT-1 с аппаратурой, позволяющей получать изображения с пространственным разрешением 20 м в тех же диапазонах при частоте получения данных до шести дней, открыли возможности для более качественного и масштабно-го использования данных ДЗЗ для оценки и прогноза состояния агроландшафтов с различными сельскохозяйственными культурами.

Начало более активного применения данных дистанционного зондирования Земли связано с появлением и развитием в конце XX в. точного земледелия. Исследователи давно осознали необходимость составления почвенных карт с целью устойчивого управления природными ресурсами. Знание физических, биологических и химических свойств почвы важно для разработки и реализации стратегий управления сельскохозяйственными культурами, которые выступают важ-

ными компонентами ТЗ. В начале 1990-х годов стали применять проксимальное почвенное зондирование, основанное на измерении пространственной динамики почвенных показателей с помощью сенсоров, установленных на сельскохозяйственной технике [21]. Были разработаны специальные датчики для определения хлорофилла в растениях и принципы проксимального зондирования посевов, которые стали использоваться для управления азотным режимом сельскохозяйственных культур [22, 23]. Существенные изменения пространственного разрешения данных дистанционного зондирования связаны с запуском в 2008–2009 гг. группы спутников: RapidEye (Германия), GeoEye-1 (США) и WorldView-2 (DigitalGlobe). Появилась возможность осуществлять съёмку любой точки планеты и получать качественные данные с разрешением, которое стало составлять несколько сантиметров (GeoEye и WorldView). Периодичность получения снимков сократилась с 18 до 1 дня (WorldView), а количество спектральных полос, доступных для анализа, возросло с 4 до 8. С помощью снимков со спутника GeoEye появилась возможность использовать Интернет для визуализации объектов землепользования в любой части мира.

Дистанционное зондирование имеет большой потенциал при решении задач управления в точном земледелии практически во всех его аспектах — от обработки почвы до уборки урожая [24, 25]. Наряду со спутниковой информацией для решения множества задач ТЗ широко применяются снимки, полученные с беспилотных летательных аппаратов: оперативный мониторинг состояния посевов [26, 27], оценка динамики изменения биомассы на сельскохозяйственном поле [28], обнаружение и классификация посевов [29], выявление вредителей и болезней на сельскохозяйственном поле [30–33] и др. Всё более востребованной для оперативного решения актуальных задач в точном земледелии становится мультиспектральная съёмка [34]. В настоящее время мультиспектральные изображения, получаемые со спутников Landsat, SPOT и Sentinel-2, используются для определения таких показателей посевов, как содержание хлорофилла в растениях, биомасса и урожайность. Однако спектральное разрешение подобных снимков ограничивает точность вычисления значений идентификационных показателей, поэтому подаваемые растениями сигналы о возникших стрессах (например, дефиците питательных веществ, воды, болезнях) невозможно своевременно обнаружить. Гиперспектральные изображения позволяют выявлять спектральные детали, которые могут остаться незамеченными среди мультиспектральной информации из-за их дискретного и разрежённого характера. С помощью гиперспектральных данных удаётся обнаруживать даже едва заметные разли-

чия растительного и почвенного покрова и динамику их изменений с течением времени [35, 36]. Отличительная особенность этих данных — большое количество регистрируемых каналов (от 200 до 1000) и узкая ширина каждого из них (менее 10 нм), что позволяет качественно улучшить мониторинг агроландшафтов, особенно для более детального изучения состояния посевов в интересах поддержки технологии ТЗ. Во всём мире возрастает доступность гиперспектральной съёмки с воздуха или из космоса.

Важно отметить, что аэрокосмические снимки способствуют повышению качества и масштабов информационного обеспечения АПК России для решения различных задач точного земледелия и мелиорации [37]. В 2012 г. в связи с острой необходимостью разработки принципиально новых подходов и методов организации работы с большими объёмами постоянно обновляющейся информации на базе Института космических исследований РАН (ИКИ РАН) был создан Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа данных спутниковых наблюдений (ЦКП “ИКИ-мониторинг”), который активно функционирует и развивается, в том числе в интересах сельского хозяйства [38]. С 2003 г. в ИКИ РАН ежегодно проходит международная конференция “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса” (<http://conf.rse.geosmis.ru/>), с 2015 г. в АФИ — Всероссийская конференция с международным участием “Применение средств дистанционного зондирования Земли в сельском хозяйстве” (<https://agrophys.ru/>). На этих форумах широко освещаются вопросы информационного обеспечения сельского хозяйства данными ДЗЗ.

Основные проблемы, сдерживающие масштабируемость применения данных ДЗЗ в точном земледелии, и перспективы их преодоления. Переход к информационным технологиям точного земледелия в сельскохозяйственном производстве требует немало времени и усилий. Основное отличие ТЗ от традиционных способов земледелия заключается в дифференциации технологических воздействий в соответствии с внутривидовой изменчивостью условий, определяющих ход продукционного процесса и формирование интегральной урожайности. Поэтому фундаментальная проблема перехода к ТЗ — необходимость разработки теории и методов выявления внутривидовой неоднородности по разнородным данным, включая данные ДЗЗ, обеспечивающие непосредственное управление продукционным процессом. Использование данных ДЗЗ в растениеводстве сдерживается по ряду объективных причин. Прежде всего это затраты на приобретение сельскохозяйственной техники, навигационного оборудования и программного обеспечения, неочевидное осознание будущего экономического эффекта, пробле-

мы интерпретации данных дистанционного зондирования по отношению к почвенно-климатическим условиям производителя, объективные сложности выбора оптимального решения и недостаток профессионализма в целом.

Одной из главных причин, сдерживающих масштабируемость перехода к технологиям точного земледелия (наряду с указанными выше), выступает отсутствие надёжных и недорогих методов обнаружения и количественной оценки степени интенсивности внутривидовой неоднородности по данным ДЗЗ и её пространственного распределения по заданной сельскохозяйственной территории. Отсутствие эффективных методов можно объяснить принципиальной сложностью интерпретации данных дистанционного зондирования. Для их использования при управлении ростом и развитием сельскохозяйственных культур необходимо найти соответствие между реальным состоянием посевов и результатами ДЗЗ. При этом возникает множество трудностей, так как нужно изучить спектры отражения растений в различных условиях, найти соответствие между спектрами отражения и физиологическим состоянием, которое необходимо определить при помощи наземных измерений в конкретный момент. Следует иметь в виду, что даже одно и то же растение на разных типах почвы, в разных погодных или климатических условиях может иметь различный оптический спектр отражения. Поэтому выявленные в одном регионе зависимости не всегда могут быть актуальными для других почвенно-климатических условий.

Для преодоления главной проблемы, сдерживающей масштабируемость перехода к ТЗ посредством разработки эффективных методов обнаружения и количественной оценки степени интенсивности внутривидовой неоднородности по данным ДЗЗ, важно разработать новые подходы, методологическую основу исследований и создать соответствующую инфраструктуру их обеспечения. Общепринятая практика исследований в сельскохозяйственной науке устарела и не соответствует требуемому уровню. Для совершенствования опытного дела необходимы мобильные и стационарные информационно-измерительные комплексы для сопряжённого наземного и дистанционного мониторинга почвенно-климатических условий. Результаты наземных и дистанционных измерений должны анализироваться совместно, дополняя друг друга. Анализ разнородных данных, полученных в одни и те же сроки и на одних и тех же участках полей, будет способствовать повышению точности диагностики и определению зависимостей между оптическими показателями и физиологическим состоянием посевов.

В АФИ разработана и постоянно совершенствуется методология планирования и проведе-

ния сопряжённых дистанционных и наземных исследований, предназначенная для поиска новых подходов к обнаружению внутриполевой неоднородности и идентификационных оптических показателей для оценки состояния посевов в основные фазы развития сельскохозяйственных культур. Полигон института оснащён мобильным и стационарным измерительным оборудованием, средствами аэрозондирования (мультиспектральная камера Micasense RedEdge-MX, гиперспектральная камера Pika L, установленные на беспилотном летательном аппарате Matrice 600 Pro) и роботизированной сельскохозяйственной техникой для проведения агроприёмов ТЗ в полевых условиях. Так, для реализации междисциплинарного проекта РФФИ «Разработка теоретических основ дистанционной и наземной количественной оценки внутриполевой изменчивости для точного земледелия» ежегодно с 2019 по 2022 г. закладывались прецизионные полевые опыты с тестовыми площадками. В 2019–2021 гг. моделировался полный спектр азотного питания с различными нормами высева семян, а в 2022 г., наряду с ним, моделировалась различная водообеспеченность на тестовых площадках. Опытные площади, включая тестовые, засеивались различными зерновыми культурами. Тестовые площадки представляют собой незначительные по площади участки поля (обычно от 10 до 100 м²). На них создаются стрессовые и благоприятные для роста и развития сельскохозяйственных культур условия. Контролируемое физическое моделирование условий на тестовых площадках неизбежно приводит к различию оптических характеристик растений на аэрокосмических снимках. Особенно информативны гиперспектральные аэроснимки, которые были получены в ходе комплексных исследований по обнаружению и выделению границ внутриполевой изменчивости [39, 40]. Тестовые площадки в опытах играют роль источника формирования опорных данных и своеобразных эталонов для выявления и верификации связей между оптическими показателями факторов продуктивности посевов и изучаемым диапазоном их изменения, которым физически возможно управлять.

Важно отметить, что на полигоне АФИ нет оросительной системы, поэтому эффективно управлять стрессовыми и благоприятными условиями водного режима почвы довольно проблематично. Влажность почвы — быстро изменяющаяся характеристика, поэтому оперативный мониторинг её значений необходим для интерпретации данных ДЗЗ. Для этого использовалась разработанная в АФИ информационно-измерительная система, включающая автономные сенсорные узлы с датчиками наземного и подземного размещения, базовую станцию, оснащённую метеодатчиками (рис. 1–3), и удалённый сервер [41].

Автономные сенсорные узлы предназначены для оперативного мониторинга влажности и температуры почвы и беспроводной передачи измерений на сервер.

Базовая станция с интернет-каналом передачи метеорологических данных оснащена датчиками измерения температуры и влажности воздуха, скорости и направления ветра, интенсивности фотосинтетически активной радиации, количества атмосферных осадков. Удалённый сервер обеспечивает беспроводной сбор и первичную обработку данных, полученных сенсорными узлами и базовой станцией.

Таким образом, применение методологии планирования и проведения специализированных экспериментов с тестовыми площадками и сопряжённый дистанционный мониторинг полевых опытов позволили разработать новые подходы к обнаружению внутриполевой неоднородности и определению степени её интенсивности, а также выявить ряд идентифицирующих показателей, характеризующих состояние посевов по данным ДЗЗ.

Полученные результаты будут рассмотрены ниже, здесь же следует отметить роль созданной на полигоне АФИ инфраструктуры для обеспечения исследований и перспективы применения сенсорных сетей как одной из важных составляющих информационно-измерительной системы. С их помощью открывается возможность инструментального контроля динамики агрофизических свойств почвы и метеословий в режиме реального времени, что позволяет более обоснованно устанавливать причину изменения оптических показателей, рассчитанных по аэрокосмическим снимкам. Открываются также перспективы использования динамических математических моделей для прогноза показателей, определяющих ход продукционного процесса сельскохозяйственных культур и урожайность. Представленная инфраструктура обладает преимуществами взаимодополняемости между данными ДЗЗ и наземными синхронными измерениями и вычислениями. Объединение такого подхода с машинным обучением и другими аналитическими и информационными методами и технологиями обуславливает результативность исследований и даёт новые возможности для их проведения в интересах точного земледелия.

Перспективы масштабируемости точного земледелия по данным ДЗЗ. Определить целесообразность перехода к точному земледелию (ТЗ) невозможно без количественной оценки степени интенсивности внутриполевой вариабельности показателей, влияющих на количество и качество урожая. Это ключевая задача ТЗ, актуальная в современном растениеводстве. В ходе исследований в рамках гранта РФФИ с июля 2019 г. по фев-



Рис. 1. Сенсорный узел (а), оснащённый оптическим датчиком для мониторинга состояния растительности, и базовая станция с интернет-каналом передачи данных для мониторинга метеорологических параметров (б)



Рис. 2. Расположение информационно-измерительной системы на экспериментальном поле

раль 2023 г. осуществлялся интеллектуальный сопряжённый анализ аэрокосмических снимков и результатов наземных измерений в специализированных полевых опытах с тестовыми площадками, где моделировались стрессовые и благоприятные условия возделывания зерновых культур в соответствии с рассмотренной выше методологией. В итоге получила развитие теория, на базе ко-

торой создан функционал для реализации двух новых методов определения степени интенсивности внутриполевой изменчивости на основе данных ДЗЗ. Один из них основан на главном инструментарии геостатистики — вариограммном анализе, второй — на комплексной количественной оценке динамики изменения значений ряда выявленных оптических индексов, характеризу-



Рис. 3. Сенсорный узел с солнечной панелью, антенной, блоком питания, пятиканальным влагомером, установленным в обсадной трубе (справа)

ющих биохимический состав и физиологическое состояние растений. Соответствующие результаты обобщены в коллективной монографии [41], где сформулированы основные выводы, предложения по развитию исследований и внедрению их результатов в управление сельскохозяйственным производством. Потенциал их применения, безусловно, будет способствовать масштабируемости перехода к точному земледелию в России. Ниже будут кратко рассмотрены новые возможности использования данных дистанционного зондирования в интересах ТЗ с помощью разработанных методов.

Вариограммный анализ позволяет описать пространственную неоднородность сельскохозяйственного поля в виде суммы трёх компонент (макро-, мезо- и микросоставляющей), каждой из которых в соответствии с её частотными свойствами даётся физическая интерпретация. В разработанной методике [42] показано, что целесообразность применения ТЗ в каждом конкретном случае зависит от соотношения мезо- и микрокомпоненты, характеризующих пространственную изменчивость изучаемого фактора Z . В методике представлены соответствующее обоснование, расчётные формулы, номограммы, а также последовательность вычислительных шагов вариограммного анализа. Кратко перечислим этапы геостатистических исследований.

Шаг 1. Предварительная обработка исходной информации: анализ и определение оптимального объёма выборки наблюдений, выявление и

удаление аномалий (выбросов), проверка геостатистических гипотез.

Шаг 2. Построение эмпирической вариограммы $\gamma(h)$ изучаемого параметра Z по формуле:

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

где: $\gamma(h)$ — число пар экспериментальных точек x_i , разделённых вектором h .

Шаг 3. Построение теоретической модели эмпирической вариограммы определённой аналитической зависимостью. Для аппроксимации используются сферическая, экспоненциальная, гауссовская, степенная и другие теоретические модели. На рисунке 4 представлены основные компоненты вариограммы на примере сферической модели:

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

где: c_0 — самородок, величина вариограммы при $h = 0$; $(c_0 + c_1)$ — порог предельного значения вариограммы; a — ранг (лаг), расстояние, на котором оно достигается.

Шаг 4. Аналитическое построение нормированной вариограммной функции и вычисление её параметров. Левую и правую части формулы (2)

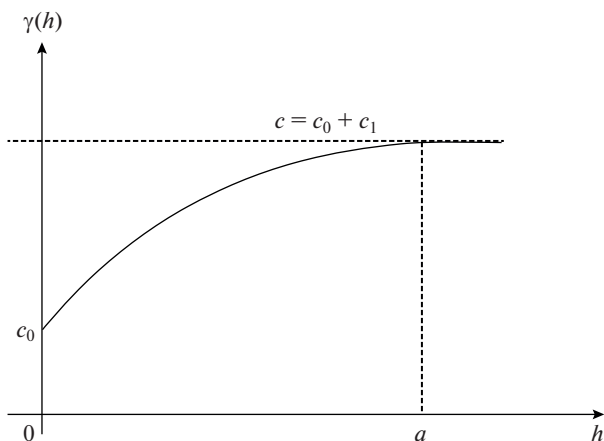


Рис. 4. Основные компоненты вариограммы (сферическая модель)

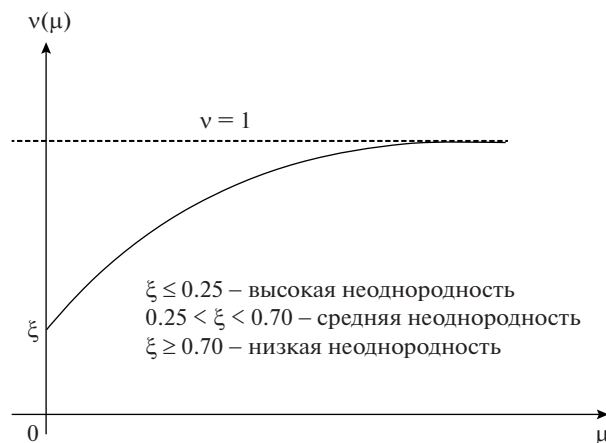


Рис. 5. Общий вид нормированной вариограммы

делим на $c = c_0 + c_1$ и переходим от вариограммы $\gamma(h)$ к нормированной полудисперсии $v(\mu)$:

$$v(\mu) = \begin{cases} \xi + (1 - \xi)T(\mu), & \text{при } 0 \leq \mu \leq 1, \\ 1, & \text{при } \mu > 1 \end{cases} \quad (3)$$

где: $\xi = c_0/c_0 + c_1$ — относительная нагет-дисперсия; $\mu = h/a$ — расстояние, выраженное в единицах ранга; $T(\mu)$ — полином, определяемый равенством

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

Шаг 5. Анализ расчётов и принятие решений. На данном этапе воспользуемся содержательным значением величины ξ . Для больших полей ($\mu \geq 1$), в пределах которых пространственные корреляционные связи варьирующегося показателя полностью затухают, мы имеем v , равное 1, и целесообразность (или нецелесообразность) использования точной технологии достаточно оценивать только исходя из значения ξ , то есть на основании анализа нагет-дисперсии, которая определяет долю микрокомпоненты в общей неоднородности рассматриваемого сельскохозяйственного поля. Это следует из того, что с увеличением площади поля его неоднородность всё в большей степени определяется мезокомпонентой, в то время как доля микрокомпоненты постепенно снижается, то есть чем меньше нагет-дисперсия, тем перспективнее изучаемая сельскохозяйственная территория для целей ТЗ. Диапазон изменений относительной нагет-дисперсии варьируется от 0 до 1 (рис. 5). Отмеченное важное свойство величины ξ используется в двух приведённых ниже вычислительных экспериментах, демонстрирующих эффективность вариограммного анализа для оценки применимости технологии ТЗ по распределению вегетационного индекса на сельскохозяйственном поле. Но сначала следует рассмотреть

второй метод выявления внутриполевой неоднородности.

Наряду с вариограммным анализом для обнаружения внутриполевой неоднородности используются наиболее перспективные вегетационные индексы: ChlRI — содержание хлорофилла, SIPI — отношение каротиноидов к хлорофиллу, R_{800} — мера рассеяния света листом, PRI — фотохимическая активность, ARI — содержание антоцианов, FRI — содержание флавонолов, WRI — содержание воды. Системное применение данных индексов позволяет определять содержание фотосинтетических пигментов, наличие в тканях растений антоцианов, флавонолов, воды, оценивать активность процессов фотосинтеза и в целом осуществлять дистанционную оценку заданного сельскохозяйственного поля, а также выявлять на нём участки, где сложился дефицит азотного питания и/или воды. В АФИ впервые определены корреляционные связи между дистанционно измеренными оптическими характеристиками посева и спектральными показателями диффузного отражения листьев в условиях полевого опыта с тестовыми площадками [43], а также установлена зависимость оптических характеристик различных индексов от густоты стояния растений и в наибольшей степени от дозы внесённых по фазам развития яровой пшеницы азотных удобрений (рис. 6, 7). Для проведения комплексного анализа динамики значений различных индексов разработан базовый алгоритм обнаружения и выделения границ внутриполевой неоднородности [44] и осуществлена его программная реализация (свидетельство № 2023611147 от 17.01.2023 г.). В основе базового алгоритма лежит процесс формирования и использования проблемно-ориентированной базы знаний и геопространственной базы разнородных данных.

База данных содержит гиперспектральные снимки (на этапе разработки метода — аэросним-

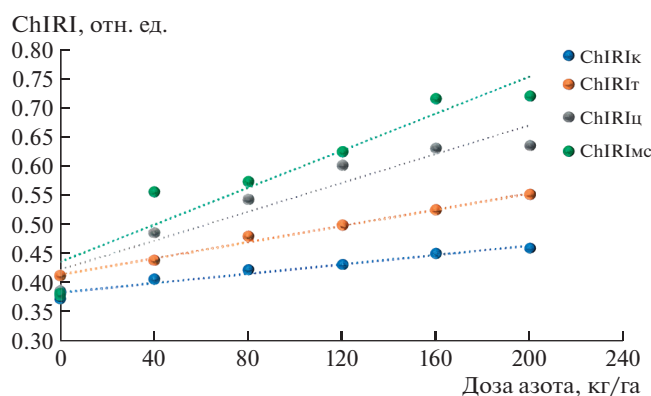


Рис. 6. Индекс отражения хлорофилла (ChIRI) листьев пшеницы в зависимости от дозы внесённых азотных удобрений. Приведены значения ChIRI, полученные на стадиях кушения (ChIRIk), выхода в трубку (ChIRIt), цветения (ChIRIц) и молочной спелости (ChIRImc)

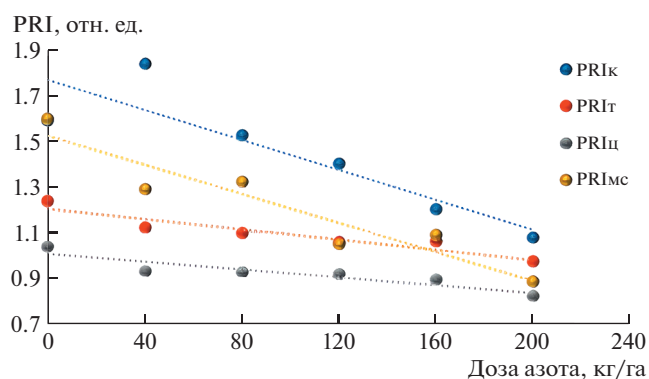


Рис. 7. Фотохимический индекс отражения (PRImod) листьев пшеницы в зависимости от дозы внесённых азотных удобрений. Приведены значения PRImod, полученные на стадиях кушения (PRIk), выхода в трубку (PRIt), цветения (PRIц) и молочной спелости (PRImc)

ки) и наземную опорную информацию для интерпретации данных ДЗЗ. Опорная информация (свидетельство о регистрации базы данных № 2021620305 от 19.02.2021 г.) к настоящему времени включает уже более 10 тыс. единиц хранения: метеоинформация, электронные карты распределения агрофизических и агрохимических показателей сельскохозяйственных полей, задействованных в экспериментальных исследованиях, данные об урожайности и другая информация, характеризующая производственный процесс зерновых культур на изучаемых полях. В базе знаний хранятся сведения о формулах расчёта вегетационных индексов по тем или иным спектральным диапазонам, а также вычисляются, накапливаются и сохраняются их значения, которые отражают физиологическое состояние посевов сельскохозяйственных культур в оптимальных и стрессовых условиях. В АФИ впервые выявлена статистика изменений вегетационных индексов, характеризующих азотный и водный режимы яровой пшеницы в оптимальных и стрессовых условиях [44].

Апробация программной реализации базового алгоритма осуществлена по данным, полученным в специализированных полевых опытах с тестовыми площадками, на которых были физически смоделированы два типа стресса: дефицит азота на фоне различной водообеспеченности посева. Гидротермический контроль водообеспеченности разных участков поля проводился, как отмечено выше, в режиме реального времени с помощью сенсорных узлов, оснащённых наземными и подземными измерительными датчиками (см. рис. 1–3). Информация от сенсорных узлов передавалась на сервер с помощью беспроводных сенсорных сетей. Оптимальный и дефицитный режимы азотного питания обеспечивались путём

закладки на поле с яровой пшеницей 12 тестовых площадок с дозами азотных удобрений в диапазоне от 0 до 200 кг д.в./га с шагом 40 кг (по шесть площадок на двух участках поля: избыточно увлажнённом в низине и с дефицитом влаги на возвышенности). Цифровые изображения были получены с помощью гиперспектральной камеры в диапазоне от 400 до 1000 нм с высоты 80 м. Пространственное разрешение полученных снимков — 3 см/пиксель, спектральное разрешение — 2.14 нм.

На рисунках 8 и 9 представлены значения ряда перспективных вегетационных индексов, рассчитанных по спектральным характеристикам тестовых площадок с различными водообеспеченностью и фоном азотного питания. На рисунке 10 приведён пример выделения зон внутриполевой неоднородности с определением типа стресса программой, которая реализует базовый алгоритм по данным на рисунках 8 и 9 [40]. Таким образом, представленная разработка позволяет обнаруживать на сельскохозяйственном поле участки с угнетёнными растениями и определять стрессор, ставший причиной угнетения. Автоматизация процесса обнаружения внутриполевой неоднородности на основе динамики изменения ряда вегетационных индексов открывает дополнительные возможности для обоснованного применения точного земледелия.

Рассмотрим подробнее два вычислительных эксперимента. В обоих случаях были построены карты распределения индекса NDVI (нормализованный разностный вегетационный индекс) для заданных сельскохозяйственных полей. Затем по картам распределения с помощью вариограммного анализа оценивалась перспективность применения агроприёмов ТЗ на заданной террито-

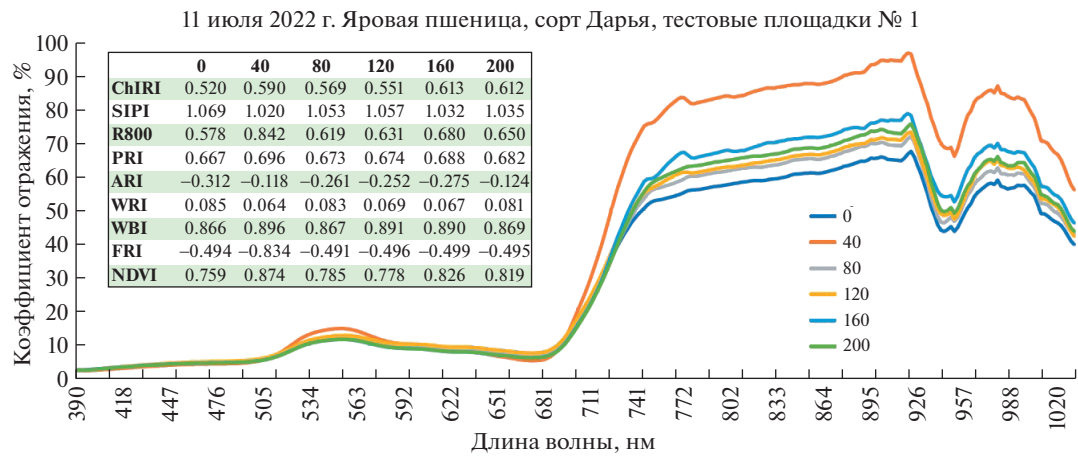


Рис. 8. Значения вегетационных индексов на тестовых площадках с разным фоном азотного питания (кг/га) и оптимальной водообеспеченностью

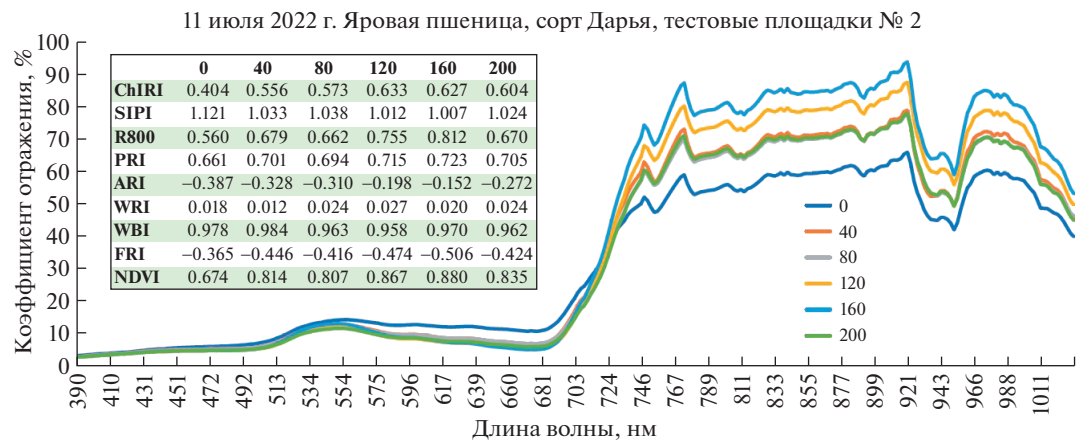


Рис. 9. Значения вегетационных индексов на тестовых площадках с разным фоном азотного питания (кг/га) и дефицитом влаги

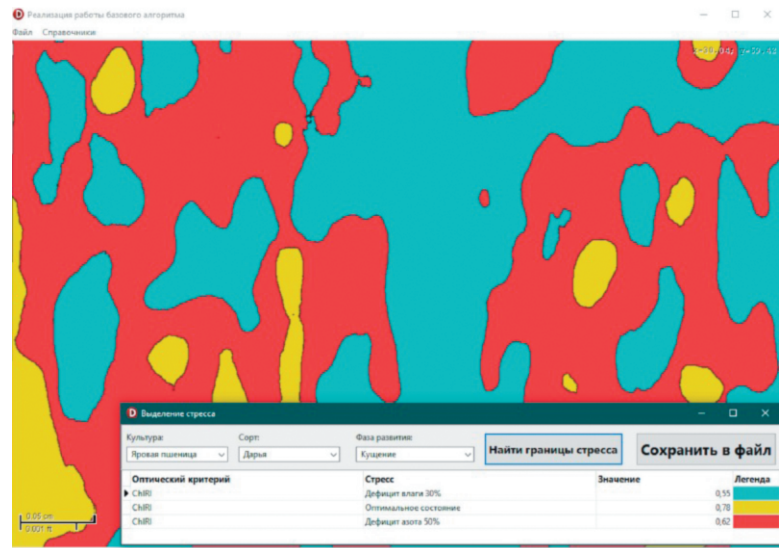


Рис. 10. Пример выделения зон внутриполевой неоднородности с определением типа стресса

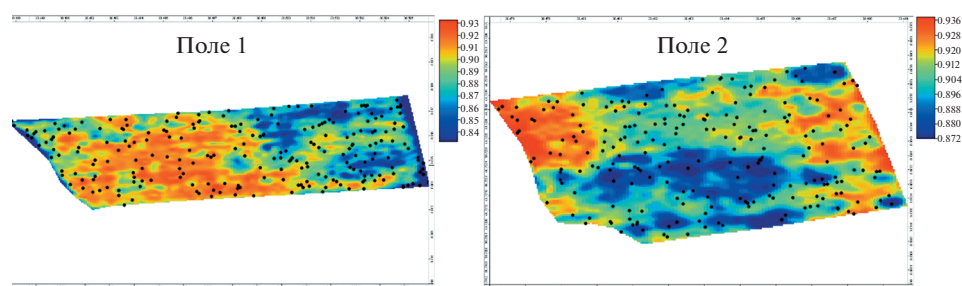


Рис. 11. Пространственное распределение NDVI

рии. Вычислить индекс NDVI достаточно легко, он имеет корреляционные связи с накоплением биомассы и продуктивностью посевов. Следует отметить, что это возможно только на ранних стадиях развития растений. Когда посев смыкается, значения NDVI выходят на плато. Использовать рассмотренные выше вегетационные индексы довольно проблематично, так как их можно вычислить точно только по гиперспектральным снимкам. Доступ к данному виду информации дистанционного зондирования в настоящее время ограничен.

Эксперимент 1. В качестве исходного космического снимка в данном вычислительном эксперименте использовался спутниковый снимок Sentinel-2 (дата съёмки 23.06.2019 г.), охватывающий территорию концерна “Детскосельский” в Ленинградской области. Оценка перспективности перехода к технологиям точного земледелия проведена на основе анализа пространственной вариативности индекса NDVI на двух произвольно выбранных сельскохозяйственных полях, засеянных яровой пшеницей [41]. Были составлены карты распределения NDVI на двух полях (рис. 11), затем построены экспериментальные вариограммы по четырём направлениям для каждого поля. В обоих случаях присутствует эффект самородков², анизотропия³ отсутствует. Для аппроксимации выбрана наиболее близкая сферическая модель (2). Аналитический вид аппроксимации для первого поля:

$$\gamma_1(h) = \begin{cases} 0.0001 + 0.0675h - 225h^3, & 0 \leq h \leq 0.01 \\ 0.00055, & h > 0.01. \end{cases}$$

Соответственно, для второго поля уравнение теоретической модели принимает вид:

$$\gamma_2(h) = \begin{cases} 0.0001 + 0.0275h - 254.6h^3, & 0 \leq h \leq 0.006 \\ 0.00022, & h > 0.006. \end{cases}$$

² Эффект самородка — разница между измерениями при бесконечно малых расстояниях.

³ Анизотропия — отличие свойств среды в разных направлениях внутри неё.

На рисунке 12 представлены наложения теоретических моделей γ_1 и γ_2 на экспериментальные вариограммы изучаемых полей, а в таблице приведены параметры теоретических аппроксимаций. В обоих случаях размеры сельскохозяйственного поля существенно превосходят ранг вариограммных функций исследуемого параметра, из чего можно сделать вывод, что оба поля имеют достаточно большой масштаб μ . Соответственно, тогда $\nu = 1$, и вопрос об эффективности дифференциации агротехнологий может решаться, исходя из полученных значений ξ . Как видно из таблицы, для первого поля нагет-дисперсия достаточно мала (0.182). Таким образом, переход к прецизионному производству растениеводческой продукции будет оправданным. В случае со вторым полем уровень случайной вариативности исследуемого параметра приближается к 50% (0.46). Это свидетельствует о том, что переход к технологиям точного земледелия на нём будет менее эффективным, чем на первом поле.

Эксперимент 2. В качестве объекта выбрано опытное поле полигона АФИ, на котором в 2011 г. изучалась роль тестовых площадок и данных аэрофотосъёмки в обосновании азотных подкормок. На площадках были внесены различные известные дозы удобрений. Первая из азотных подкормок проведена 07.06.2011 г. При этом обоснование её целесообразности и определение норм дифференцированного внесения азотных удобрений осуществлялись по данным аэрофотоснимка от 03.06.2011 г. Анализ проводился путём сравнительной оценки цветовых характеристик тестовых площадок с остальными зонами поля. Для этого использовалась специальная компьютерная калибровочная программа, позволяющая выявить связь между дозами азота и значениями пространственного распределения обобщённой характеристики цвета посева по полю [12]. Когда посев яровой пшеницы даже визуально стал более однородным благодаря азотной подкормке (07.06.2011 г.), был сделан ещё один аэрофотоснимок поля (11.06.2011 г.). Его анализ подтвердил отсутствие необходимости проведения дополни-

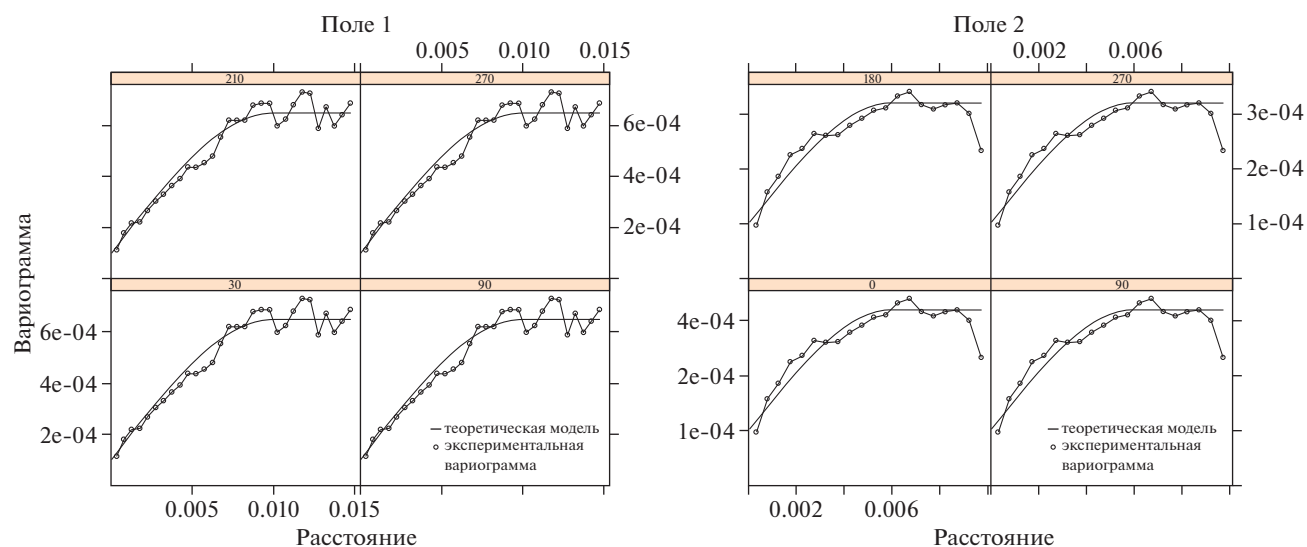


Рис. 12. Результаты наложения теоретических моделей на экспериментальные вариограммы

тельной азотной подкормки на данной фазе развития растений.

Целью вычислительного эксперимента стала геостатистическая оценка аэрофотоснимков, сделанных в июне 2011 г., с помощью вариограммного анализа. При этом тестовые площадки были исключены из анализа. Исходя из изложенных выше деталей полевого опыта заведомо было достоверно известно, что результаты анализа снимка яровой пшеницы от 03.06.2011 г. подтверждают целесообразность проведения дифференцированной азотной подкормки. Аэрофотосъёмка от 11.06.2011 г. показала, что посев стал более однородным, и дополнительная коррекция азотного режима не требуется.

В работе [40] приведено подробное описание второго вычислительного эксперимента и установлено, что значения нагетт-дисперсии нормированных вариограммных функций аэрофотоснимков до подкормки и после неё составили 0.186 и 0.620 соответственно. Существенное различие значений позволяет сделать вывод об обоснованности азотной подкормки 07.06.2011 г. и об отсутствии необходимости её проведения 11.06.2011 г., то есть геостатистический анализ подтвердил результаты ранее выполненных исследований.

Таким образом, вариограммный анализ служит эффективным методом оценки внутриполевой неоднородности по данным ДЗЗ, который позволяет без использования тестовых площадок определить степень её интенсивности по заданному параметру Z . Представленные выше результаты вычислительных экспериментов, проведённых по спутниковым и аэрофотоснимкам, подтверждают работоспособность и перспективность метода. Однако важно отметить, что для практического использования в вариограммном анализе данных спутниковых и особенно аэрофотоснимков необходима их предварительная обработка в соответствии с шаговой методикой, рассмотренной выше. Прежде всего речь идёт об уменьшении объёма исходной информации снимков высокого разрешения. В частности, пространственное разрешение аэрофотосъёмки, которая проводится на полигоне АФИ, составляет от 2 до 4 млн пикселей/га в зависимости от аппаратуры. Опыт использования вариограммного анализа показал, что для его проведения достаточно 100 точек экспериментальных измерений на площади 2–3 га.

В АФИ разработан подход к определению оптимального объёма входных данных ДЗЗ с помощью геостатистической оценки нормированных вариограмм, построенных с использованием существенно различающихся объёмов входной ин-

Таблица 1. Параметры построенных вариограмм

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

формации [45]. Анализ показал, что в случае со снимками с разрешением 7–10 см/пиксель оптимально учитывать только 0.5–1% от общего числа пикселей (с равномерным распределением точек на снимке). Для реализации рассматриваемого подхода и в целом для геостатистических исследований необходимы построение и последующая оценка не одного десятка эмпирических вариограмм и их функциональных аппроксимаций. Поскольку провести такую работу вручную весьма сложно, необходима автоматизация данного процесса. В связи с этим был создан прототип геостатистического модуля как составной части программного веб-сервиса с целью реализации общего алгоритма вариограммного анализа. Функционал модуля базируется на использовании языка программирования R, обладающего рядом преимуществ: 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 применяется для запуска веб-сервиса и геоприложения), кросс-платформенность, значительный набор инструментов статистического анализа и машинного обучения [40].

* * *

Обоснованное внедрение точного земледелия невозможно без количественной оценки степени варьирования внутриполевой неоднородности, которая определяет целесообразность и эффективность использования дифференцированного подхода к возделыванию сельскохозяйственных культур на заданной территории. Рассмотренные в статье возможности позволяют решать данную задачу исходя из оптических характеристик, что обеспечивает выбор планируемой агротехнологии различной интенсивности. Чем выше вариативность внутриполевой неоднородности, тем менее эффективны традиционные агротехнологии, то есть те агроприёмы, которые предусматривают одинаковый уровень технологического воздействия на почву и посев. Традиционные агроприёмы эффективны только тогда, когда поле однородно, что встречается крайне редко. Отличительные особенности агроприёмов ТЗ – адресная оценка каждого участка на сельскохозяйственном поле, соответствующий расчёт и дифференцированное внесение дорогостоящих средств по уходу за посевами, определяющих судьбу урожая. Чем выше неоднородность посева или почвенного плодородия, тем эффективнее применение ТЗ. Поэтому обоснованный выбор производителем растениеводческой продукции планируемой агротехнологии для каждого поля обеспечит снижение технологических рисков в

современном земледелии. Без практического решения данной проблемы отечественное сельское хозяйство будет развиваться лишь по догоняющей модели.

В дальнейшем практическое решение указанной проблемы предлагается осуществить путём разработки новой автоматизированной системы дистанционного мониторинга на основе созданного в АФИ функционала с включением его в информационный центр ИКИ РАН, который уже поддерживает более 20 специализированных систем. Они предназначены для изучения различных явлений и процессов, а также решения конкретных задач в научных или прикладных целях. Создание новой системы дистанционного мониторинга и её включение в информационную систему ИКИ РАН, безусловно, будет способствовать более широкому внедрению полученных результатов в реальный сектор производства растениеводческой продукции и сырья.

ЛИТЕРАТУРА

1. FAO. The future of food and agriculture – Trends and challenges. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2017.
2. Wheeler T., von Braun J. Climate change impacts on global food security // Science. 2013. V. 341. P. 508–513.
3. Hendricks G.S., Shukla S., Roka F.M. et al. Economic and environmental consequences of overfertilization under extreme weather conditions // J. Soil Water Conserv. 2019. V. 74. P. 160–171.
4. Доктрина продовольственной безопасности Российской Федерации до 2030 года. М., 2020.
5. Указ Президента РФ от 01.12.2016 г. № 642 “О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации”. <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&firstDoc=1&lastDoc=1&nd=102416645>.
6. Концепция технологического развития на период до 2030 года (Распоряжение Правительства РФ от 20 мая 2023 г. № 1315-п).
7. Chamara N., Islam M.D., Bai G.F. et al. Ag-IoT for crop and environment monitoring: Past, present, and future // Agric. Syst. 2022. V. 203. 103497.
8. Singh P.K., Sharma A. An intelligent WSN-UAV-based IoT framework for precision agriculture application // Comput. Electr. Eng. 2022. V. 100. 107912.
9. Pathmudi V.R., Khatri N., Kumar S. et al. A systematic review of IoT technologies and their constituents for smart and sustainable agriculture applications // Scientific African. 2023. V. 19. e01577.
10. Mulla D.J. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps // Biosystems Engineering. 2013. № 4. P. 358–371.
11. Galioto F., Raggi M., Viaggi D. Assessing the potential economic viability of precision irrigation: a theoretical analysis and pilot empirical evaluation // Water. 2017. № 12. P. 990–1009.

12. Якушев В.П., Якушев В.В. Перспективы “умного сельского хозяйства” в России // Вестник РАН. 2018. № 9. С. 773–784; Yakushev V.P., Yakushev V.V. Prospects for “Smart Agriculture” in Russia // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2018. № 5. P. 330–340.
13. Ananev I.P., Zubets V.S., Belov A.V., Blokhin Yu.I. Mobile system for on-the-go measuring and mapping soil permittivity, electrical conductivity, moisture content, temperature and mechanical resistance // Proc. 3rd Global Workshop on Proximal Soil Sensing. 26–29 May 2013. P. 201–209.
14. Блохин Ю.И., Якушев В.В., Блохина С.Ю. и др. 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. № 4. С. 164–178.
15. Якушев В.П., Якушев В.В., Блохина С.Ю. и др. Информационное обеспечение современных систем земледелия в России // Вестник РАН. 2021. № 8. С. 755–768.
16. Блохина С.Ю. Применение дистанционного зондирования в точном земледелии // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2018. № 5. С. 10–16.
17. Angelopoulou T., Tziolas N., Balafoutis A. et al. Remote sensing techniques for soil organic carbon estimation: A review // Remote Sens. 2019. № 6. 676.
18. Viscarra Rossel R.A., Walvoort D.J.J., McBratney A.B. et al. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties // Geoderma. 2006. V. 131. P. 59–75.
19. Bauer M.E., Cipra J.E. Identification of agricultural crops by computer processing of ERTS MSS data // LARS Technical Reports. 1973. Paper 20. <http://docs.lib.purdue.edu/larstech/20>
20. Doraiswamy P.C., Moulin S., Cook P.W., Stern A. Crop yield assessment from remote sensing // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 2003. V. 69. P. 665–674.
21. Christy C.D. Real-time measurement of soil attributes using on-the-go near infrared reflectance spectroscopy // Computers and Electronics in Agriculture. 2008. V. 61. P. 10–19.
22. Link A., Panitzki M., Reusch S. Hydro N-sensor: Tractor-mounted remote sensing for variable nitrogen fertilization // Proc. 6th Int. conf. on precision agric. 2002. P. 1012–1018.
23. Chlingaryan A., Sukkarieh S., Whelan B. Machine learning approaches for crop yield prediction and nitrogen status estimation in precision agriculture: A review // Comput. Electron. Agric. 2018. V. 151. P. 61–69.
24. Weiss M., Jacob F., Duveillerc G. Remote sensing for agricultural applications: A meta-review // Remote Sens. Environ. 2020. V. 236. 111402.
25. Sishodia R.P., Ray R.L., Singh S.K. Applications of remote sensing in precision agriculture: a review // Remote Sens. 2020. № 19. 3136.
26. Maes W.H., Steppe K. Perspectives for remote sensing with unmanned aerial vehicles in precision agriculture // Trends Plant Sci. 2019. V. 24. P. 152–154.
27. Jung J., Maeda M., Chang A. et al. The potential of remote sensing and artificial intelligence as tools to improve the resilience of agriculture production systems // Current Opinion in Biotechnology. 2021. V. 70. P. 15–22.
28. Sinde-Gonzalez I., Gil-Docampo M., Arza-Garcia M. et al. Biomass estimation of pasture plots with multi-temporal UAV-based photogrammetric surveys // International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation. 2021. V. 101. 102355.
29. Zheng H., Zhou X., He J. et al. Early season detection of rice plants using RGB, NIR-G-B and multispectral images from unmanned aerial vehicle (UAV) // Computers and Electronics in Agriculture. 2020. V. 169. 105223.
30. Ye H., Huang W., Huang S. et al. Recognition of banana fusarium wilt based on UAV remote sensing // Remote Sensing. 2020. № 6. 938.
31. Zhang J., Huang Y., Pu R. et al. Monitoring plant diseases and pests through remote sensing technology: A review // Comput. Electron. Agric. 2019. V. 165. 104943.
32. Лысов А.К., Павлюшин В.А. Фитосанитарное проектирование агроэкосистем и дистанционное зондирование // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. № 5. С. 101–109.
33. Шпанев А.М., Смук В.В. Изменение спектральных характеристик культурных и сорных растений под влиянием минеральных удобрений в агроценозах Северо-Запада России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. № 3. С. 165–177.
34. Kumar A., Taparia M., Rajalakshmi P. et al. UAV based remote sensing for tassel detection and growth stage estimation of maize crop using multispectral images // IGARSS 2020–2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2020. P. 1588–1591.
35. Lu B., Dao P.D., Liu J. et al. Recent advances of hyperspectral imaging technology and applications in agriculture // Remote Sens. 2020. V. 12. 2659.
36. Денисов П.В., Серeda И.И., Трошко К.А. и др. Возможности и опыт оперативного дистанционного мониторинга состояния озимых культур на территории России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. № 2. С. 171–185.
37. Якушев В.П., Дубенок Н.Н., Лупян Е.А. Опыт применения и перспективы развития технологий дистанционного зондирования Земли для сельского хозяйства // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. № 3. С. 11–23.
38. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А. и др. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные пробле-

- мы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. № 5. С. 247–267.
39. Якушев В.П., Якушев В.В., Блохина С.Ю. и др. Перспективы выявления идентификационных показателей состояния посевов по аэрокосмическим снимкам и специализированным полевым исследованиям // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. № 4. С. 113–127.
 40. Якушев В.П., Петрушин А.Ф., Якушев В.В. и др. Автоматизация процесса обнаружения и выделения границ внутриполевой изменчивости по аэрокосмическим снимкам и оптическим критериям // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. № 6. С. 151–162.
 41. Якушев В.П., Блохин Ю.И., Блохина С.Ю. и др. Теоретические основы дистанционной и наземной количественной оценки внутриполевой изменчивости для точного земледелия. СПб.: АФИ, 2023.
 42. Якушев В.П., Жуковский Е.Е., Петрушин А.Ф., Якушев В.В. Вариограммный анализ пространственной неоднородности сельскохозяйственных полей для целей точного земледелия (методическое пособие). СПб.: АФИ, 2010.
 43. Якушев В.П., Канах Е.В., Русаков Д.В. и др. Корреляционные зависимости между вегетационными индексами, урожаем зерна и оптическими характеристиками листьев пшеницы при разном содержании в почве азота и густоте посева // Сельскохозяйственная биология. 2022. № 1. С. 98–112.
 44. Якушев В.П., Канах Е.В., Якушев В.В. и др. Новые возможности автоматизации процесса обнаружения внутриполевой неоднородности по гиперспектральным снимкам и оптическим критериям // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. № 3. С. 24–32.
 45. Якушев В.П., Буре В.М., Митрофанова О.А. и др. Особенности обработки аэрокосмических снимков для оптимизации геостатистических исследований внутриполевой изменчивости в задачах точного земледелия // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. № 4. С. 128–139.

THE ROLE OF REMOTE SENSING OF THE EARTH IN PRECISION AGRICULTURE

V. P. Yakushev^{1, #}, V. V. Yakushev^{1, ##}, and S. Yu. Blokhina^{1, ###}, Yu. I. Blokhin^{1, ####}, D. A. Matveenko^{1, #####}

¹*Agrophysical Research Institute, St. Peterburg, Russia*

[#]*E-mail: vyakushev@agrophys.ru*

^{##}*E-mail: mail@agrophys.com*

^{###}*E-mail: sblokhina@agrophys.ru*

^{####}*E-mail: blohin3k4@gmail.com*

^{#####}*E-mail: dmatveenko@inbox.ru*

The paper provides a historical assessment of the increasing role of remote sensing data, the methods, services and tools used in their acquisition and applied in the information support of precision agriculture technologies. The main problems constraining the scalability of aerospace imagery application in precision crop production have been considered. The necessity to create a new research methodology, the formation of an appropriate physical, technical and experimental infrastructure to overcome them has been emphasized. The application of methodology for planning and conducting specialized experiments in conjunction with remote and ground-based monitoring of field experiments with test plots for detection within-field heterogeneity and the degree of its intensity has been depicted. For this purpose, has been created the functional that implements the capabilities of two new methods for within-field variability delineation and border marking based on aerospace images. The first one based on the main geostatistical tool – variogram analysis, and the other one is based on the systematic quantitative assessment of the dynamics of changes in the integral optical characteristics of the crop.

Keywords: precision agriculture, remote sensing, precision field experiments, test plots, research infrastructure, variogram analysis, vegetation optical indices, algorithms and software.