Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Агрофизический научно-исследовательский институт»

Материалы III Всероссийской научной конференции с международным участием «Применение средств дистанционного зондирования Земли в сельском хозяйстве» ФГБНУ АФИ, Санкт-Петербург, Россия 16–17 сентября 2021 г.

Санкт-Петербург
2021

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Агрофизический научно-исследовательский институт»

Материалы
III Всероссийской научной конференции с международным участием
«Применение средств дистанционного зондирования Земли в сельском хозяйстве»
ФГБНУ АФИ, Санкт-Петербург, Россия
16-17 сентября 2021 г.

Санкт-Петербург
2021

Материалы III Всероссийской научной конференции с международным участием **«Применение средств дистанционного зондирования земли в сельском хозяйстве»** ФГБНУ АФИ, Санкт-Петербург, Россия, 16–17 сентября 2021 г. – СПб.: ФГБНУ АФИ, 2021. – 217 с.

В сборнике представлены теоретические и практические результаты исследований по применению аэрокосмических методов и технологий для мониторинга состояния сельскохозяйственных земель и посевов, фитосанитарной безопасности агроэкосистем; моделей и алгоритмов обработки, комплексирования и интерпретации данных дистанционного зондирования для информационного обеспечения процесса планирования и оперативного управления сельскохозяйственным производством.

Материалы даны в авторской редакции

Ответственные за выпуск:
Блохина С. Ю.
Цивилёв А. Ю.

ISBN 978-5-905200-47-2 © ФГБНУ АФИ, 2021

ПЛЕНАРНАЯ СЕКЦИЯ

УДК 631.58:558:5

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ: ОТ ЗАДАЧ К МАСШТАБИРУЕМОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ В СОВРЕМЕННОМ ЗЕМЛЕДЕЛИИ

В. П. ЯКУШЕВ
ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт» (АФИ)
195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., д. 14

Усилия сельскохозяйственной науки на современном этапе больших природных, экономических и политических вызовов должны быть направлены на всемерное научное обеспечение успешной реализации Доктрины продовольственной безопасности нашей страны в рамках Стратегии научно-технологического развития РФ до 2035 г., предусматривающей переход к высокопродуктивному агрохозяйству нового технологического уклада [1, 2]. Несмотря на наблюдаемое в последнее время существенное увеличение объемов продукции растениеводства в среднем по стране, в большинстве хозяйств решения по управлению производством по-прежнему продолжают приниматься в условиях весьма ограниченных необходимых ресурсов и отсутствия оперативной достоверной информации. Такое положение не позволяет осуществлять оптимизацию принимаемых решений, включая разработку адаптивных агротехнологий в земледелии, и, как следствие, обеспечить получение принципиально возможных урожаев в конкретной почвенно-климатической обстановке, а также воспроизводство почвенного плодородия. По имеющимся оценкам, на настоящий момент нарушение севооборотов наблюдается на более 70 млн га (89%) посевной площади [3, 4]. В то же время система севооборотов является тем самым резервом, который не требует затрат, но оказывается чрезвычайно эффективным при условии оптимальной организации структуры посевных площадей. В настоящее время данный вопрос должен заново решаться практически в каждом хозяйстве.

Перспективы развития современного земледелия связаны с совершенствованием теории и практики масштабного проектирования адаптивно-ландшафтных систем земледелия (АЛСЗ). В обобщенном виде АЛСЗ состоит из трех основных блоков (подсистем): организация территории хозяйств (землеустройства); пространственное определение структуры и границ посевных площадей (севообороты); проектирование и последующая реализация адаптивных технологий (технологии) различной интенсивности (экстенсивные, нормальные, интенсивные, технологии точного земледелия), предусматривающих подбор подходящих культур и сортов, удобрений, средств защиты растений, а также приемов обработки почвы с учетом природного и производственно-ресурсного потенциала в заданных условиях.

В работе [5] обоснованы актуальные задачи технологической модернизации сельскохозяйственного производства, которые представлены в виде «Программы научно-инновационного обеспечения земледелия России». Решение сформулированных задач потребует серьезных усилий со стороны государства по преодолению последствий аграрной реформы и других противоречий. Необходимыми условиями модернизации отрасли земледелия являются упорядочение землепользования, земельных отношений, земельного рынка, развитие благоприятной социальной среды на селе, построение эффективных экономических отношений и создание сервисов для производителей сельскохозяйственной продукции всех форм. Также необходимо создание государственной земельной службы, которая должна опираться на сотрудничество с научными учреждениями, вузами, агрохимическими и инфраструктурными инновационными центрами, обеспечивать разработку

АЛСЗ и наукоемких агротехнологий, а также оказывать всевозможную помощь в обучении и переподготовке специалистов требуемой квалификации. Масштабный переход к АЛСЗ позволит достичь компромисса между получением продукции растениеводства обоснованного количества и качества и экологической устойчивостью агроэкосистем на территории России. Такой компромисс может быть эффективно достигнут посредством проведения оптимального землеустройства, внедрения биологически и экономически обоснованных севооборотов и автоматизированных методов проектирования адаптивных агротехнологий различной интенсивности в зависимости от сложившихся и прогнозируемых природных и экономических условий. При этом чем выше уровень интенсификации агротехнологий, тем более совершенным должно быть информационное обеспечение, предусматривающее увеличение объема пространственно-атрибутивных данных, необходимых для выработки решений.

В работе [6] выполнен анализ современного состояния проблемы информационного обеспечения земледельческой отрасли и обоснованы перспективы его совершенствования, которые тесно связаны с развитием инфраструктуры сопряженного дистанционного и наземного мониторинга и оценки состояния сельскохозяйственных земель и посевов. Методы и средства дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) – эффективный масштабируемый ресурс сбора данных с одновременным непрерывным охватом значительных площадей, что практически невозможно осуществить при проведении наземных исследований. Данные ДЗЗ и информационные системы дистанционного мониторинга уже широко используются в сельском хозяйстве, о чем свидетельствуют материалы двух специализированных научных конференций «Применение средств дистанционного зондирования Земли в сельском хозяйстве», прошедших в АФИ в 2015 и 2018 гг., а также междисциплинарной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», регулярно проводимой ИКИ РАН на протяжении многих лет [7, 8]. Значительные размеры сельскохозяйственных территорий страны, а также возрастающая доступность спутниковых снимков предопределяют безальтернативность использования данных ДЗЗ в информационном обеспечении отрасли земледелия. Во всем мире спутниковому территориальному мониторингу уделяется существенное внимание. К настоящему времени благодаря разработкам ученых ИКИ РАН и созданию ЦКП «ИКИ-Мониторинг» спутниковые технологии предоставляют пользователям не только возможности поиска и получения объективной первичной информации, но и проведения ее обработки, а также анализа состояния заданной территории с использованием распределенных вычислительных ресурсов [9]. Спутниковые данные ДЗЗ эффективно используются при решении задач по оценке состояния и прогнозу природных объектов и явлений (земельные кадастры, леса, водоемы, пожары, наводнения). Вместе с тем из-за сложностей в дешифрировании спутниковые снимки, как правило, практически не используются при управлении продукционным процессом сельскохозяйственных культур непосредственно на полях конкретных хозяйств. Такое положение сдерживает масштабы применения данных ДЗЗ при проектировании и внедрении АЛСЗ.

Специалистами АФИ накоплен многолетний опыт использования аэрофотоснимков, получаемых с беспилотников, оптических критериев, характеризующих физиологическое состояние растений, и геостатистических методов обработки данных в системах точного земледелия (ТЗ). Исходя из полученных результатов в АФИ в рамках междисциплинарного гранта РФФИ «Развитие теоретических основ дистанционной и наземной количественной оценки внутриполевой изменчивости для ТЗ» с 2019 г. развернуты исследования по расширению использования спутниковых данных в интересах сельского хозяйства. Основные цели исследований направлены на разработку теории и методических основ планирования и проведения полевых и вычислительных экспериментов, расширяющих возможности использования вариограммного

анализа для количественной оценки пространственной неоднородности сельскохозяйственных полей по спутниковым данным. Второй перспективный подход базируется на комплексной оценке динамики значений различных индексов отражения, которые можно вычислять по гиперспектральным снимкам. Динамика изменения значений конкретных индексов отражения позволяет судить о физиологическом состоянии сельскохозяйственных культур и выявлять действие различных стрессоров, угнетающих растения, а также фиксировать границы их негативного влияния на заданном сельскохозяйственном поле.

В докладе дана оценка эффективности новых разрабатываемых методов, предназначенных для информационного обеспечения систем земледелия нового поколения, и представлены конкретные результаты, которые свидетельствуют о масштабируемости применения спутниковых данных при решении указанной задачи. Так, например, за последние два года создан и апробирован инструментарий построения по данным ДЗЗ эмпирических вариограмм и их аппроксимаций в виде непрерывной функции, которая затем приводится к нормированному (безразмерному) виду. Теоретически показано, что по наггет-дисперсии нормированной вариограммной функции можно осуществлять оценку применения технологий различной интенсивности, включая агроприемы ТЗ, на заданной сельскохозяйственной территории. Эффективность вариограммного анализа подтверждена результатами сравнительных вычислительных экспериментов. За основу взяты эмпирические вариограммы, построенные по картам распределения вегетационного индекса NDVI, рассчитанного по спутниковым снимкам объектов исследований [10, 11]. Важно отметить, что с применением технологий дистанционного зондирования значительно увеличиваются объемы исходной информации, и возникает проблема избыточности входных данных в геостатистических вычислениях. В связи с этим в работе [12] продемонстрировано, что объемы исходной аэрокосмической информации могут быть значительно сокращены. В частности, при решении актуальной задачи по оценке целесообразности перехода к технологиям ТЗ на заданном сельскохозяйственном поле по снимкам с разрешением 10 см/пиксель в вариограммном анализе достаточно учитывать только 0,5-1 % от общего числа пикселей (с равномерным распределением точек на снимке). Изучена перспектива автоматизации построения теоретических моделей вариограмм, функционально описывающих статистическую структуру пространственно варьирующихся показателей состояния почвы или посева на сельскохозяйственном поле. Наиболее оптимальным для достижения указанной цели представляется использование возможностей статистического языка программирования R совместно с широким графическим потенциалом языка Python [13].

Разработана методика, выполнено почвенное агрофизическое и агрохимическое обследование с помощью мобильных комплексов с навигационным оборудованием и заложены полевые опыты с тестовыми площадками на посевах озимой и яровой пшеницы и ячменя [14, 15]. Тестовые площадки – это участки поля с различными дозами азотных удобрений, на которых растения характеризуются различными, но известными условиями азотного питания и, следовательно, в ходе вегетации будут отличаться по оптическим характеристикам. Таким образом, на тестовых площадках физически моделируется весь спектр условий азотного питания растений озимой и яровой пшеницы и ячменя, которые играют роль опорной информации и своеобразных эталонов. Такой подход позволяет разработать менее затратные масштабируемые механизмы выявления по оптическим показателям границ внутриполевого варьирования в зависимости от степени его интенсивности на заданной территории. Реализуемость такого подхода продемонстрирована в полевых опытах, а ранее была подтверждена в исследованиях по изучению взаимосвязи ряда конкретных индексов отражения и физиологического состояния растений яровой пшеницы при оптимальных условиях и дефиците азота и воды. Работы выполнялись в контролируемых условиях с помощью миниатюрного

оптоволоконного спектрометра HR 2000 (США), который обеспечивает оптическое разрешение 0,065 нм в диапазоне от 300 до 1000 нм с шагом 0,3 нм и автоматическую обработку измеряемой информации. Наличие подобных знаний и их накопление явились основанием для разработки программного обеспечения для обнаружения и выделения границ внутриполевой неоднородности по гиперспектральным снимкам и оптическим критериям. В основе алгоритма лежит процесс формирования проблемно-ориентированных базы знаний (БЗ) и базы данных (БД). БД наполняется спутниковыми гиперспектральными снимками для расчета оптических показателей посевов по критериям, содержащимся в БЗ. В БЗ накапливаются формализованные сведения о формулах расчета различных оптических критериев по тем или иным спектральным диапазонам, а также систематизируются и сохраняются их значения, которые характеризуют физиологическое состояние посевов сельскохозяйственных культур в оптимальных и стрессовых условиях. Затем осуществляется сравнение оперативно полученных величин с сохраненными в БЗ диапазонами показателей оптимального и угнетенного состояния растений и определяются зоны неоднородности на конкретном поле. Программная реализация рассматриваемого алгоритма позволит в перспективе выявлять действие различных стрессоров, угнетающих растения, с фиксацией границ их негативного влияния на значительных территориях нашей страны. Необходимым условием, несомненно, является доступ к гиперспектральным снимкам заданной территории. В настоящее время в России такой возможности для производителей нет. Агрофизическим институтом для повышения эффективности исследований на средства, выделенные Минобрнауки РФ, приобретена гиперспектральная камера Resonon Pika L для аэрофотосъемки опытных полей с помощью БПЛА Геоскан 401, что позволит существенно повысить качество апробации разрабатываемых программных средств и технологий.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-29-05184 мк

Список литературы

1. Доктрина продовольственной безопасности Российской Федерации до 2030 года. М., 2020. 19 с.
2. Указ Президента Российской Федерации 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
3. Кирюшин В.И. Актуальные проблемы и противоречия развития земледелия // Земледелие. 2019. № 3. С. 3-7. DOI: 10.24411/0044-3913-2019-10301
4. Анализ земельной реформы и агропромышленного производства за четверть века. Почвенно-экологические, институциональные и инфраструктурные аспекты модернизации. Земельная служба. Доклад для органов высшей исполнительной и законодательной власти / А.Л. Иванов, В.И. Кирюшин, Э.Н. Молчанов и др. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2016. 93 с. https://yadi.sk/i/nwJRC7pjzqQS2
5. Кирюшин В.И. Задачи научно-инновационного обеспечения земледелия России // Земледелие. 2018. № 3. С. 3–8. DOI: 10.24411/0044-3913-2018-10301
6. Якушев В.П., Якушев В.В., Блохина С.Ю., Блохин Ю.И., Матвеенко Д.А. Информационное обеспечение современных систем земледелия в России // Вестник РАН. 2021. Т. 91. № 8. С. 755–768. DOI: 10.31857/S0869587321080090
7. Материалы Всероссийской научной конференции (с международным участием) «Применение средств ДЗЗ в сельском хозяйстве». Санкт-Петербург, 16–17 сентября 2015 г. СПб.: ФГБНУ АФИ, 2015. 196 с.

8. 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. 2019а. Т. 16. № 3. С. 11–23. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-11-23

9. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Кашницкий А.В., Балашов И.В., Барталев С.А., Константинова А.М., Кобец Д.А., Мазуров А.А., Марченков В.В., Матвеев А.М., Радченко М.В., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170

10. 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. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-114-122

11. Якушев В.П., Буре В.М., Митрофанова О.А., Митрофанов Е.П. Применение методов геостатистики для анализа целесообразности перехода к технологиям дифференцированного внесения агрохимикатов // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2020а. Т. 16. № 1. С. 31–40.

12. Якушев В.П., Буре В.М., Митрофанова О.А., Митрофанов Е.П., Блохина С.Ю. Особенности обработки аэрокосмических снимков для оптимизации геостатистических исследований внутриполевой изменчивости в задачах точного земледелия // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 2. С. 33–44.

13. Якушев В.П., Буре В.М., Митрофанова О.А., Митрофанов Е.П. К вопросу автоматизации построения вариограмм в задачах точного земледелия // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2020. Т. 16. № 2. С. 177–185. DOI: 10.21638/11701/spbu10.2020.209

14. Митрофанов Е.П., Митрофанова О.А., Петрушин А.Ф. Экспериментальные данные для решения задач точного земледелия // Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021620305. Дата регистрации 19.02.2021.

15. Блохин Ю.И., Якушев В.В., Блохина С.Ю., Петрушин А.Ф., Митрофанова О.А., Митрофанов Е.П., Двирник А.В. Современные решения для формирования опорной информации с целью повышения точности определения агрофизических свойств почвы по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 4. С. 164-178. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-164-178

16. Якушев В.П., Матвеенко 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

ФИТОСАНИТАРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ АГРОЭКОСИСТЕМ И ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ

В. А. ПАВЛЮШИН, А. К. ЛЫСОВ
Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений (ВИЗР)
Санкт-Петербург, Россия; E-mail: alysov@vizr.spb.ru

Аннотация. Основу фитосанитарной стабилизации агроэкосистем, обеспечения экологической безопасности для окружающей среды, животного мира и человека составляют современные технологии рационального и безопасного применения средств защиты растений, дифференциации их применения с учетом пространственной неоднородности распределения вредных объектов на участках поля. В представленной статье рассмотрена современная парадигма защиты растений, базирующеюся на снижение стрессовых трансформаций агроэкосистем; оптимизацией технологий возделывания сельскохозяйственных культур, снижение селективного действия пестицидов на популяции вредных организмов использованием, использовании современных методов дистанционного фитосанитарного мониторинга, роботизации и автоматизации технологических процессов по защите растений в системах точного земледелия Проведен анализ перспективы использования современных методов дистанционного фитосанитарного мониторинга на основе использования спутниковых данных дистанционного зондирования, беспилотных воздушных судов .Представлены результаты исследований по дистанционным методам съема информации на основе формирования библиотек спектральных характеристик отражения здоровых и больных растений, а также поврежденных вредителями. Анализ спектральных образов здоровых и больных растений показывает, что характерные отличия полученных кривых спектральной яркости в поддиапазонах синего, зеленого. красного и ближнего инфракрасного электромагнитного излучения от зеленой растительности, мы наблюдаем в ближнем инфракрасном поддиапозоне. Установлена возможность с использованием спектральных характеристик отражения здоровых и больных растений на начальных этапах развития. Полученные результаты позволят в ближайшее время создать основу для автоматической обработки и анализа результатов ДЗ подстилающей поверхности сельскохозяйственных угодий на наличие вредоносных объектов и определять фитосанитарные риски с учетом качества урожая и экологической безопасности для окружающей среды.

Ключевые слова: дистанционный мониторинг, спектральные характеристики отражения,спектрорадиометр, спектральная яркость, ближний инфракрасный, длина вольны, картофель фитофтороз, колорадский жук.

Введение

Современное растениеводство ставит перед фитосанитарией две крупные наукоемкие задачи – гарантированную защиту урожая и его качество, а также достижение достаточного уровня экологической безопасности в агроэкосистемах. Мировые потери урожая от вредителей болезней и сорняков остаются значительными и достигают 25-30%. В развитых странах растениеводство отличается интенсивным использованием пестицидов с глобальными объемами фитосанитарных защитных мероприятий, сопровождаемых внесением огромного количества химических препаратов в почву и окружающую среду. Например, по данным ФГБНУ ВНИИЗР в 2019 году в Российской Федерации фитосанитарные обработки проводились на площади 101,7 млн. га и при этом на сельскохозяйственные угодья было внесено около 70 тыс. тонн пбестицидов, а ассортимент СЗР насчитывает 1750 препаратов, основу которых составляют 230 д.в. разной химической природы. В 1990 году объем мероприятий по защите растений составлял около 51 млн. га. В настоящее время ассортимент СЗР в США насчитывает около 19 тыс. препаратов, в Германии – около 10 тыс. препаратов. Экотоксикологическая нагрузка в РФ на 1 га пашни в пределах 0,5-6,0 кг. Динамика пестицидной нагрузки в РФ кг/га пашни за период 2000-2019 гг. в пределах 0,29-0,59 кг/га (Гончаров, Михайликова, 2020) Вышеобозначенное требует перехода на новую парадигму в защите растений (Павлюшин и др., 2013), которая бы отличалась:

– оптимальным видовым и внутривидовым биоразнообразием в агробиоценозах;
– ослаблением стрессовых трансформаций агроэкосистем;
– оптимизацией технологий возделывания сельскохозяйственных культур;

– снижением селективного действия средств защиты растений на популяции вредных организмов;
– рациональным соотношением химической, биологической и иммуногенетической защиты растений;
– использованием современных методов дистанционного фитосанитарного мониторинга на основных сельскохозяйственных культурах с учетом пространственной неоднородности распределения вредных объектов на участках поля.
– роботизацией и автоматизацией технологических процессов по защите растений в системах точного земледелия,
– многосторонним мониторингом экологических последствий антропогенного воздействия на агросистемы и фитосанитарных рисков;
– фитосанитарным проектированием агроэкосистем, под которым следует понимать рациональные размещения сельскохозяйственных культур и их сортов с учетом очагов особоопасных вредоносных видов, мест перезимовки вредителей, болезней и сорняков, а также уровня супрессивности почвы, разграничением полей близкородственных с.х. культур и розы ветров для оценки рисков аэрогенной инфекции и наличием соседствующих диких экосистем. (рис.1)

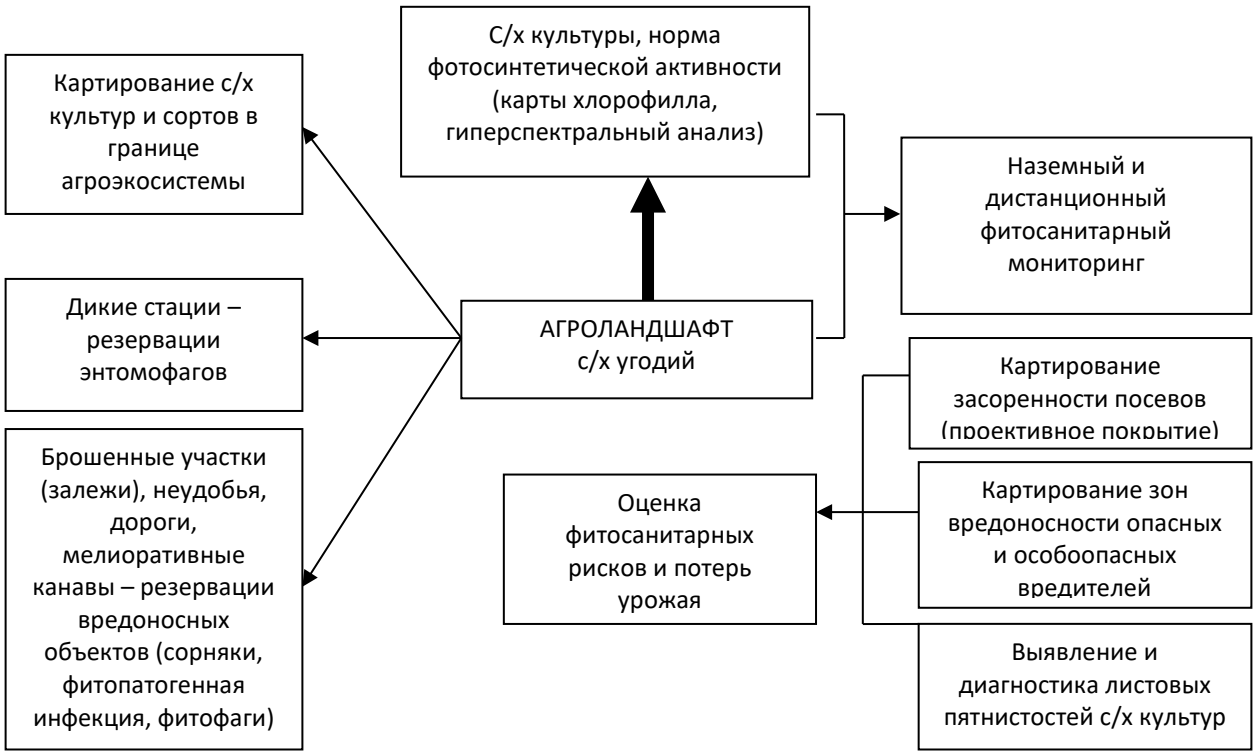


Рис. 1. Фитосанитарное проектирование агроэкосистем

На современном этапе возможности дистанционного зондирования агроэкосистем для фитосанитарного проектирования ограничиваются следующим набором показателей:
– дистанционное выявление ряда возбудителей болезней на с.х. культурах (бурая ржавчина, желтая ржавчина, корневые гнили, септориоз, ВЖКЯ и др. на зерновых, на картофеле – фитофтороз, альтернариоз.золотистая картофельная нематода, вирозы; на сахарной свекле – ризомания, ризоктониоз, нематоды;
– дистанционное картирование ареалов распространения особоопасных массовых вредителей таких как саранчовые и луговой мотылек;

– оценка вредоносности фитофагов (колорадский жук, тли, чешуекрылые и др.).

Следует отметить, что в части повышения эффективности борьбы с сорными растениями решены вопросы по использованию дистанционных методов съема информации по определению их неоднородности распределения на участках поля, оценки потерь урожая, картирования зон вредоносности (Павлюшин, Лысов, 2019; Измаилов и др.2012).

Получены положительны результаты использования дистанционных методов съема информации на основе спектрометрии по оценке засоренности посевов зерновых культур и посадок картофеля более чем по 20 видам сорняков в том числе и по такому вредоносному виду на землях несельскохозяйственного назначения как борщевик Сосновского на основе определения и анализа яркостных информативных признаков (Каплин и др., 2020; Рыжиков, 2017)

Проводимые исследования в Агрофизическом институте позволили выявить различия оптических характеристик отражения растений, испытывающих дефицит азота и почвенной влаги (Якушев, Каныш и др., 2019) Полученные результаты важны для определения информативных признаков, позволяющих четко вычленять при дешифрации фитосанитарного состояния сельскохозяйственных угодий в каком случае мы фиксируем, что растения имеют характерные признаки поражения болезнями или это признаки неинфекционной патологии из-за дефицита минерального питания или дефицита почвенной влаги. В связи с чем, формирования баз данных на основе библиотек спектральных образов болезней различных сельскохозяйственных культур, а также спектральных образов данных культур ,испытывающих дефицит минерального питания или почвенной влаги позволит на основе дистанционных методов зондирования принимать обоснованные и оперативные решения по стабилизации фитосанитарной обстановки или необходимо провести комплекс агротехнических мероприятий для снятия стрессовых ситуаций на посевах, вызванных другими факторами.

Специалистами института космических исследований имени академика У. М. Султангазина по гиперспектральным данным определены отличительные участки спектра для дистанционного мониторинга грибных болезней яровой пшеницы с учетом разных фаз поражения болезнями (Бекмухамедов, Карабкина, 2013).

Объекты и методы исследований

Целью исследований является разработка новых дистанционных методов фитосанитарного мониторинга на основе получения спектральных характеристик отражения растительности с подстилающей поверхности сельскохозяйственных угодий.

Методика исследований характеристик отражательной способности культурных больных и здоровых растений картофеля и поврежденных колорадским жуком с использованием полевого спектрорадиометра предусматривала следующие этапы:

1. Выращивание тест объектов растений картофеля и их заражение грибами рода альтернария, фитофторозом, почвы золотистой картофельной нематодой.
2. Проведение калибровочных измерений спектрорадиометром.
3. Проведение спектрометрических измерений здоровых и больных растений и пораженных колорадским жуком и золотистой картофельной нематодой.

Для проведения полевых спектрометрических измерений использовался портативный спектрорадиометр модели PSR-1100. Перед началом измерений на тестируемых растениях проводились калибровочные измерения величины отражения от абсолютно белой эталонной пластины прибора. Измерения проводились при солнечной погоде. в одно и тоже время в период с 11 до 12 часов дня.

Метод спектрорадиометрических исследований основан на разнице отраженных спектральных характеристик листовой поверхности культурных и сорных растений, а также здоровых и больных растений, пораженных Y-вирусом. Обработка результатов измерений заключается в получении спектральных характеристик отражения различных объектов в виде зависимостей и коэффициентов спектральной яркости от длины волны. Для расчета КСЯ применяется формула:

$$p(\lambda) = B(\lambda) / B_0(\lambda)$$

где: p (λ) – КСЯ; B (λ) – СПЭЯ исследуемой поверхности в заданном направлении; B_0 (λ) – СПЭЯ идеально рассеивающей поверхности с единичным коэффициентом отражения, освещенной так же, как и исследуемая поверхность.

Для компьютерной обработки полученных результатов измерения спектральной яркости отражения от листовой поверхности в диапазоне длин волн от 300 до 1100 нм использовалась программное обеспечение DARWinSP.

Результаты и обсуждение

В отличии от сорных растений распознавание с помощью дистанционных методов поражение растений грибными. вирусными, бактериальными и нематодными болезнями является более сложной задачей, так как их проявление желательно фиксировать на начальном этапе развития. а в ряде случаев и в латентной форме

В связи с чем нами определялись спектральные образы растений картофеля, поражаемые наиболее вредоносными болезнями, такие как альтернариоз. фитофтороз., а также пораженные золотистой картофельной нематодой. Ранее было установлена возможность по спектральным характеристикам отражения выявлять на начальном этапе поражения вегетативных органов картофеля вирусом-Y.

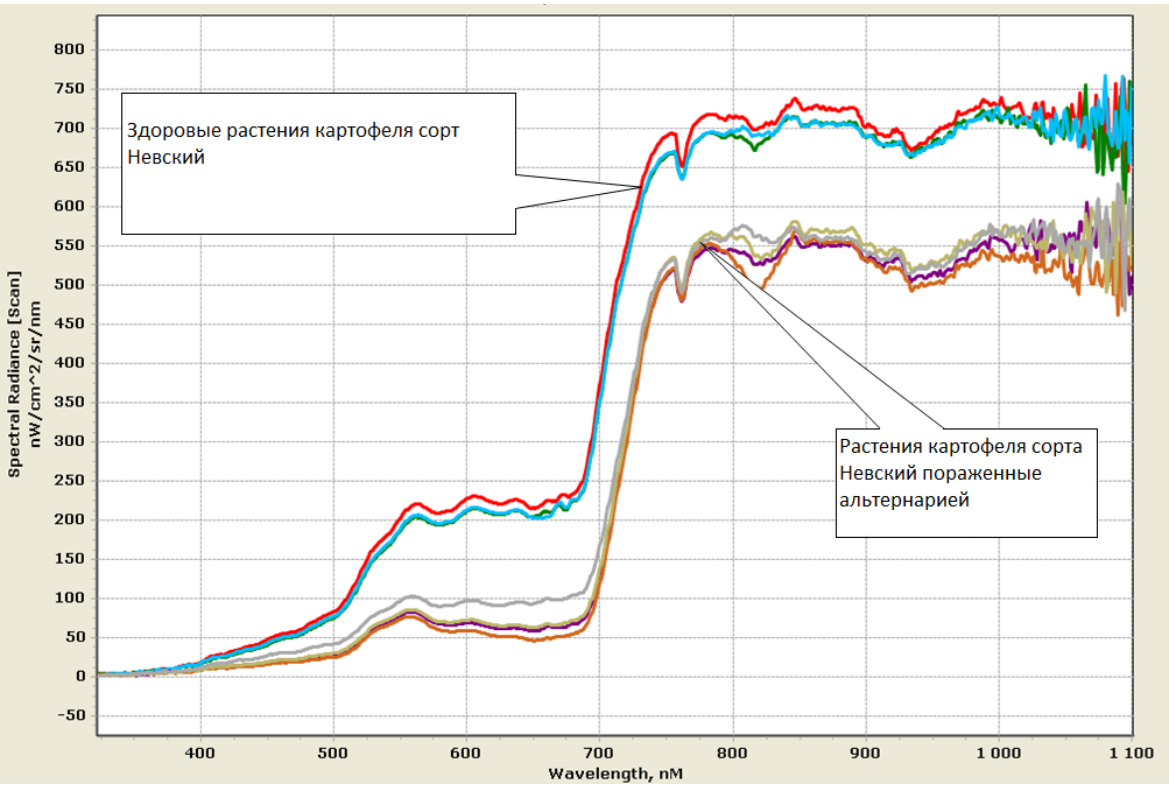


Рис. 2. Спектральные характеристики отражения здоровых и больных растений картофеля пораженных альтернариозом с визуально видными признаками

Полученные данные спектральных характеристик отражения растений картофеля грибами рода альтернария (рис. 2), показывают, что даже при начальном этапе развития болезни без визуальных признаков мы наблюдаем в ближнем инфракрасном поддиапозоне электромагнитного излучения, снижение спектральной яркости по сравнению со здоровыми растениями.

При поражении посадок картофеля фитофторозом (рис.3) на третий день после заражения мы наблюдаем резкое снижение спектральной яркости отражения в сравнении со здоровыми растениями, а 7 сутки после заражения растений значения спектральной яркости показывают, что растения практически погибли. В этом случае величина спектральной яркости у пораженных растений фитофторозом близка к значению спектральной яркости отражения от почвы.

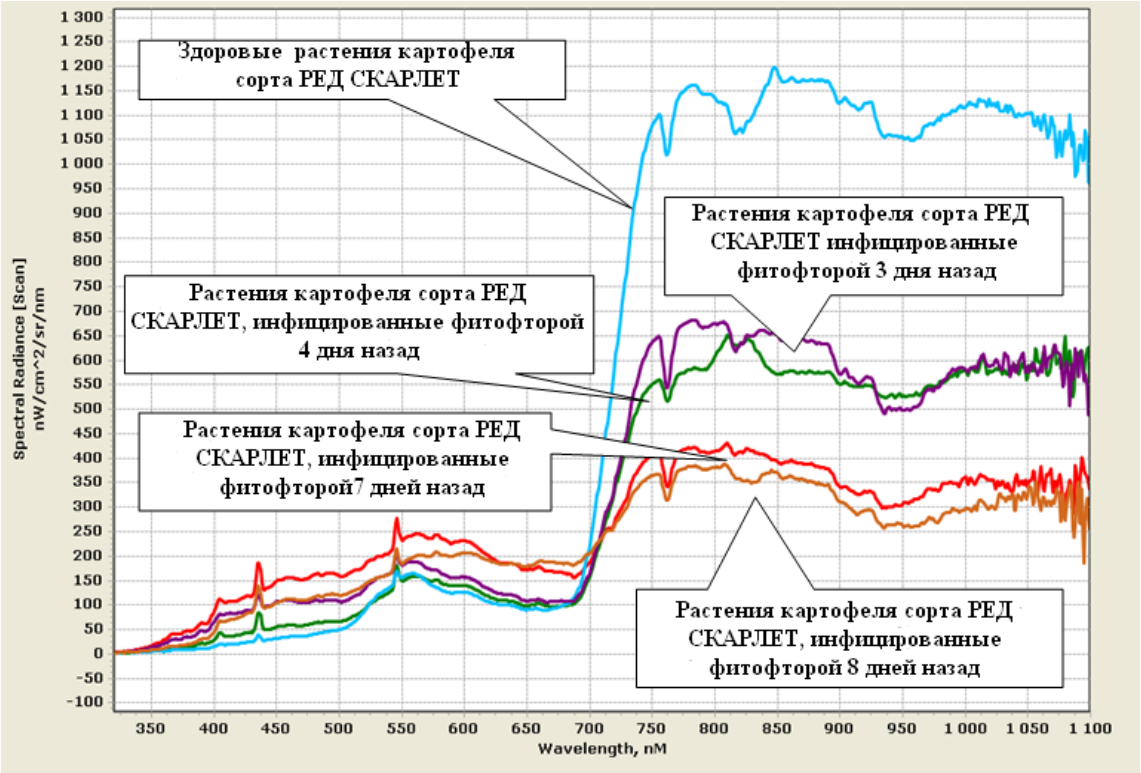


Рис. 3. Спектральные характеристики отражения здоровых и больны растений картофеля пораженных фитофторозом в динамике по суткам развития болезни

При повреждении растений картофеля колорадским жуком из –за потери биомассы растений мы также наблюдаем снижение значений спектральной яркости отражения в 2–3 раза по сравнению с растениями без повреждения вредителем. На рис. 4 представлены данные по спектральной яркости отражения растений картофеля с учетом разной степени их повреждения. Полученные данные имеют большое значение для дистанционного метода выявления очагов поражения растений картофеля колорадским жуком.

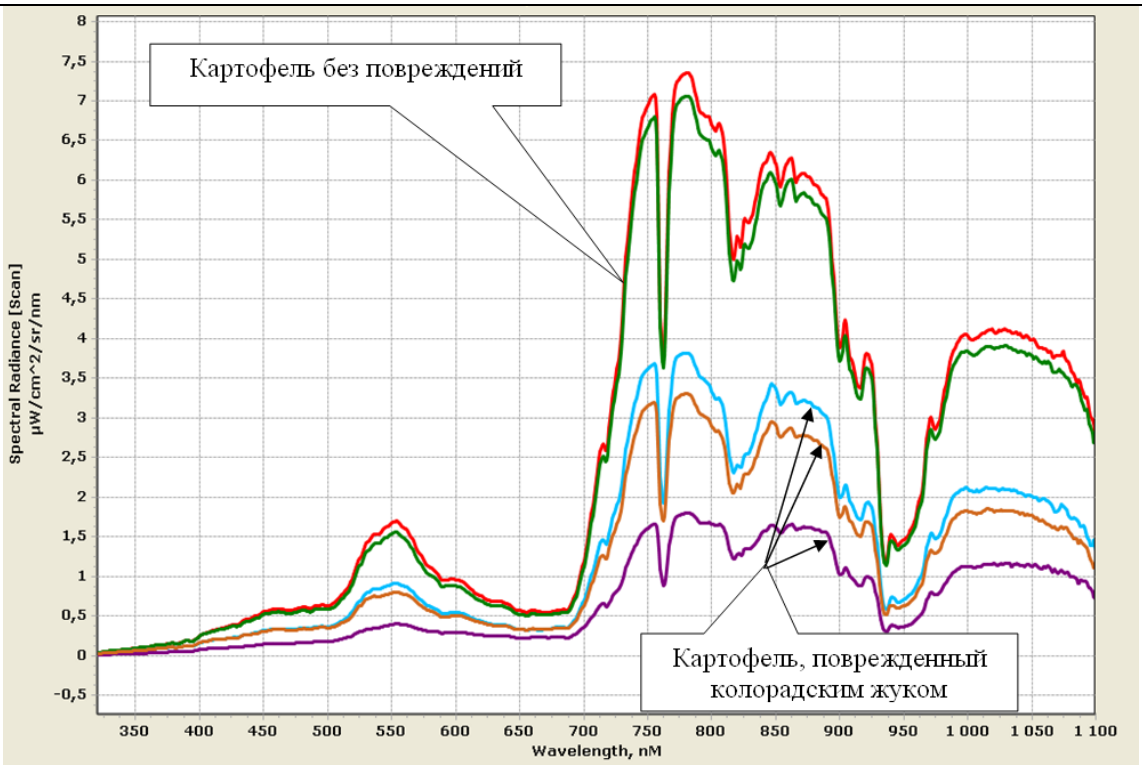


Рис. 4. Спектральные характеристики отражения растений картофеля, поврежденный в разной степени колорадским жуком

Выводы

В настоящее время на основе проведенных исследований по определению информативных признаков на основе спектральной яркости отражения от здоровых и больных растений картофеля, а также поврежденных колорадским жуком установлены наиболее информативные спектральные поддиапозоны длин волн электромагнитного излучения для использования мультиспектральной съемки подстилающей поверхности сельскохозяйственных угодий с помощью современных систем ДЗЗ. Анализ спектральных образов здоровых и больных растений показывает, что характерные отличия полученных кривых спектральной яркости в поддиапазонах синего, зеленого. красного и ближнего инфракрасного электромагнитного излучения от зеленой растительности, мы наблюдаем в ближнем инфракрасном поддиапозоне.

Список литературы

1. Гончаров Н.Р., Михайликова В.В. Объемы и эффективность применения средств защиты растений в Российской Федерации 1990-2017 годы. База данных. RU2020622398 от 11.11 2020.
2. Павлюшин В.А., Вилкова Н.А., Сухорученко Г.И., Тютерев С.Л., Нефедова Л.И. Новая парадигма защиты растений и ее концептуальное научно-практическое решение// Вестник защиты растений. 3(89), 2016. Материалы международной конференции «Эколого-генетические основы современных агротехнологий». СПб, 26-27 апреля 2016. С. 126–127.
3. Павлюшин В.А., Лысов А.К. Фитосанитарная безопасность агроэкосистем и дистанционный фитосанитарный мониторинг в защите растений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 69–77. DOI: 10236/2070-7401-2019-16-3-69-78
4. Исмаилов Э.Я., Ризванов А.А., Пластинин Ю.А., Захаров Ю.П., Исмаилов В.Я., Надыкта В.Д., Костенко В.А., Швец А.А., Волкова Г.В., Савва А.П. Перспективы дистанционного зондирования земли в целях фитосанитарного мониторинга и экотоксикологической оценки агроэкосистем /

Биологическая защита растений-основа стабилизации агроэкосистем. Материалы Международной научно-практической конференции «Современные мировые тенденции в производстве применении биологических и экологических малоопасных средств защиты растений» Краснодар, 25-27 сентября 2012. М.: Изд-во «ОООРА «Гранат», 2012. С. 406–413.

5. Каплин В.Г., Корнилов Т.В., Кочин Д.А., Федченко В.Г., Чичкова Е.Ф. Эшелонированный мониторинг посевов сельскохозяйственных культур в лесостепи Самарской области // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2020. № S674. С. 195–199.

6. Рыжиков Д.М. Метод обработки мультиспектральных спутниковых данных для решения задач контроля зон произрастания борщевика Сосновского // Информационно-управляющие системы. СПб, 2017. № 6, С. 43–51.

7. Якушев В.П., Канаш Е.В., Якушев В.В., Матвеенко 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, DOI: 1021046/2070-7401-2019-16-3-24-32

8. Бекмухамедов Н.Э., Карабкина Н.Н. Изменение спектральных характеристик растений яровой пшеницы, зараженных грибковыми болезнями // Сельское, лесное и водное хозяйство. 2013. № 10. [Электронный ресурс]. URL: https://agro.snauka.ru/2013/10/1169[6]

PHYTOSANITARY SAFETY OF AGROECOSYSTEMS AND REMOTE SENSING MONITORING

V.A. PAVLYUSHIN, A. K. LYSOV,
All-Russian Research Institute for Plant Protection, St. Petersburg, Russia,
St. Petersburg -Pushkin, Russia; E-mail: info@vizr.spb.ru

Abstract. The basis of phytosanitary stabilization of agroecosystems, ensuring environmental safety for the environment, wildlife and humans are modern technologies of rational and safe use of plant protection products, differentiation of their use, taking into account the spatial heterogeneity of the distribution of harmful objects in the field areas. The present article considers the modern paradigm of plant protection, which is based on reducing the stress transformations of agroecosystems; optimization of crop cultivation technologies, reduction of the selective effect of pesticides on the populations of harmful organisms using, the use of modern methods of remote phytosanitary monitoring, robotization and automation of technological processes for plant protection in precision farming systems.

The prospects of using modern methods of remote phytosanitary monitoring based on the use of satellite data of remote sensing and unmanned aircraft are analyzed. The results of research on remote methods of information retrieval based on the formation of libraries of spectral reflection characteristics of healthy and diseased plants, as well as those damaged by pests, are presented. The analysis of spectral images of healthy and diseased plants shows that the characteristic differences of the obtained spectral brightness curves are in the sub-ranges of blue and green, we observe red and near-infrared electromagnetic radiation from green vegetation in the near-infrared sub-zone. The possibility of using the spectral characteristics of reflection of healthy and diseased plants at the initial stages of development is established. The obtained results will allow in the near future to create a basis for automatic processing and analysis of the results of the DZ of the underlying surface of agricultural land for the presence of malicious objects. It is also possible to determine phytosanitary risks, taking into account the quality of the crop and environmental safety for the environment.

Key words: remote monitoring, spectral characteristics of reflection, spectroradiometer, spectral brightness, near infrared, potatoes, late biqht, colorado beetle.

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В АГРОНОМИИ РОССИИ: НАСТОЯЩЕЕ И БЛИЖАЙШЕЕ БУДУЩЕЕ

Д. М. ХОМЯКОВ
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова» (МГУ имени М.В. Ломоносова), г. Москва, khom@soil.msu.ru

Аннотация. На черноземе обыкновенном карбонатном слабогумусированном тяжелосуглинистого гранулометрического состава на карбонатно-лессовидных суглинках в западной части Ставропольского края были изучены возможности применения цифровых решений и сервисов для оценки состояния почв и продуктивности озимой пшеницы и рапса. Выявлен ряд проблем, сдерживающих широкое использование предлагаемых решений в агрономической практике. Рассмотрены цифровые аспекты устойчивого управления почвенными ресурсами страны, использующимися в АПК, и перспективные направления совершенствования технологий.

Ключевые слова. Геоинформационные системы, беспилотные летательные аппараты, нормализованный относительный индекс растительности, чернозем, озимая пшеница, рапс, почвенные ресурсы, цифровое земледелие и мелиорация.

Введение

Почва входит с состав всех наземных экосистем определенного иерархического уровня в качестве неотъемлемой, обязательной и незаменимой подсистемы или компонента.

Для сельскохозяйственного производства должна производиться классификация и группировка именно почв, а не земель. Плодородие – свойство, присущее только почвам. Это требует принципиально новой методологии и наборов методик исследования, основанных на получении, накоплении, проверке и алгоритмах использования массивов цифровых геопространственных и временных данных о состоянии почвенного покрова и возделываемых культур.

Развитию дистанционного зондирования почвенного покрова способствуют наличие программных продуктов — геоинформационных систем (ГИС), доступных широкому кругу пользователей, беспилотных летательных аппаратов (БПЛА, дроны), а также космический мониторинг состояния земной поверхности.

Помимо создания 3D-моделей местности, одной из задач, которую решают с помощью БПЛА в сельском хозяйстве, является построение карт вегетационных индексов. Самый распространенный из них — NDVI (Normalized Difference Vegetation Index или нормализованный относительный индекс растительности).

Существует большое число алгоритмом расчета индексов. По данным сайта https://www.indexdatabase.de/ (A database for remote sensing indices), созданного специалистами Боннского университета (ФРГ), сейчас известно более 520 вегетационных индексов. Некоторые из них пригодны только для спутников, некоторые – только для БПЛА. Количество индексов постоянно растет. Они остаются, в основном, объектно-ориентированными, изменяются и корректируются для решения конкретной научной или производственной задачи на выбранных площадях или полигонах.

В решении Президиума Совета законодателей РФ при Федеральном Собрании РФ 18.12.2020 «О мерах по обеспечению плодородия земель сельскохозяйственного назначения» отмечено, что обеспечение продовольственной безопасности осуществляется, в том числе, за счет повышения плодородия почв, предотвращения истощения и сокращения площадей сельскохозяйственных земель и пахотных угодий. Сохранение, восстановление и повышение плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения являются составляющими развития и совершенствования АПК РФ.

Выделен ряд проблем, препятствующих эффективному обеспечению плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения: отсутствие полной и достоверной информации о них, их

границах и качественных характеристиках. Нет единой федеральной информационной системы о землях сельскохозяйственного назначения. Землеустройство, как комплекс мероприятий по изучению состояния почв, планированию и организации их рационального использования и охраны, пока не действует. Земли сельскохозяйственного назначения используются не по назначению с последующим ухудшением их состояния. Присутствует недостаточное нормативно-правовое регулирование своевременного выявления изменения и оценки плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения. Предложено так же законодательно определить понятия почвы и ее плодородия как фундаментального уникального свойства.

Объекты и методы исследования

Выбрано агропредприятие, расположенное в западной части Ставропольского края (Изобильненский район). В его актив входит опытное поле, где вносились с различные сочетания агрохимических средств. Почва - черноземом обыкновенный, карбонатный слабогумусированный с тяжелосуглинистым гранулометрическим составом на карбонатно-лессовидных суглинках. По Классификации почв России 2004 года - отдел аккумулятивно-гумусовых почв, тип агрочернозём. Весной 2019 года были произведены облеты на БПЛА, на высоте 100 м. Использовались три воздушных судна с разными камерами на борту: 1) дрон фирмы DJI, обычная RGB камера, с целью проверить вегетационные индексы видимого спектра; 2) планер фирмы Геоскан с установленной на ним гиперспектральной камерой фирмы Gamaya, имеет 40 каналов в диапазоне от 450 до 900 нм; 3) дрон фирмы Агродронгрупп оснащен мультиспектральной камерой Parrot Sequoia, снимающей каналы в зеленом, ближнем инфракрасном, красном и ближнем красном диапазонах.

Снимки камер видимого диапазона и мультиспектральной обработаны с помощью программного обеспечения Agisoft Metashape и PiX4D. Для гиперспектрального диапазона использована специальная программа фирмы Gamaya. Изображения корректировались в программе QGIS (версия 2.18). Shape-файлы контрольных точек обработаны с помощью оригинальной программы, написанной на языке Python 3.6. В момент проведения эксперимента на поле находились посевы озимых - рапса и пшеницы в стадии кущения.

На трех различных агрохимических фонах выбраны по десять опытных делянок размером 1 кв. м, на них отбирались растительные образцы, учитывалась биомасса. Параллельно в это время делались замеры ручным прибором хлорофилл-метром марки SPAD-502. Затем общепринятыми методами проведен химический анализ растений на содержание общего азота, фосфора, калия. В смешанных почвенных образцах из слоя 0-20 см, определялось содержание органического углерода и почвенного азота с помощью прибора TOC-V – Total Organic Carbon Analyzer, а также выполнен агрохимический анализ стандартными методами, принятыми для данных почв.

Результаты и обсуждение

Камера видимого диапазона не имеет возможности получать индексы, учитывающие в расчетном алгоритме NIR (ближний инфракрасный канал), т.к. имеют информацию только о зеленом (G), красном (R) и синем (B) каналах. Следовательно, расчет индекса NDVI невозможен, но RGB индексы «зелености», позволяют получать информацию из видимого диапазона. Это - RGBVI, VARI, GLI вегетационные индексы.

Статистическая обработка данных не позволила выявить сколь-нибудь существенной и устойчивой связи между изучаемыми параметрами: индексами, состоянием и биомассой растений, и почвенными характеристиками.

Для NDVI мультиспектральной и гиперспектральной камер значение коэффициента линейной корреляции с биомассой озимых рапса и пшеницы на стадии кущения не превышало 0,72, и только при использовании поправочного коэффициента на площадь при расчете усредненного индекса. В период исследования сомкнутого посева еще не сформировалось.

Исследование возможностей применения хлорофилл-метра SPAD-502 для определения состояния сельскохозяйственных культур показало, что численные значения измерений не имеют существенной корреляции с другими изученными характеристиками состояния почв и биомассы растений в эту фазу развития, а также с данными дистанционного зондирования полей.

Полученные результаты не позволили установить корректные начальные условия для модели продукционного процесса в системе: «почва - гидротермические (агрометеорологические) условия – культура – урожай».

Выводы

Нами выявлены ряд проблем и вопросов, однозначный и универсальный ответ на которые пока отсутствует, что сдерживает широкое использование информации дистанционного зондирования пролей и сельскохозяйственных угодий, а также цифровых решений в земледелии.

Первая – выявление и определение связи между данными с БПЛА (конечными данными, построенными картами) и биомассой растений, что является основой адекватной оценки состояния посевов и урожаев сельскохозяйственных культур. Вторая - сравнение массивов цифровых данных, полученных на опытном поле или в условиях производственных посевов с различных камер: обычной RGB, мультиспектральной и гиперспектральной, которые имеют отличающиеся возможности и информационные каналы, показала их незаменимость. Следовательно, для различных задач, нужно использовать все три или предварительно отбирать наиболее информативные приборы. Третья – поиск и определение корреляции между показателями химического анализа почвы и растений с полученными массивами данных дистанционного зондирования агроценозов. Не всегда, не на всех объектах и временных интервалах она обязательно присутствует. Наконец, четвертая, - необходимость обязательно иметь контрольные наземные наблюдения состояния почв и посевов для получения сколь-нибудь объективных оценок при дальнейшем моделировании продукционных процессов для прогнозирования величины и качества урожаев.

В свою очередь, построение адаптивных агротехнологий и расчет ожидаемой эффективности использования различных агроприемов с учетом свойств почв и структуры почвенного покрова пока абсолютно оправдано проводится только на основании обобщения большого количества агрономических полевых экспериментов. В них должен соблюдаться принцип единственного различия и присутствовать как минимум трехлетний период наблюдений.

Для того, чтобы предлагаемые цифровые решения, сервисы, имеющаяся приборная база, а также программное обеспечение могли быть использованы в оптимизации агротехнологий и повышении эффективности применения агрохимических средств (в том числе в «точном» земледелии) нужны дополнительные исследования, отработка адекватных методов получения данных, их интерпретации и дальнейшего практического использования информации в прогнозных моделях. Здесь перспективным направление являются раздел искусственного интеллекта (ИИ) «machine learning» или «машинное обучение».

Пока полученный и представленный в открытом доступе успешный опыт многих исследователей представлен, в большинстве случаев, объектно-ориентированными алгоритмами, что

сдерживаете их успешное распространение и широкую экспериментальную проверку в условиях реального сельскохозяйственного производства и мониторинга.

Принято Постановление Правительства РФ от 14.05.2021 № 731 «О Государственной программе эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения и развития мелиоративного комплекса Российской Федерации». Программа предполагает финансирование в объеме 754 млрд рублей на 10 лет (538 млрд рублей – из федерального бюджета). Инвентаризация земель будет проведена в 83 регионах, начиная с 2022 года. Это первая, и главная, часть работ по вовлечению в оборот 13 млн га ранее использовавшихся сельскохозяйственных угодий. Задача - выявить конкретные земельные участки, которые больше всего подходят для сельского хозяйства. Затем планируется осуществить комплекс мероприятий: агрохимические и эколого-токсикологические исследования, подготовку проектов межевания и кадастровые работы, реконструкцию мелиоративных и гидротехнических сооружений, восстановление и развитие мелиоративных систем. Все это требует цифровых проектных решений на единой картографической основе.

Кроме вовлечения в оборот, программа подразумевает сохранение и восстановление мелиорированных почв на площади не менее 3,6 млн га. В планах - реконструкция и новое строительство осушительных и оросительных систем, культуртехнические работы по ликвидации древесно-кустарниковой растительности.

Для мелиорации почв и агроландшафтов нужны проекты, использующие цифровые геопространственные данные, электронные карты с геодезической точностью, включающие информацию о почвенном покрове и особенностях его функционирования. В идеале должны быть в наличии 2D, а, где возможно, 3D цифровые модели почв (а не рельефа) различного уровня и масштаба (локальные, региональные и т. д.). Последнее является принципиально новой и нетривиальной задачей.

Еще одним направлением представляется создание навигационной системы для беспилотной специальной техники, позволяющей минимизировать участие персонала в управлении бульдозерами, экскаваторами и т.д. Цель – снизить затраты на проведение гидромелиоративных и культуртехнических работ, повысить качество их проектирования и осуществления.

В комплекс для построения маршрутов техники должен входить БПЛА с камерой и автопилотом в бортовом компьютере, сервер хранения и обработки данных для построения маршрутов и планшетный ПК с навигационным модулем (навигатор). Сначала по заданной траектории осуществляется аэрофотосъемка местности, на ее основании строится цифровая модель площадки с учетом рельефа, препятствий и уклонов. По ней навигатор строит маршрут для специальных машин. Такие цифровые сервисы и технологии в ближайшее время должны будут проходить проверку эффективности в реальных условиях.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды». Автор выражает признательность аспиранту кафедры агроинформатики факультета почвоведения Соколову В.С. за выполнение полевых работ и обработку данных.

DIGITAL TECHNOLOGIES IN RUSSIAN AGRONOMY: PRESENT AND NEAR FUTURE

D. M. KHOMIAKOV
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, khom@soil.msu.ru

Abstract. In the agrometeorological conditions of the western part of the Stavropol Territory, the possibilities of using digital solutions and services for assessing the state of soils and the productivity of winter wheat and rapeseed were studied on ordinary carbonate low-humus chernozem with a heavy-loamy granulometric composition on carbonate-loess loams. A number of problems hindering the widespread use of the proposed digital solutions in agronomic practice are identified. Digital aspects of sustainable management of the country's soil resources used in the agro-industrial complex and promising areas for improving technologies are considered.

Keywords. Geoinformation systems, unmanned aerial vehicles, normalized relative vegetation index, chernozem, winter wheat, rapeseed, soil resources, digital agriculture and land melioration.

This research was performed according to the Development program of the Interdisciplinary Scientific and Educational School of M.V. Lomonosov Moscow State University «Future Planet and Global Environmental Change».

МЕТОДЫ, МАСШТАБЫ И ДАННЫЕ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В МОДЕЛЯХ РОСТА И РАЗВИТИЯ АГРОФИТОЦЕНОЗОВ

А. М. ЗЕЙЛИГЕР, О. С. ЕРМОЛАЕВА
[1]Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева
Москва, 127550, Тимирязевская ул., д. 49, E-mail: azeiliguer@mail.ru, ol_ermolaeva@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены производственные задачи, а также модели управления агрофитоценозами. Проведено описание включенных в модели роста и развития агрофитоценозов процессов в системе, состоящей из приземного слоя атмосферы, а также растительного и почвенного покровов. Отмечены достоинства использования данных дистанционного зондирования Земли для параметризации и верификации моделей роста и развития агрофитоценозов. Отмечен прогресс в увеличении качественного и количественного разнообразия данных дистанционного зондирования, позволяющих проводить совершенствование моделей роста и развития агрофитоценозов, позволяющих углублять фундаментальные знания о соответствующих процессах, включенных в модели роста и развития агрофитоценозов.

Ключевые слова. Агрофитоценозы, модели роста и развития, данные дистанционного зондирования, методы, масштабы, средства, инструменты, земледелие, растениеводство, опытное дело.

Введение

В целом акторы иерархической системы сельского хозяйства (ИС-СХ), расположенные на ее разных уровнях управления, производства, контроля и анализа вносят свою лепту в достижение общемировой цели, заключающейся в производстве для растущего населения Земли сельскохозяйственной продукции в условиях рестрикций, направленных на минимизацию негативных последствий на качество окружающей среды. Преследуя достижение этой цели в рамках установленных ограничений, соответствующие акторы, начиная с уровня отдельных континентов, стран, регионов, хозяйств, вплоть до отдельного агрофитоценоза, постоянно сталкиваются с необходимостью решения разнообразных диагностических и прогностических задач, связанных с земледелием и растениеводством. Эти задачи решаются ими, или с использованием традиционных, или более современных методов, или их сочетаний. Соответствующий вариант зависит от уровня имеющихся компетенций у управляемых ими коллективов, выполняющих соответствующие задачи, а также их технического и технологического обеспечения.

В настоящее время триада технологий геоинформационных систем (ГИС), дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) позволяет все более и более глубоко и детально проводить планирование, реализацию, контроль и анализ большинства производственных задач на всех уровнях ИС-СХ. В результате такого технологического обновления отрасли методы и инструменты триады ГИС-ДЗЗ-ГНСС становятся основными, способствующими решению конкретных сущностных задач.

Разнообразие задач акторов ИС-СХ на ее разных уровнях диктует специфические требования к пространственной и временной детализации используемых в их деятельности данных, которые поступают из различных источников, расположенных на космических, воздушных, наземных и подземных платформах. Характеристики данных этих источников в значительной мере влияют на осознанный выбор моделей роста и развития агрофитоценозов.

Задачи и модели оперативного управления агрофитоценозами

Современные постановки задач оперативного управления агрофитоценозами основаны на использовании моделей, описывающих процессы энерго- и массообмена, которые протекают в трехкомпонентном пространстве, включающем приземный слой атмосферы, а также растительный и почвенный покров. Среди этих задач можно выделить:

- ✓ Мониторинг земель сельскохозяйственного назначения;

- ✓ Мониторинг влияния сельского хозяйства на окружающую среду;
- ✓ Управление земледелием и растениеводством;
- ✓ Прогноз валовой урожайности;
- ✓ Обеспечение точного земледелия наборами данных;
- ✓ Выведение новых сортов и опытное дело.

В настоящее время основная часть моделируемых в указанном трехкомпонентном пространстве процессов энерго- и массообмена связана с описанием процессов роста и развития сельскохозяйственных растений под влиянием природных и антропогенных воздействий. Эти процессы включаются в следующие балансовые соотношения:

- ✓ энергетический, включающий составляющие потоков радиационного, кондуктивного и конвективного обменов между основными компонентами системы;
- ✓ водный, включающий составляющие перехвата осадков и поливной воды растительным покровом, инфильтрации и поверхностного стока, почвенно-грунтового стока, испарения с поверхности почвенного покрова и транспирации растительного покрова;
- ✓ углеродный, включающий составляющие фотосинтеза, дыхания растений, разложения растительной подстилки и дыхания почвы;
- ✓ азотный, включающий составляющие внесения удобрений, минерализации, денитрификации, улетучивания, выщелачивания, поглощения азота растениями и его симбиотической фиксации.

Вклад отмеченных компонент в рост и развитие агрофитоценозов, а также формирование конечного урожая оценивается с помощью соответствующих динамических моделей в зависимости от воздействий окружающей среды сформированных условий, а также взаимного влияния этих компонент.

Динамические модели роста и развития агрофитоценозов

Динамические модели роста и развития агрофитоценозов применяются для решения теоретических, методических и практических задач, связанных с получением растениеводческой продукции на локальном уровне сельскохозяйственного поля. С этой целью эти модели основаны на решении систем уравнений, входящих в вышеупомянутые балансовые соотношения, в зависимости от внешних воздействий, связанных с погодными условиями, а также методами управления агрофитоценозами.

Среди используемых динамических моделей роста и развития агрофитоценозов наиболее часто используются: CERES; WOFOST; STICS; DAISY; SWAP; HYDRUS; SAFYE; SVAT; LS.

Результаты расчетов по динамическим моделям используются при оценке методов и технологий управления агрофитоценозами на масштабе конкретных сельскохозяйственных полей, а также анализе возникающих при этом производственных, экономических и экологических задач и их эффективности. В основном, такие задачи направлены на диагностическое моделирование текущей ситуации, а также прогностическое моделирование оцениваемых вариантов возможных методов интегрированного управления и их воздействий на текущее или прогнозируемое состояния. Среди таких задач можно отметить выбор экономически целесообразной урожайности, управление орошением и оценка его эффективности, обоснование выбора строительство дренажа для борьбы со вторичным засолением почв, оценка негативного воздействия на окружающую среду и др.

В целом, поскольку динамические модели роста и развития агрофитоценозов были разработаны для решения разных задач в разных природно-климатических зонах для разных видов культур

агрофитоценозов, то их отличие между собой заключается не только в описании включенных в них процессов, но и используемой в них параметризацией. В связи с этим эти модели имеют специфические ограничения, а также имеют сложности в использовании из-за требуемой настройки содержащихся в них параметров и переменных. Эти обстоятельства оказывают влияние на достоверность этих параметров и переменных, что приводит к возникновению разнообразного рода неопределенностей в выходных данных.

Для снижения уровня неопределенностей при моделировании роста и развития агрофитоценозов применяют методы, позволяющие проводить калибрование параметров, а также верифицировать и валидировать результаты моделирования на фактических данных. Использование в последние годы для целей параметризации и верификации данных ДЗЗ в дополнение к обычно используемым полевым данным, позволило перейти на новый уровень моделирования, в частности, на пространственном экстенте с контурами с различными по значениям параметров и переменных состояния. К последним относятся характеристик LAI, fAPAR, вегетационные индексы, температура растительного покрова, влагозапасы почвенного покрова и др. Это достоинство позволило использовать модели роста и развития агрофитоценозов в рамках парадигмы точного земледелия.

Данные дистанционного зондирования Земли и их соответствие решаемым задачам

Использование данных ДЗЗ при решении задач на разных уровнях ИС-СХ сталкивается с рядом ограничений. Такие ограничения возникают из-за несоответствия пространственного и спектрального разрешения съемочной аппаратуры, повторяемости сеансов съемки, наличия облачности и пр. Достаточно часто возникают сложности с удовлетворением требований из-за технических ограничений, не позволяющих получать необходимые временные рядам пространственных слоев параметров, а также характеристик состояния агрофитоценозов. Все это может создавать серьезные препятствия для получения надежных результатов моделирования. С целью преодоление такого рода препятствий используются методы, позволяющие восполнять пробелы в рядах данных, а также дезагрегации слоев пространственных данных низкого разрешения для получения из них слоев с более высоким разрешением.

Произошедшее в последние два десятилетия развитие применения данных ДЗЗ для решения задач ИС-СХ было основано на техническом развитии съемочной аппаратуры. Это позволило расширить разнообразие поставляемых наборов данных ДЗЗ за счет увеличения пространственного и спектрального разрешения, а также повторяемости сеансов съемки. Примерами тому служат космические группировки Sentinel, Planet, GaoFen. С их помощью удалось повысить достоверность параметризации многих моделей ростра и развития агрофитоценозов, использующих данные о плотности растений, динамике альбедо, LAI, биохимических показателях листовой поверхности, а также потоков суммарного испарения и др. В дополнение к этому стало возможным характеризовать влажность, как листовой поверхности растительного покрова за счет использования данных канала RedEdge, а также влажности поверхностного слоя почвенного покрова за счет использования данных съемки в СВЧ диапазоне.

Выводы

В настоящее время данные ДЗЗ доступны с различным пространственным и спектральном разрешением, а также высокой периодичностью практически во всех регионах, где ведется земледелие и растениеводство. Это позволяет использовать разработанные динамические модели роста и развития агрофитоценозов, как для углубления существующих фундаментальных

знаниях об основных протекающих процессах, так и применения результатов моделирования для эффективного и экологически нейтрального ведения земледелия и растениеводства.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-29-05261.

METHODS, SCALES AND DATA OF REMOTE SENSING IN MODELS OF GROWTH AND DEVELOPMENT OF AGROPHYTOCENOSES

A. M. ZEYLIGER, O. S. ERMOLAEVA
Russian State Agrarian University MTA, Moscow, Russia, azeiliguer@mail.ru, ol_ermolaeva@mail.ru

Abstract. Production tasks, as well as models of agrophytocenoses management are considered. The description of the processes included in the growth and development models of agrophytocenoses in a system consisting of the surface layer of the atmosphere, as well as vegetation and soil cover is carried out. The advantages of using remote sensing data for parameterization and verification of growth and development models of agrophytocenoses are noted. Progress has been noted in increasing the qualitative and quantitative diversity of remote sensing data, which makes it possible to improve the growth and development models of agrophytocenoses, allowing to deepen the fundamental knowledge about the relevant processes included in the growth and development models of agrophytocenoses.

Keywords. Agrophytocenoses, growth and development models, remote sensing data, methods, scales, means, tools, agriculture, crop production, experimental work.

ДИСТАНЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АНОМАЛИЙ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАСТЕНИЙ КАК РАННИХ ИНДИКАТОРОВ СТРЕССА

О. В. ГРИГОРЬЕВА[1], В. Н. ГРУЗДЕВ[1,2], И. В. ДРОЗДОВА[3], Б. В. ШИЛИН[1,2], А. Ю. КУЗНЕЦОВ[4]
[1]Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,
Санкт-Петербург, 197198, Россия, E-mail: alenka12003@mail.ru;
[2]Научно-исследовательский Центр экологической безопасности РАН,
Санкт-Петербург, 197198, Россия, E-mail: bshilin@rambler.ru;
[3]Ботанический институт имени В.Л. Комарова РАН,
Санкт-Петербург, 197376, Россия, E-mail: alyssum7@gmail.ru;
[4]Нациаональный исследовательский университет ИТМО,
Санкт-Петербург, 197101, Россия, E-mail: al.ur.kouznetsov@gmail.com

Аннотация. При внезапном кратковременном или длительном воздействии неблагоприятных факторов у растений в короткие сроки – от нескольких до десятков часов – возникают спектральные аномалии в ближнем инфракрасном диапазоне 750–1000 нм до появления видимых морфологических изменений. Возможность исследовать это явление позволили разработки спектрорадиометров и видеоспектрометров высокого пространственного и спектрального разрешения. С помощью этих приборов были проведены широкие лабораторные, полевые и авиационные исследования изменений спектральных характеристик (спектральной плотности энергетической яркости СПЭЯ и коэффициента спектральной яркости КСЯ) при воздействии на растения таких стрессоров как тяжёлые металлы, ионизирующие излучения, нефтепродукты, механические повреждения и т.п. В зависимости от типа стрессора, времени его воздействия и вида растения возникают положительные и отрицательные аномалии, характеризующие разные ответные реакции на стресс (стимулирующий и угнетающий эффект).

Ключевые слова: стресс растений, спектральные характеристики, видеоспектрометры, спектрорадиометры, монохромные изображения.

Введение

В последние десятилетия в связи с разработкой спектрорадиометров и видеоспектрометров с высоким спектральным и пространственным разрешением появилась возможность исследования явления формирования у растений под влиянием различных стрессоров (тяжёлые металлы Cu, Ni, Zn и Cd, ионизирующие излучения, нефтепродукты, механические повреждения и т.п.) спектральных аномалий до появления у растений видимых цветовых и структурных изменений. Нами использованы две технологии исследований: 1) в строго контролируемых условиях оранжереи с использованием спектрорадиометров (точечных приборов), 2) в полевых условиях и с авианосителей с использованием видеопектрометров (позволяют получать спектральную информацию по площади изображения). Были использовании спектрорадиометры Spectral Evolution PSR 3500 и PSR 1100, имеющие спектральное разрешение 3.2 нм в диапазоне 350-1000 нм и поле обзора 4 угл. град. и видеоспектрометр «Фрегат» Университета ИТМО. имеющий спектральное разрешение 2.0 нм в диапазоне 350-1000 нм, поле обзора 28 угл. град. и пространственное разрешение 1.0 мрад. В качестве объектов исследований были выбраны фасоль обыкновенная, подсолнечник однолетний, горчица белая, гречиха съедобная, хоста ланцетолистая, барбарис Тунберга, ель европейская, клён остролистный, дуб черешчатый и др. Всего было получено и проанализировано более 1000 спектров КСЯ и СПЭЯ.

1. Исследования со спектрорадиометрами

В лабораторных условиях растения выращивали в вегетационных сосудах с песком в контролируемых условиях с 16 часовым световым периодом при освещении светом от люминесцентных ламп OSRAM L36W/77 и поливом ½ концентрации питательного раствора Арнона. При экспериментах с тяжёлыми металлами большую часть растений опрыскивали,

небольшое количество поливали (под корень) водными растворами сернокислых солей, два сосуда оставались контрольными. Использовались концентрации тяжелых металлов, соответствующие 3, 6 и 9 ПДК долей предельно-допустимой концентрации (ПДК). Сухие образцы растительного материала озоляли в муфельной печи при 450ºС в течение 12 ч. Золу растворяли в 6 мл смеси кислот: 1.5 М HCl и 3.71 М HNO3, затем разбавляли деионизированной водой до 25 мл. Концентрации тяжёлых металлов определяли на атомно-абсорбционном спектрофотометре.

1.1 Регистрация стресса растений под воздействием тяжелых металлов

Фасоль была выбрана в качестве объекта как растение, показывающее быстрый рост и имеющее удобные для измерений достаточно крупные листья. Для фасоли распыление меди в концентрациях 6 ПДК и 9 ПДК привело к формированию на следующий день чёткой отрицательной аномалии КСЯ в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне. Через пять дней характер аномалии сохранился (рис. 1).

Кадмий по сравнению с медью вызывает заметно большее угнетающее воздействие. Через несколько часов после распыления происходит резкое понижение спектральной кривой. На следующий день аномалия уменьшается, но даже через пять дней не достигает контрольных фоновых значений.

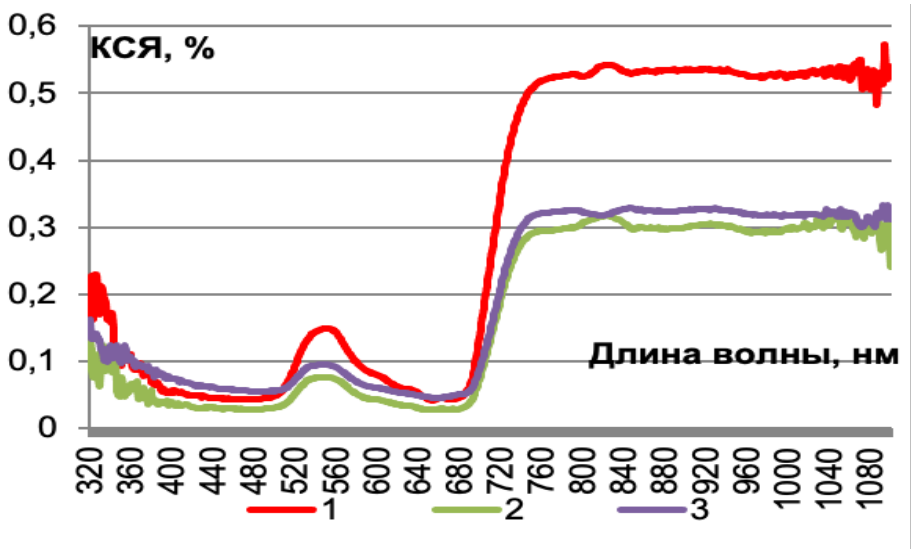


Рис. 1. КСЯ фасоли при воздействии меди (6 ПДК):
1 – контрольное растение, измерение 04.04.2019 г., 2 и 3 – воздушно-капельное загрязнение листовой поверхности, измерение 04.04.2019 г. и 09.04.2019 г. Спектрорадиометр PSR 1100.

Цинк является жизненно важным микроэлементом, поэтому его воздействие в концентрации 6 ПДК оказало стимулирующее воздействие на рост фасоли, что выразилось в повышении значения КСЯ в ближней ИК области. Изменения в КСЯ фасоли после опрыскивания никелем в концентрации 6 ПДК характеризуются понижением КСЯ в красной – ближней ИК области спектра. Закономерности изменения спектральных характеристик клёна под воздействия меди представлены на рис. 2. Они демонстрируют отрицательную динамику КСЯ в ближнем ИК диапазоне с течением времени 4, 5 и 10 апреля после опрыскивания 2 апреля.

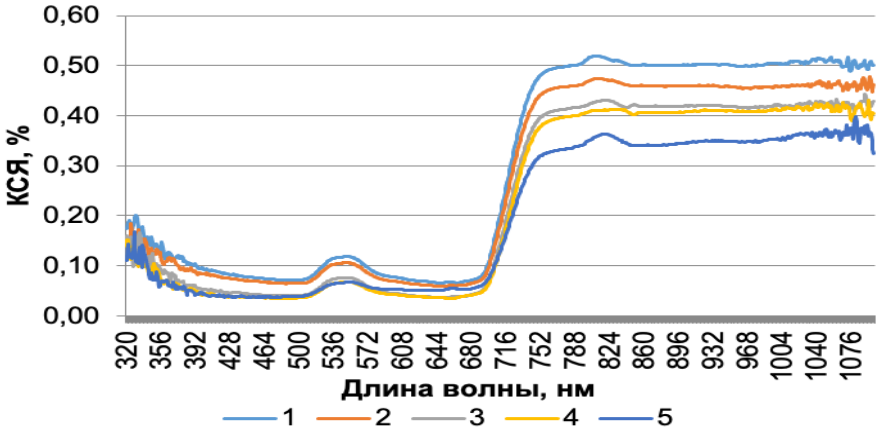


Рис. 2. КСЯ клена при воздушно-капельном загрязнении листовой поверхности медью (9 ПДК): 1 – измерение 03.04.2019 г., 2 - измерение 04.04.2019 г., 3 – измерение 05.04.2019 г., 4 – измерение 09.04.2019 г., 5 – измерение 10.04.2019 г. Спектрорадиометр PSR 1100

Воздействие цинка на клен также вызывает угнетение, которое сохраняется в течение длительного времени (неделю). Под воздействием никеля для клена наблюдается быстро возникающая отрицательная аномалия, которая постепенно уменьшается до контрольного значения через неделю.

1.2 Регистрация стресса растений под воздействием ионизирующего излучения

В экспериментах был использован диск диаметром 4 сантиметра – часы с циферблатом и стрелками, светящимися за счёт радиоактивного изотопа. По гамма-излучению доза составили около 130-140 мкр/час, то есть примерно 4–5 фоновых значений. Источник располагался непосредственно под листом растений – фасоли, герани, сингониума, клёна и дуба на время от нескольких часов до трёх суток.

Для клёна при суточном воздействии зафиксирована положительная аномалия КСЯ (30–40%) в ближнем ИК диапазоне (рис. 5). Через трое суток зафиксирована отрицательная аномалия КСЯ (10-15%). То есть можно сделать вывод о стимулирующем влиянии слабого излучения на ранних стадиях воздействия и угнетающего на более поздних.

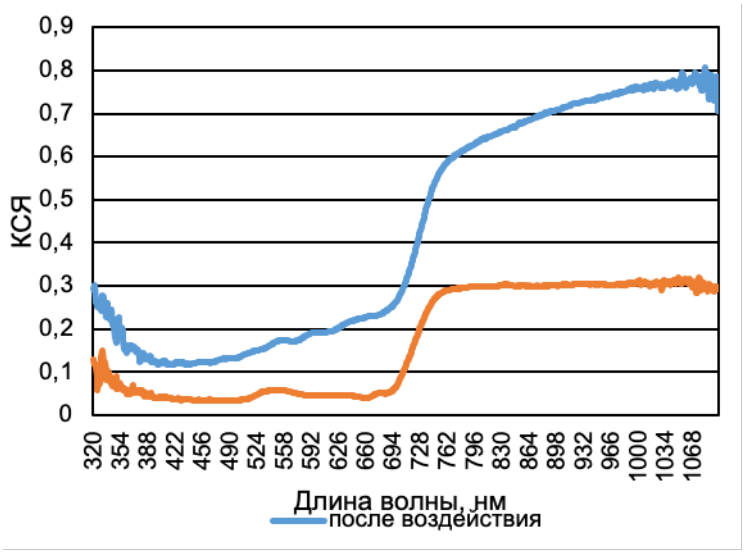


Рис. 3. КСЯ клена при воздействии ионизирующих излучений. Спектрорадиометр PSR 1100.

Дуб реагирует на тот же источник слабо, аномалия возникает через несколько суток. Для листьев фасоли серия измерений даёт положительные спектральные аномалии через 19, 23 и 48 часов. Разовые измерения для герани и сингониума также выявили небольшие аномалии – положительную для сингониума и отрицательную для герани.

Регистрация факта аномалий важна для изотопов с преобладающей интенсивностью альфа и бета излучения, недоступных для регистрации аэрогаммасъёмкой. Очевидно, что при больших дозах и площадях, например, в случае техногенных аварий, спектральные аномалии могут быть зарегистрированы видеоспектрометрами авиационного и космического базирования.

2 Исследования с видеоспектрометрами

2.1 Полевая съёмка

Для оценки стрессов растительности с применением видеоспектрометров был просканирован тестовый участок, представляющий собой шпалеры кустарника (барбарис Тунберга), газон, гравийная дорожка, яркостные эталоны, искусственные объекты (куртки на кустах справа вверху, крышки, мерные флажки). Специфика измерений (они проводятся практически одновременно, за 10–20 с, для всех объектов) позволяет объективно сравнивать спектральные характеристики, проследить их изменения в видимом – ближнем ИК диапазоне и делать обоснованные выводы о возможностях их регистрации и дифференциации видеоспектральным методом. В качестве примера на рис. 4 представлены кривые КСЯ барбариса Тунберга до и после загрязнения. Стресс – угнетающее воздействие – отчётливо прослеживается

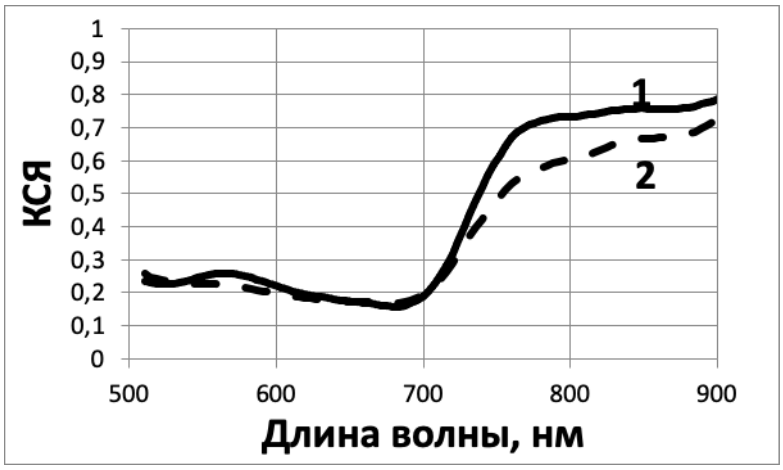


Рис. 4. КСЯ барбариса Тунберга. Измерения 29 июня 2016 г. Видеоспектрометр «Фрегат». 1 – контрольная площадь; 2 – площадь, загрязнённая сульфатом меди (через полтора месяц после полива фиксируется отрицательная спектральная аномалия в ближнем ИК диапазоне)

2.2 Аэросъёмка

Проведение аэросъемки с помощью видеоспектрометров даёт возможность проследить очевидные различия и вариации спектральных контрастов сельскохозяйственного ландшафта, которые подтверждаются результатами вычислений спектров отражения некоторых его объектов (рис. 5). Наиболее заметны изменения для таких компонентов ландшафта как растительность – естественная и культурная, для которой интенсивность излучения резко увеличивается, начиная с длины волны 700–720 нм. На изображениях каналов до 697 нм растительность выглядит тёмной, далее на каналах ближнего ИК диапазона – светлой. Наименьшие изменения отмечаются у водной поверхности (водоём прямоугольной формы в нижней части снимка).

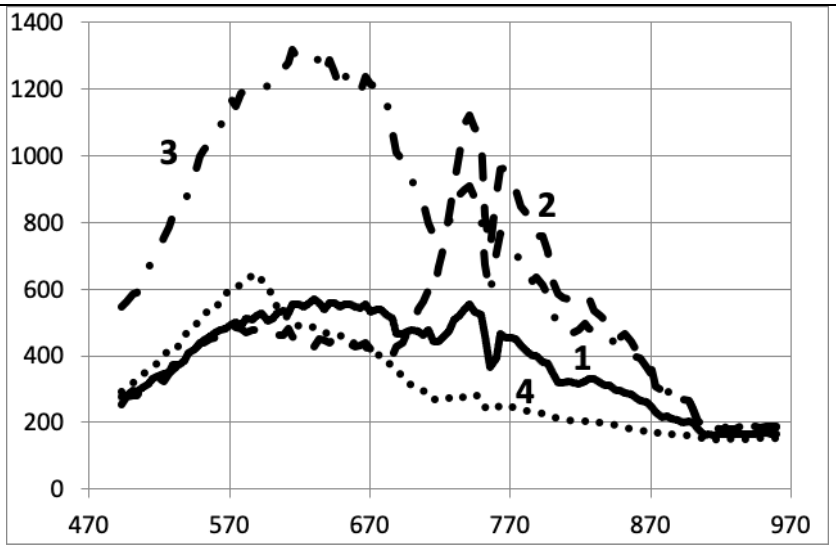


Рис.5. Спектральные характеристики некоторых элементов ландшафта на рисунке 5.
1 – вспаханное поле, 2 – кустарник, 3 – дорога, 4 – водоём.

Заключение

Опыт спектральных исследований 2014–2019 гг. с современными авиационными и полевыми видеоспектрометрами и спектрорадиометрами показывает, что изучение фундаментальных закономерностей ранних стадий стрессовых ситуаций наиболее эффективно и достоверно при работе в строго контролируемых условиях оранжереи. При этом могут быть также выявлены и учтены возможные изменения КСЯ между листьями одного растения и в пределах одного листа из-за неодинакового воздействия стрессора (например, при неравномерном распределении тяжёлого металла в пределах листа).

Для сравнения влияния стрессоров на конкретную природную ситуацию следует использовать полевые или авиационные видеоспектрометры, дающие возможность получать спектральную информацию с больших площадей в одинаковых условиях краткого времени измерений (секунды – десятки секунд).

Список литературы

1. Алексеев А.А., Шилин Б.В., Шилин И.Б. Опыт полевых видеоспектральных исследований. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 4. С. 89–94.
2. Виноградов А.И., Егоров В.В., Калинин А.П., Родионов А.И., Родионов И.Д. Линейка гиперспектральных сенсоров оптического диапазона. М.: ИКИ РАН. 2015. 20 с.
3. Виноградов А.И., Егоров В.В., Калинин А.П., Родионов А.И., Родионов И.Д., Родионова И.П. Узкоугольный гиперспектрометр видимого и ближнего инфракрасного диапазона. М.: ИКИ РАН. 2016. 16 с.
4. Григорьева О.В., Груздев В.Н., Кузнецов А.Ю., Чапурский Л.И., Шилин Б.В. Сравнение авиационных видеоспектрометров с различными типами полихроматоров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 143–149.

DISTANCE STUDIES OF ANOMALIES OF SPECTRAL CHARACTERISTICS OF PLANTS AS EARLY INDICATORS OF STRESS

O. V. GRIGORIEVA[1], V. N. GRUZDEV[1,2], I. V. DROZDOVA[3], B. V. SHILIN[1,2], A. YU. KUZNETSOV[4]
[1]Military Space Academy named A.F. Mozhaiskogo,
St. Petersburg, 197198, Russia, E-mail: alenka12003@mail.ru;
[2]Research Center for Environmental Safety, Russian Academy of Sciences,
St. Petersburg, 197198, Russia, E-mail: bshilin@rambler.ru;
[3]Botanical Institute named after V.L. Komarov RAS,
St. Petersburg, 197376, Russia, E-mail: alyssum7@gmail.ru;
[4]National Research University ITMO,
St. Petersburg, 197101, Russia, E-mail: al.ur.kouznetsov@gmail.com

Annotation. With a sudden short-term or long-term exposure to unfavorable factors in plants in a short time - from several to tens of hours - spectral anomalies appear in the near infrared range of 750 - 1000 nm until visible morphological changes appear. The opportunity to study this phenomenon was made possible by the development of spectroradiometers and video spectrometers of high spatial and spectral resolution. With the help of these devices, extensive laboratory, field and aviation studies of changes in spectral characteristics (spectral density of the energy brightness of the SPEC and the spectral brightness coefficient of the SSC) were carried out when plants were exposed to stressors such as heavy metals, ionizing radiation, oil products, mechanical damage, etc. Depending on the type of stressor, the time of its exposure and the type of plant, positive and negative anomalies arise that characterize different responses to stress (stimulating and depressing effects).

Key words: plant stress, spectral characteristics, video spectrometers, spectroradiometers, monochrome images.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ В СИСТЕМАХ МОНИТОРИНГА АГРОЭКОСИСТЕМ

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ТЕРРИТОРИИ ЦЕНТРАЛЬНОГО ИРАКА ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

О. С. ТОКАРЕВА[1], О. А. ПАСЬКО[2], С. М. МАДЖИД[3]
[1] ФГАОУ ВО Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ФГАОУ ВО НИ ТПУ), ostokareva@gmail.com;
[2] ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт» (ФГБНУ АФИ), Санкт-Петербург, pasko@agrophys.ru;
[3] Министерство образования Республики Ирак, Главное управление образования Аль-Карх 1, Ирак, Eng.saif_aljobory@yahoo.com

Аннотация. Проведено исследование временно-территориальной изменчивости состояния растительности центральной части территории Республика Ирак путем анализа значений нормализованного разностного вегетационного индекса. По данным дистанционного зондирования Земли за 15 лет, в период с 2003 по 2017 гг. выявлены закономерности сезонной и годовой динамики растительности по классам ее плотности.

Ключевые слова. Вегетационный индекс, геоинформационные системы, данные дистанционного зондирования, класс растительности, сельское хозяйство, Центральный Ирак.

Введение

Земли сельскохозяйственного назначения составляют пятую часть территории Ирака, половина из которой расположена в долинах Евфрата и Тигра и является орошаемой. По площади орошаемых угодий (3,5 млн. га) Ирак до 2003 года входил в десятку ведущих стран мира, сельское хозяйство давало 7% валового национального продукта, происходил рост посевных площадей, были построены крупные плотины и ирригационные системы, восстановлены старые каналы.

В ходе боевых действий, начавшихся с 2003 года, основная часть мелиоративных сооружений была разрушена, и производительность сельского хозяйства упала на 90 %. Миграция населения в города, отсутствие государственных субсидий, многолетняя сильная засуха (2004–2010 гг.) нанесли значительный ущерб сельскому хозяйству (Agriculture in Iraq., 2017). Их последствия были усилены экономическими санкциями против Ирака, запретившими импорт сельскохозяйственных товаров, в т.ч. техники и удобрений. В то же время, благодаря деятельности Международного Комитета Красного Креста, в Центральном Ираке, где сосредоточены основные сельхозугодья страны, введены в строй системы капельного орошения (Iraqi Agriculture …, 2021), позволившие экономить расход воды на 67 % и значительно снижать риск потери урожая.

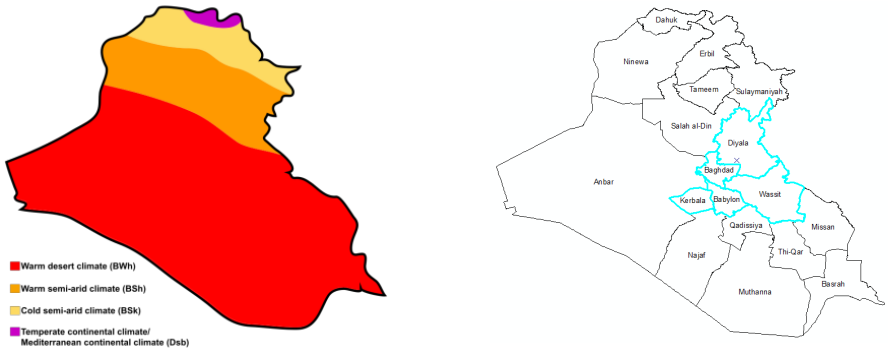
Основными орошаемыми летними культурами региона являются: рис, кукуруза, хлопок, овощи и фрукты, озимыми – зерновые культуры (Agriculture in Iraq, 2017). 3 % площади сельхозугодий занимают: семенной хлопок, клевер, овощи, в т.ч. баклажан и тыква, бобовые растения, в т.ч. фасоль и горох, значительно меньше – яблони, картофель, лук, виноград и кунжут. Люцерну и другие бобовые культуры выращивают для животноводства как дополнение к ячменю.

Максимально эффективное ведение сельскохозяйственного производства в экстремальных условиях природного, антропогенного и социального характера предполагает использование актуальной и объективной информации о состоянии растительности, которую можно получить с помощью методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и ГИС-технологий пространственного анализа данных (Пасько и до., 2016; Токарева и др., 2019). В исследованиях иракских ученых описана деградация растительного покрова болот Междуречья и юга Ирака в период с 1973 по 2004 гг. (Mjachina et al., 2018), и выявлены изменения в классах растительности

города Халабджа (Ирак) после обстрела химическим оружием 16.03.88 (Al-doski et al, 2013). Для провинции Багдад в период с 1990 по 2001 гг. показан рост площади посевов за счет сокращения площади деградированных земель (Najeeb, 2009). Необходимость восстановления разрушенного хозяйства и максимальной экономии средств в сложных природных, антропогенных и социальных условиях вызывают потребность мониторинга состояния земель сельхозназначения, сосредоточенных преимущественно в Центральном Ираке. Цель исследования – анализ динамики растительности территории пяти провинций Центрального Ирака путем определения значений нормализованного разностного вегетационного индекса (NDVI) по ДЗЗ в период с 2003 по 2017 гг.

Объекты и методы исследования

Наиболее динамичное развитие растений в Ираке происходит в начале года (Arai et al., 2013), поэтому для анализа выбраны многолетние ряды данных ДЗЗ за февраль–апрель 2003–2017 гг. Объект исследования – территории пяти провинций Центрального Ирака (Бабиль, Багдад, Васит, Дияла и Кербела) (рис. 1); предмет исследования – территориально-временная изменчивость состояния их растительности с помощью вегетационного индекса NDVI. Использованы снимки со спутников Landsat 5, 7 и 8 (USGS, США), покрывающие объект исследования с близкими датами съемки.



а б

Рис. 1. Климат (а) Республики Ирак (Nations encyclopedia, 2021) и районы исследования (б)

Построены карты NDVI, отражающие плотность растительности и проведено зонирование территорий путем задания известных значений границ параллелепипедов с помощью принятой в Республике Ирак классификации (растительности отсутствует (-1-0), бедная (0-0,15), умеренная (0,15-0,3), плотная (0,3-0.45), очень плотная (0,45-0,6), максимальной плотности (0,6-1). Для обработки и представления данных использовано следующее программное обеспечение: ERDAS Imagine (Erdas Imagine, 2017); ArcMap 10.3 (What is Arc GIS Desktop, 2017); QGIS (QGIS, 2017) и Microsoft Excel. Рассчитаны средние значения NDVI, средние квадратичные отклонения, коэффициенты корреляции между температурой и значениями NDVI, коэффициенты вариации значений NDVI, среднегодовые темпы роста растительности.

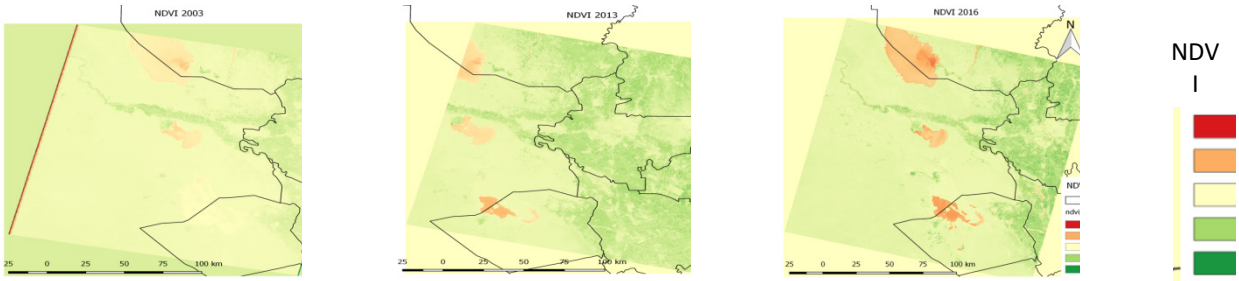
Результаты и обсуждение

В ходе анализа сезонной динамики классов растительности выявлены следующие закономерности. Площади территории класса «Растительность отсутствует» максимальны в провинциях Багдад и Васит и минимальны в провинции Дияла; класса «Бедная растительность» максимальны в провинции Васит и минимальны в провинции Бабиль; классов растительности «Умеренная», «Плотная» и «Очень плотная» максимальны в провинции Васит и минимальны в

провинции Бабиль; класса «Максимальной плотности» максимальны в провинциях Дияла и Васит и минимальны в провинции Багдад. Установлены определенные диспропорции между долей различных классов растительности в общей площади для разных провинций. Так, в январе максимальные площади классов растительности «Плотная» и «Максимальной плотности» отмечены для провинции Бабиль, площадь которой в разы меньше площадей других провинций (Дияла и Васит). Провинция Васит, уступающая по площади провинции Дияла, характеризуется устойчиво высокими показателями классов «Растительность отсутствует», «Очень плотная» и «Максимальной плотности». В то же время имеется соответствие минимальных площадей изученных классов растительности меньшим площадям в провинциях Багдад и Бабиль. Обращает на себя внимание резкий переход от низких значений показателей развития растительности в январе Дияла к средним и максимальным в феврале и марте.

Сравнение провинций по классам растительности в январе–марте выявило их региональные особенности. В начале вегетационного периода (январь) максимальны площади класса «Растительность отсутствует», они снижаются в феврале и марте во всех изученных провинциях. По мере распахивания полей, всходов однолетних и активизации развития многолетних культур происходит сокращение его площади: максимум отмечен для провинции Васит, минимум – Бабиль (январь, март) и Дияла (февраль).

Выявлено сокращение площадей с низкими значениями NDVI и компенсаторный рост площадей с высокими значениями NDVI. Изучение годовой изменчивости значений NDVI в провинциях Центральной части Ирака подтвердило их региональные особенности (рис. 2).



2003 2013 2016

Рис. 2. Карта значений NDVI территорий Багдад и Кербела в 2003, 2013 и 2016 гг.

В таблице приведены средние значения NDVI территорий провинций Багдад и Кербела по годам, согласно которым, в период с 2003 по 2016 гг. происходит их рост.

Таблица. Значения NDVI и темпы их изменения для провинций Центрального Ирака

Годы	Багдад	Кербела
Средние значения NDVI		
2003	0,162033	0,061082
2013	0,265373	0,117161
2016	0,309543	0,123347
Среднегодовые темпы роста NDVI		
2003-2013	5,1	6,7
2013-2016	5,3	1,7

Имеются значительные различия территорий по среднегодовым темпам роста NDVI. Эти показатели в разные промежутки времени (2003-2013 и 2013-2016 гг.) достаточно стабильны для

Багдада и очень резко снижаются для Кербелы (почти в 4 раза). Минимальное среднее значение NDVI зафиксировано на территории Багдада в 2003 г. и связано, вероятно, со вторжением войск США на территорию Ирака. Анализ площадей разных групп растительности по провинциям выявил их незначительную и среднюю изменчивость для провинций Бабиль и Дияла, среднюю для провинции Васит, незначительную, среднюю и значительную для провинции Багдад.

Полученные результаты можно интерпретировать следующим образом. Участки, на которых растительность полностью отсутствует, непригодны для роста и развития растений в принципе, их площадь стабильна во времени и пространстве. Очень плотная растительность может появляться и на территориях, занятых растительностью всех предыдущих классов (за исключением «Растительность отсутствует»), поэтому рост ее площади максимален. Изменчивость площадей остальных групп является равномерной. В зависимости от условий развития растительности вероятен переход между соседними классами. Наиболее стабильны условия роста и развития растительности в Бабиле и Дияле и крайне нестабильны в Багдаде. Временная изменчивость значений площадей различных групп растительности является существенно более высокой, чем территориальная.

Корреляционный анализ между показателями NDVI, площадью территорий разных классов растительности и погодными условиями (температура, осадки) (Erdas Imagine, n.d.) выявил слабые и недостоверные связи, что привело к выводу об обусловленности различий не природными, а иными (антропогенными, социальными, экономическими и др.) причинами. Использование данных ДЗЗ совместно с экономическими исследованиями позволяет дать интегральную оценку потерям сельскохозяйственного производства в ходе военных действий, что может являться темой последующих исследований.

Выводы

Выявлены закономерности сезонной динамики классов растительности. Во всех провинциях площади класса «Растительность отсутствует» стабильны. В процессе вегетации снижение «Бедной» и «Умеренной» растительности компенсируется параллельным ростом «Плотной» и «Очень плотной». Региональные особенности проявляются в скорости и вариативности этих процессов. Отсутствие корреляций значений NDVI с метеорологическими условиями сезона в условиях искусственного орошения и значительные изменения NDVI по годам и провинциям объясняют выявленный феномен не природными, а хозяйственными факторами. Их расширение или разрушения оказывают, на наш взгляд, определяющее влияние на рост биомассы растений, а, следовательно, и продуктивность сельскохозяйственных культур в Центральном Ираке.

Список литературы / References

1. Пасько О. А., Токарева О. С., Ушакова Н. С., Макарцова Е. С., Гапонов Е.А. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса // Применение спутниковых методов исследований для оценки состояния территорий снежных отвалов. 2016. Т. 13. № 4. С. 20–28.
2. Токарева О. С., Алшаиби А. Д. А., Черникова Т.Ю., Кабраль П. Оценка состояния припоселковых кедровников Томской области с использованием данных дистанционного зондирования Земли // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019 Т. 330 № 1. С. 98–109.
3. Agriculture in Iraq: Resources, Potentials, Constraints, and Research Needs and Priorities. – http://www.ars.usda.gov/SP2UserFiles/Place/50600000/Products-Reprints/2002/1107.pdf.

4. Al-doski J., Mansor Sh. B., Zulhaidi H., Shafri M. NDVI Differencing and Post-classification to Detect Vegetation Changes in Halabja City, Iraq Department of Civil, Faculty of Engineering, Universiti Putra Malaysia, 43400 UPM, Serdang, Selangor, Malaysia. Vol. 1, (2). P. 1-10.
5. Arai K., Sakashita M., Shigetomi O., Miura Y. (2013). Estimation of Protein Content in Rice Crop and Nitrogen Content in Rice Leaves Through Regression Analysis with NDVI Derived from Camera Mounted Radio-Control Helicopter // International Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence. 2013. Vol. 3(3). P. 13-19.
6. Erdas Imagine. – https://en.wikipedia.org/wiki/Erdas_Imagine.
7. Iraqi Agriculture in Crisis. – http://www.al-monitor.com/pulse/originals/2013/01/iraq-farmers-abandon.html.
8. Mjachina K., Hu Z., Chibilyev A. Detection of damaged areas caused by the oil extraction in a steppe region using winter landsat imagery // Journal of Applied Remote Sensing. 2018. Vol. 12(1), 016017.
9. Najeeb A.A. Estimation of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) Variation for Selected Regions in Iraq for two Years 1990 & 2001 // J. of university of an Bar for pure science. 2009. Vol.3(3) : 2009. P. 120-132.
10. Nations encyclopedia. – http://www.nationsencyclopedia.com/economies/Asia-and-the-Pacific/Iraq.html#ixzz4zz8FrUFI.
11. QGIS - The Leading Open Source Desktop GIS. – http://qgis.org/en/site/about/index.html.
12. What is Arc GIS Desktop? – http://resources.esri.com/help/9.3/ArcGISEngine/dotnet/32c48855-d2d5-4f82-9ecb-d44a6cdf1c96.htm.

ASSESSMENT OF THE STATE OF VEGETATION IN THE TERRITORY OF CENTRAL IRAQ BASED ON REMOTE SENSING DATA

O. S. TOKAREVA[1], O. A. PASKO[2], S. M MAJID[3]
[1] National Research Tomsk Polytechnic University), ostokareva@gmail.com;
[2]Agrophysical Research Institute, Saint Petersburg, pasko@agrophys.ru;
[3] Ministry of Education of the Republic of Iraq, General Directorate of Education Al-Karh 1, Iraq, Eng.saif_aljobory@yahoo.com

Annotation. A study of the temporal and territorial variability of the vegetation state in the central part of the territory of the Republic of Iraq was conducted by analyzing the values of the normalized difference vegetation index (NDVI) according to remote sensing data for 15 years, in the period from 2003 to 2017. The regularities of the seasonal and annual dynamics of vegetation by its density classes are revealed.

Keywords. Vegetation index, geographic information systems, remote sensing data, vegetation class, agriculture, Central Iraq.

ДЕТЕКТИРОВАНИЕ СИЛЬНЫХ РОС ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Е. В. ВАСИЛЕНКО [1], Л. Л. ТАРАСОВА [2]
[1] *НИЦ «Планета», Москва, asmus@planet.iitp.ru;*
[2] *ФБГУ «Гидрометцентр России», Москва, hmc@mecom.ru*

Аннотация. Сопоставление полей влажности почвы со скаттерометров ASCAT (ИСЗ семейства MetOp) за утренние и вечерние пролеты показало значительные различия в увлажнении верхнего слоя. Наиболее вероятной причиной наличия суточного хода в данных можно считать выпадение росы. Совместный анализ на основе разности значений за утренние и вечерние пролёты и данных метеостанций подтвердил гипотезу. Таким образом, нами показано, что величина обратного рассеяния импульса, испускаемого скаттерометром ASCAT и отраженного от Земли, зависит не только от влажности верхнего слоя почвы, но и от влаги на поверхности почвы и растительности. По разности между значением за вечерний пролёт предыдущего дня и значением утром, можно судить об интенсивности росы, что дает возможность судить об условиях уборки зерновых колосовых культур.

Ключевые слова. влажность почвы, роса, скаттерометр.

Введение

В течение нескольких лет в отделе агрометеорологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» совместно с ФГБУ «НИЦ «Планета» ведется мониторинг влажности верхнего слоя почвы по данным ДЗЗ [1, 2, 4]. В соответствии с соглашением Росгидромет – EUMETSAT, ФГБУ «НИЦ «Планета» оперативно получает данные с зарубежных спутников по системе международного обмена EARS (EUMETSAT Advanced Retransmission Service). Система позволяет получать ряд данных, в том числе и информацию об относительной влажности почвы верхнего слоя почвы со скаттерометра ASCAT (ИСЗ серии MetOp). Прибор ASCAT ведет измерения по двум полосам обзора, расположенным с слева и справа от линии трека пролета спутника. Ширина каждой полосы – по 550 км. Расстояние между ними – 700 км. Разрешение данных – 12,5 км. Данные с прибора ASCAT приходят в ФГБУ «НИЦ «Планета» в формате BUFR с задержкой около полутора часов от момента измерений на борту. За одни сутки с ИСЗ MetOp-A и MetOp-B приходит по 480 BUFR-файлов, причем периодичность измерений составляет 2–3 раза в сутки (табл. 1).

Таблица 1. Количество наблюдений ДЗЗ в сутки для расчетной сетки европейской части России в % от общей площади

Число наблюдений за сутки	2012 г.	**2013 г.**	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.
0	17.78	12.7	0.98	1.65	0.62	0.43
1	48.29	34.1	10.64	17.87	9.34	6.25
2	18.2	25.78	37.8	39.99	38.09	36.96
3	5.06	14.66	32.99	25.36	34.17	37.41
4	3.44	5.5	10.35	7.9	10.56	11.73

В табл. 1 представлено количество наблюдений ДЗЗ в сутки для расчетной сетки европейской части России в % от общей площади сетки. Видно, что большинство точек сетки перекрывается данными спутников 2-3 раза в сутки, что позволяет строить полусуточные поля почвенной влаги. Над указанной территорией спутники пролетают утром, с 05:18 до 09:57, и вечером, с 15:18 до 19:54 (время UTC). Для составления композитных полусуточных цифровых массивов данные каждого витка приводились в регулярную долгото-широтную сетку.

Путем визуального анализа было выявлено, что в условиях сухой погоды величина относительной влажности почвы верхнего слоя почвы по данным ASCAT в утреннее и вечернее время несколько разниться, т.е. имеет суточный ход. Значения относительной влажности верхнего слоя почвы утром на 10-30% и более ниже, чем вечером. Причины данного явления

могут заключаться как в изменении влажности самого растительного покрова (обводнение тканей в ночные часы и увядание листьев днём), так и в наличии источника жидкой влаги (росы). Измерить содержание воды в тканях растений затруднительно, такой информацией гидрометслужба не располагает, а наблюдения за росой ведутся на станциях регулярно [3]. Таким образом, нами была предпринята попытка объяснить суточный ход влажности верхнего слоя почвы выпадением росы и построить алгоритм обнаружения сильных рос с помощью данных ДЗЗ.

Объекты и методы исследования

Для решения поставленной задачи требуется сопоставить климат росы с средними за период наличия спутниковых данных с разностями влажности верхнего слоя почвы за витки в разные периоды суток. За теплые периоды (с 1 мая по 31 сентября) 2012–2017 гг. были рассчитана средняя разность между утренними и вечерними витками по данным с прибора ASCAT. Формировались два полусуточных массива – за 00-12 и 12-24 по UTC. Для этого выбирались дни без осадков и рассчитывались средние поля относительной влажности почвы отдельно по утренним и вечерним виткам. Поле разности считалось уже между осредненными утренними и вечерними данными.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 можно выделить регионы, где разность между относительной влажностью верхнего слоя почвы существенно меняется в течение суток, и регионы, где она практически постоянна. Видно, что в большинстве районов Центрального, на юге Северо-Западного и в северной половине Приволжского федеральных округов эта разность составляет более 30% (максимум в ЦЧО – 60%). В сухих районах – Среднем и Нижнем Поволжье, Республике Калмыкия и Северо-Кавказском федеральном округе – эта разность минимальна. Интересно также, что в районах с достаточным увлажнением разность положительна, т.е. утром сигнал выше, чем вечером (утром роса не успела испариться, а вечером ещё не сконденсировалась), в то время как в засушливых районах разность отрицательна, т.е. вечером влажнее, чем утром, что, по-видимому, может быть объяснено тем, что в условиях низкой влажности воздуха парниковый эффект ниже и воздух остывает быстрее.

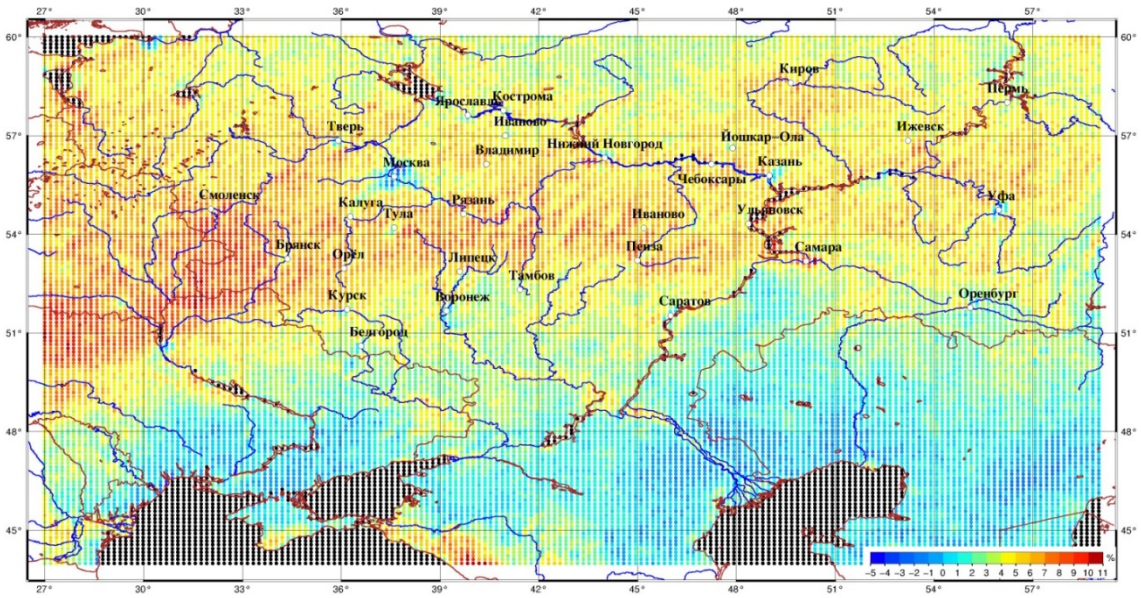


Рис. 1. Средняя разность средних значений ВП по утренним и вечерним виткам

Также нами были рассчитаны средние значения количества дней с росой на основе поступающий в ФГБУ «Гидрометцентр России» информации с сети станций Росгидромета по европейской части России за десять лет с 2009 по 2018. Всего архив включал в себя данные с 131 станции за летние месяцы (рис. 2). На рис. 2 видно, что в большинстве районов европейской территории России число дней с росой за летние месяцы варьирует от 12 до 19, причем наиболее часто это явление наблюдается в южной половине Центрального федерального округа. Также видно, что в южной половине Приволжского, в восточной половине Южного и в большинстве районов Северо-Кавказского федеральных округов росистых дней мало (например, в Калмыкии с росой был лишь 1 день в год). Такое распределение вполне объяснимо с точки зрения климата данной местности – воздух в этих районах значительно обеднен водяным паром, а значения точки росы существенно ниже минимальной за сутки температуры воздуха [5].

Сопоставляя районы «спутниковой» росы с распределением числа дней с росой по данным станций, видно, что они хорошо коррелируют. Можно утверждать, что различие в значениях относительной влажности верхнего слоя почвы объясняются повышением относительной влажности в приземном слое воздуха и дальнейшей конденсацией водяного пара на листьях растений и поверхности почвы.

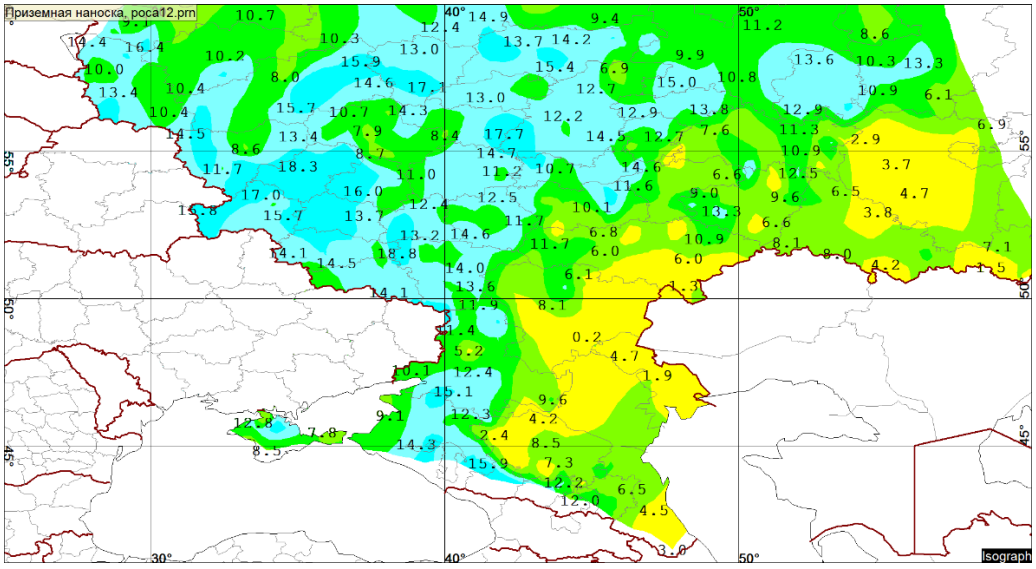


Рис. 2. Среднее за май – сентябрь число дней с росой

На основе полученных данных можно предложить следующий алгоритм дешифрирования сильных рос по данным ДЗЗ: в дни без осадков рассчитывается разность между относительной влажностью верхнего слоя почвы по данным с прибора ascat (ИСЗ серии metop) за вечерний пролёт предыдущего дня и его значением утром; если эта разность меньше 5%, то росы не наблюдается, при значениях от 10 до 29% вероятно наличие росы, если разность больше 30%, то роса сильная; в остальных случаях ситуация не ясна.

Выводы

Предложено объяснение различий в величинах обратного рассеяния импульса, испускаемого скаттерометром ASCAT и отраженного от Земли в различное время суток, показано, что сигнал зависит не только от влажности верхнего слоя почвы, но и от влаги на поверхности почвы и растительности. Разработан алгоритм выявления росы по спутниковым данным.

Список литературы

1. Быков Ф.Л., Василенко Е.В., Гордин В.А., Тарасова Л.Л. Статистическая структура поля влажности верхнего слоя почвы по данным наземных и спутниковых наблюдений. Метеорология и гидрология, 2017, №6, стр. 68-84.
2. Василенко Е. В., Тарасова Л. Л. Использование данных с прибора ascat/metop для мониторинга влажности почвы // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2015. № 2. С. 40–49.
3. РД 52.33.217-99. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 11 Агрометеорологические наблюдения на станциях и постах. Ч. 1. Основные агрометеорологические наблюдения. М.: Росгидромет. 2000. 374 с.
4. Тарасова Л. Л.**,** Василенко Е. В. Спутниковый мониторинг условий проведения полевых работ (на примере сева зерновых культур в центральных черноземных областях и уборки яровой пшеницы в Уральском и Сибирском федеральных округах) // в сборнике XIV Всероссийская открытая конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса": тезисы докладов. Москва, ИКИ РАН, 14-18 ноября 2016, ИКИ РАН Москва, с. 372
5. Климат России [под ред. Н.В. Кобышевой] – СПб.: Гидрометеоиздат, 2001. 654 с.

DETECTION OF STRONG DEW ACCORDING TO THE DATA OF REMOTE SENSING OF THE EARTH

E. V. VASILENKO[1], L. L. TARASOVA[2]
[1]SRC «Planeta», Moscow, Russia, asmus@planet.iitp.ru;
[2]Hydrometeorological Center of Russia, Moscow, Russia, hmc@mecom.ru

Abstract. Comparison of soil moisture fields from ASCAT scatterometers (MetOp satellite series) for morning and evening passes showed significant differences in the moisture content of the upper soil layer**.** The most likely reason for the presence of a daily course in the data can be considered the effect of dew. A joint analysis based on the values difference for morning and evening passes and data from weather stations have confirmed this hypothesis. Thus, we have shown that the magnitude of the backscattering of the pulse emitted by the ASCAT scatterometer and reflected from the Ground depends not only on the humidity of the upper soil layer, but also on the presence of liquid moisture on the surface of the soil and vegetation. By the difference between the value for the evening pass of the previous day and the value in the morning, it is possible to judge the intensity of dew, which makes it possible to judge the conditions for harvesting grain crops.

Keywords. Soil moisture, dew, scatterometer.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ РАЗНЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ДИАПАЗОНОВ ПРИ ОЦЕНКЕ ВЛАГООБЕСПЕЧЕННОСТИ ЗАСУШЛИВЫХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РЕГИОНОВ

Е. Л. МУЗЫЛЕВ[1], З. П. СТАРЦЕВА[1], Е. В. ВОЛКОВА[2], Е. В. ВАСИЛЕНКО[2]
[1]Институт водных проблем РАН,
Москва, 119333, Россия, E-mail: muzylev@iwp.ru, starzoya@yandex.ru;
[2]НИЦ «Планета»,
Москва, 123242, Россия, E-mail: quantocosa@bk.ru

Аннотация. Предложен метод расчета влагозапасов почвы W, суммарного испарения Ev и других элементов водного и теплового режимов территорий сельскохозяйственных регионов с разными условиями увлажнения для сезона вегетации. Основу метода составляет физико-математическая модель влаго- и теплообмена поверхности суши с атмосферой LSM (Land Surface Model), адаптированная к спутниковым данным о характеристиках подстилающей поверхности и метеорологических характеристиках. Спутниковая информация представлена данными измерений радиометров AVHRR (ИСЗ NOAA), МСУ-МР (ИСЗ Метеор-М) и SEVIRI (ИСЗ Meteosat). Исследования проводились для лесостепной территории семи областей Центрально-Черноземного региона России площадью 227300 км^2, степной Ростовской области площадью 100000 км^2 и находящейся в зоне сухой степи левобережной части Саратовской и Волгоградской областей площадью 66600 км^2 для сезонов вегетации 2017-2019 гг. Процедуры использования в модели спутниковых данных усовершенствованы и тестированы для рассматриваемых территорий. По данным измерений скаттерометра ASCAT/MetOp в СВЧ диапазоне получены оценки влажности поверхности почвы, использовавшиеся при расчетах влагозапасов с помощью LSM.

Ключевые слова. модель влаго- и теплообмена, водный и тепловой режимы, спутниковые данные, влагозапасы почвы, суммарное испарение, влажность поверхности почвы, вегетационный индекс NDVI, проективное покрытие растительностью, листовой индекс LAI, осадки, температура подстилающей поверхности.

Введение

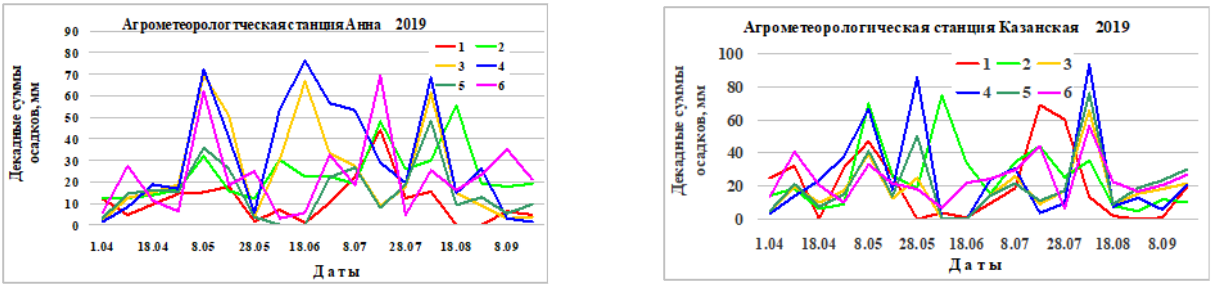
Настоящая работа посвящена усовершенствованию метода расчета запасов почвенной влаги W (как фактора влагообеспеченности), суммарного испарения Ev, вертикальных потоков тепла, температуры и влажности почвы и других элементов водного и теплового режимов (ВТР) территорий сельскохозяйственных регионов с разным характером увлажнения для сезона вегетации. Исследования проводились для территорий Курской, Белгородской, Орловской, Воронежской, Липецкой, Тамбовской и Брянской областей площадью 227300 км^2, находящихся в лесостепной зоне и являющихся частью Центрально-Черноземного региона (ЦЧР), степной черноземной Ростовской области площадью 100000 км^2 и находящегося в зоне сухой степи Саратовского и Волгоградского Заволжья (левобережной части Саратовской и Волгоградской областей) площадью 66600 км^2 для сезонов вегетации 2017-2019 гг. В основу метода (Muzylev et al., 2020) положена разработанная в ИВП РАН физико-математическая модель вертикального влаго- и теплообмена подстилающей поверхности (ПП) с атмосферой LSM (Land Surface Model) (Kuchment, Startseva, 1991; Музылев и др., 2002), пригодная для использования в ней в качестве параметров и входных переменных спутниковых оценок характеристик растительности (вегетационного индекса NDVI, проективного покрытия B, листового индекса LAI и других) и метеорологических характеристик (осадков, температуры ПП) (Музылев и др., 2017). Все эти оценки были получены при обработке результатов измерений радиометров AVHRR/NOAA, SEVIRI/Meteosat-10, -11, -8 и МСУ-МР/Метеор-М № 2 в видимом и ИК диапазонах спектра. Использование в модели данных оценок производилось с помощью специально разработанных процедур, причем задание параметров модели при расчетах элементов ВТР исследуемых территорий (с разными климатическими условиями и характером увлажнения) осуществлялось с учетом анализа динамики названных оценок для каждого сезона вегетации. Величины W

рассчитывались также с привлечением оценок влажности поверхности почвы, построенных по результатам измерений скаттерометра ASCAT/MetOp в СВЧ диапазоне.

Краткое описание модели и методов оценки характеристик растительности и метеорологических характеристик по спутниковым данным

LSM предназначена для расчета характеристик ВТР исследуемой территории – влагозапасов почвы W, суммарного испарения Ev (испарения с голой почвы и транспирации растительности), вертикальных потоков тепла, а также температуры поверхностей почвы и растительного покрова, радиационной температуры подстилающей поверхности (ТПП), распределений влажности и температуры почвы по глубине при учете пространственной изменчивости всех названных величин (Музылев и др., 2002, 2017). Основу модели составляют уравнения влагопереноса и теплопроводности для деятельного слоя почвы с граничными условиями в виде потоков влаги и тепла на верхней и нижней границах этого слоя. Испарение с поверхности почвы и транспирация определяются с помощью полуэмпирических зависимостей от влажности воздуха и температур. Параметрами модели являются характеристики почв, определявшиеся с использованием информации из базы данных HWSD (Harmonized World Soil Database), и растительности, оценивавшиеся по данным наземных наблюдений, а проективное покрытие растительностью B и листовой индекс LAI – еще и по спутниковым данным. Входными переменными модели являются данные стандартных срочных метеорологических наблюдений. Осадки и ТПП оценивались также по информации с ИСЗ.

По данным AVHRR, SEVIRI и МСУ-МР строились оценки нормализованного индекса вегетации NDVI, излучательной способности ПП E, B, LAI, температуры поверхностей почвы T_{sg} и растительного покрова T_a, эффективной ТПП $T_{s.eff}$, а также облачности и осадков. Количества осадков, значения температуры подстилающей поверхности, LAI и B были рассчитаны при тематической обработке данных измерений всех радиометров с использованием, разработанных в НИЦ «Планета» методов и технологий построения таких оценок. Расчеты суточных, декадных и месячных сумм осадков для каждого пиксела производились с помощью комплексной пороговой методики (КПМ) детектирования облачности и идентификации ее типов, а также выделения зон осадков и определения их максимальной интенсивности (Волкова, 2013, 2014, 2017). В основу методики положена реализация перехода от оценки интенсивности осадков к оценке их суточных сумм. Вероятность детектирования по спутниковым данным зон осадков, соответствовавших фактическим, при сопоставлении с данными наблюдений на станциях составила ~ 80% (и выше) для всех сенсоров. Пример сравнения декадных сумм осадков за сезон вегетации 2019 г. для агрометеорологических станций ЦЧР и Ростовской области представлен на рис.1 а, б. На основе КПМ был разработан вычислительный алгоритм оценки ТПП (T_{sg}, T_a, $T_{s.eff}$) (Волкова, Успенский, 2016). Сравнение измеренных значений ТПП с определенными по данным всех радиометров выявило их небольшие расхождения для подавляющего числа сроков наблюдений, кроме случаев значительного локального перегрева поверхности почвы во второй половине дня в жаркие летние месяцы и, как следствие, превышения наземных оценок над спутниковыми. Значения NDVI рассчитывались при использовании стандартных зависимостей от альбедо, а значения LAI и B - при использовании эмпирических зависимостей от NDVI.

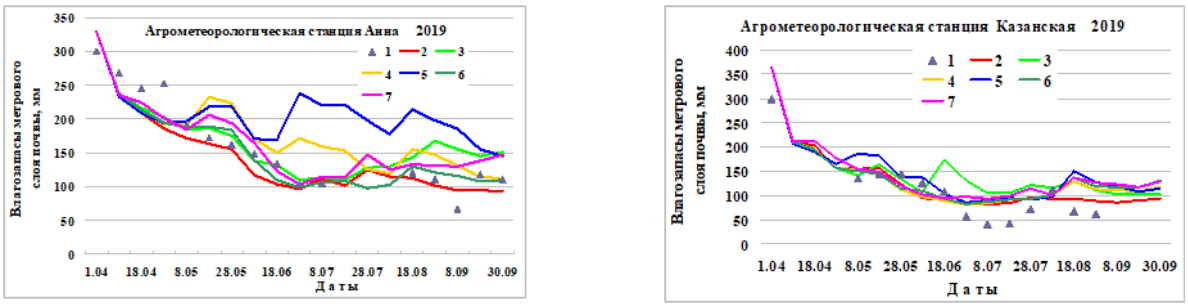


а б

Рис.1. Суммы осадков за декаду: измеренные на агрометеорологической станции (1) и определенные с использованием данных радиометров AVHRR/NOAA (2), SEVIRI/Meteosat (3-5) и МСУ-МР/Метеор-М № 2. (3, ИСЗ находится в точке 0° с.ш. 0° в.д.. 4) данные SEVIRI/Meteosat из NCEP (National Center for Environmental Prediction (USA)); 5) ИСЗ находится в точке 0° с.ш. 41.5° в.д.) Агрометеорологические станции Анна (Воронежская обл.) (а) и Казанская (Ростовская обл.) (б). Сезон вегетации 2019 г.

Результаты и обсуждение

Процедуры использования в LSM оценок LAI, B, осадков и ТПП, построенных по данным всех сенсоров**,** включали замену значений LAI и B, определенных по наземным данным, на их спутниковые оценки, и ввод в модель оценок ТПП и осадков за сутки и по срокам по данным ИСЗ, вместо результатов их наземных измерений. При отсутствии спутниковых оценок ТПП и осадков для отдельных узлов вычислительной сетки модели значения этих величин, а также влажности воздуха определялись путем интерполяции данных стандартных сетевых метеорологических наблюдений. Корректность произведенных замен была подтверждена результатами сопоставления временных ходов за сезон вегетации спутниковых и наземных оценок LAI и ТПП и, главное, являющихся искомыми значений W и Ev, измеренных и рассчитанных по модели при всех возможных вариантах спутниковой оценки LAI, B, ТПП и осадков. Погрешности оценки W и Ev для подавляющего числа сроков измерений названных сезонов вегетации составили 10-15 и 20-25%, что соответствует общепринятой величине ошибки определения значений этих величин (рис. 2 а, б) (Muzylev et al., 2020).



а б

Рис. 2. Влагозапасы метрового слоя почвы: измеренные (1) и рассчитанные с помощью модели при оценке осадков по данным наземных наблюдений (2), радиометров AVHRR/NOAA (3), SEVIRI/ Meteosat (4-6) и МСУ-МР/Метеор-М № 2. (7) (4) ИСЗ находится в точке 0° с.ш. 0° в.д.. 5) данные SEVIRI/Meteosat из NCEP (National Center for Enviromental Prediction (USA)); 6) ИСЗ находится в точке 0° с.ш. 41.5° в.д.) Агрометеорологические станции Анна (Воронежская обл.) (а) и Казанская (Ростовская обл.) (б). Сезон вегетации 2019 г.

Построенные для исследуемых территорий поля рассчитанных значений W и Ev, потоков скрытого и явного тепла, ТПП трех типов, а также распределения температуры и влажности почвы по глубине являются конечными результатами моделирования. Анализ полей разностей значений W, рассчитанных при использовании спутниковых и наземных оценок осадков, показывает, что погрешности представленных оценок W находятся в указанных выше пределах (рис. 3).

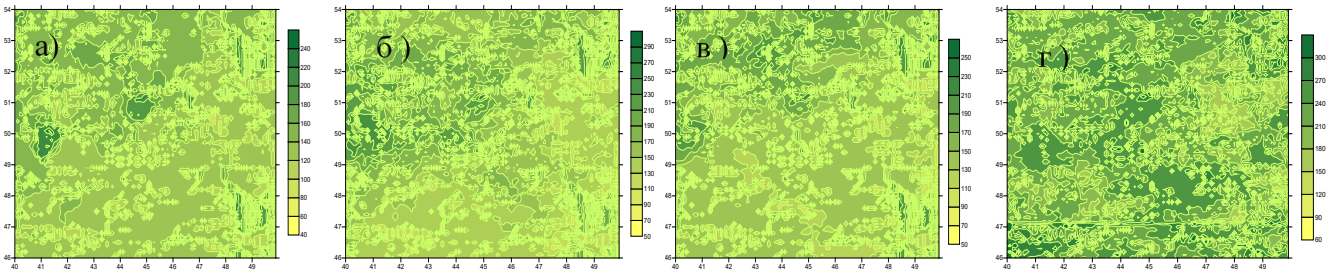


Рис. 3. Распределение по территории южных областей России значений влагозапасов почвы W, мм, рассчитанных по модели при оценках суточных сумм осадков по данным наземных измерений (а), SEVIRI/Meteosat (б), МСУ-МР/Метеор-М № 2 (в) и AVHRR/NOAA (г) на 19 августа 2018 г

В работе по данным измерений скаттерометра ASCAT/MetOp в СВЧ диапазоне были также получены оценки влажности поверхности почвы (ВПП). Результаты таких измерений, выраженные в процентах от 0 до 100, представляются в виде суточных композитов распределения ВПП (в %) по площади исследуемого участка. Значения влажности верхнего слоя почвы (0-3 см) в объёмных единицах (см^3/см^3) получаются при умножении ВПП на значения пористости. Эти оценки сравниваются с результатами моделирования ВПП при использовании данных наземных наблюдений, при задании начального профиля влажности почвы с привлечением данных ASCAT; при оценке испарения с почвы с использованием данных ASCAT на каждом временном шаге (рис. 4). И для метеостанций, и для большей части узлов вычислительной сетки различия спутниковых и модельных оценок ВПП находились в допустимых пределах (± 0.05-0.15 см^3/см^3) (рис. 5), что позволило использовать данные ASCAT в модели при расчетах влагозапасов почвы W (рис. 6). Сравнение распределений по площади исследуемых регионов этих значений, рассчитанных по модели по данным наземных измерений и при задании начального профиля влажности почвы по данным ASCAT, показало, что расхождения полученных значений W лежат в допустимых пределах (Muzylev et al., 2020) (рис. 7).

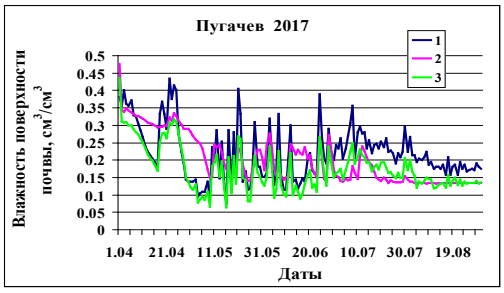


Рис. 4. Влажность поверхности почвы, определенная по данным ASCAT (1), рассчитанная с помощью модели по наземным данным (2) и при оценке испарения с почвы с использованием данных ASCAT (3). Агрометеорологическая станция Пугачев (Заволжье). Сезон вегетации 2017 г.

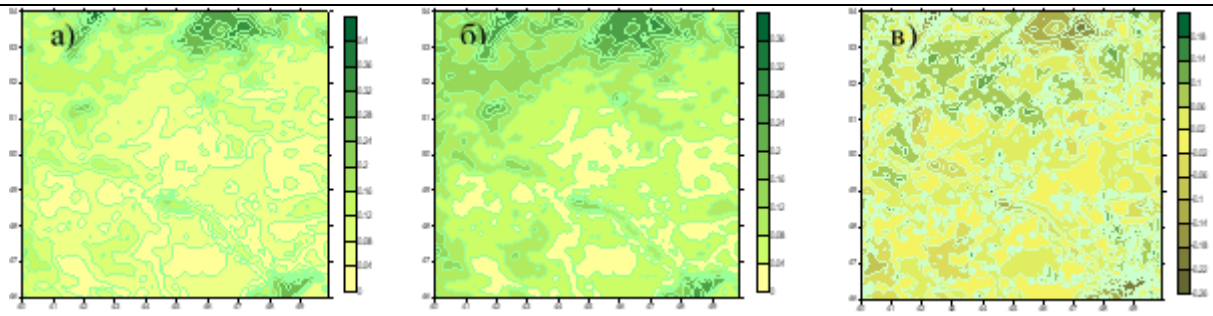


Рис. 5. Влажность поверхностного (0-3 см) слоя почвы (см^3/см^3), определенная по данным ASCAT (а), рассчитанная по модели при использовании данных наземных наблюдений (б), и их разности (в) для территории южных областей России на 19 июня 2018 г.

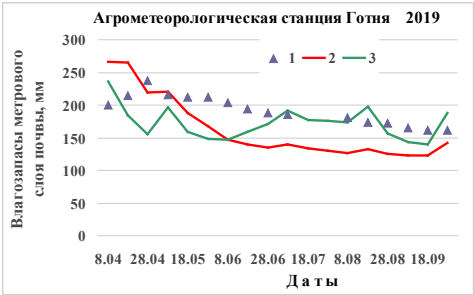


Рис. 6. Запасы почвенной влаги для агрометеорологической станции Готня (ЦЧР) для сезона вегетации 2019 г., измеренные (1) и рассчитанные с помощью модели: по наземным данным (2) и при оценке испарения с почвы с использованием данных ASCAT (3)

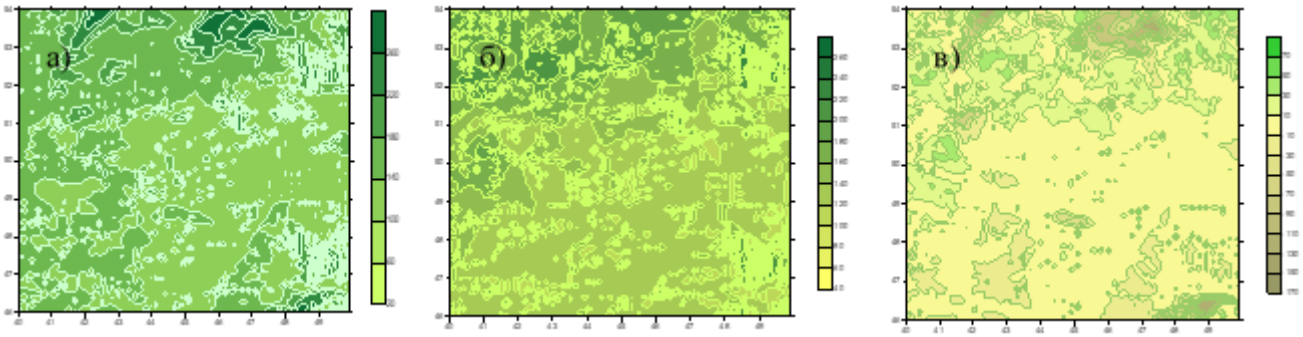


Рис. 7. Распределение влагозапасов метрового слоя почвы по территории южных областей России на 19 июня 2018 г., рассчитанных по модели: при использовании оценок влажности поверхности почвы по данным ASCAT (а), по данным наземных измерений (б) и их разности (в)

Выводы

Основным результатом работы следует считать описанный метод оценки влагозапасов почвы, суммарного испарения и других характеристик ВТР в их динамике в течение сезона вегетации для территорий обширных сельскохозяйственных регионов с разными условиями увлажнения. Метод, основанный на использовании физико-математической модели влаго- и теплообмена поверхности суши с атмосферой, включает также разработанные технологии построения оценок характеристик растительности, метеорологических характеристик и влажности ПП по данным измерений с метеорологических ИСЗ в видимом, ИК и СВЧ диапазонах. Эффективность использования данного метода подтверждена результатами сравнения результатов моделирования, а также полученных спутниковых оценок с данными наземных наблюдений.

Благодарности

Работа выполнена в рамках Государственной Программы №. АААА-А18-118022090056-0 (№ 0147-2018-0001) и при поддержке РФФИ – грант № 19-29-05261 мк “Картографическое моделирование влагозапасов почвенного покрова на основе комплексной геофизической влагометрии для целей цифрового орошаемого земледелия”.

Список литературы / References

1. Волкова Е.В. Оценки параметров облачного покрова, осадков и опасных явлений погоды по данным радиометра AVHRR с МИСЗ серии NOAA круглосуточно в автоматическом режиме // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 3. С. 66–74.
2. Волкова Е.В. Определение сумм осадков по данным радиометров SEVIRI/Meteosat-9,10 и AVHRR/NOAA для Европейской территории России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т.11. № 4. С. 163-177.
3. Волкова Е.В. Оценки параметров облачного покрова и осадков по данным радиометра МСУ-МР полярно-орбитального метеоспутника «Метеор-М» № 2 для Европейской территории проблемы России // Современные дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 5. С.300-320. DOI: 10.21046/2040-7401-2017-14-5-300-320
4. Волкова Е.В., Успенский С.А. Дистанционное определение температуры подстилающей поверхности, приземной температуры воздуха и эффективной температуры по спутниковым данным для юга Европейской территории России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т.13. № 5. С. 291-303. DOI: 10.21046/2040-7401-2016-13-5-291-303
5. Музылев Е.Л., Старцева З.П., Успенский А.Б., Волкова Е.В., Василенко Е.В., Кухарский А.В., Зейлигер А.М., Ермолаева О.С. Использование данных дистанционного зондирования при моделировании водного и теплового режимов сельских территорий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14(6). С. 108-136. DOI: 10.21046/2040-7401-2017-14-6-108-136
6. Музылев Е.Л., Успенский А.Б., Старцева З.П., Волкова Е.В. Моделирование гидрологического цикла речных водосборов с использованием синхронной спутниковой информации высокого разрешения // Метеорология и гидрология. 2002. № 5. С. 68-82.
7. Kuchment L.S., Startseva Z.P. Sensitivity of evapotranspiration and soil moisture in wheat fields to changes in climate and direct effects of carbon dioxide // Hydrological Sciences Journal. 1991. Vol. 36(6). P. 631-643.
8. Muzylev E.L., Startseva Z.P., Volkova E.V., Vasilenko E.V. Utilizing satellite data of several spectral ranges for modeling the processes of water and heat regime formation of vast territories // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2020. Vol. 17(6). P. 129–136 (Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т.17. Вып. 6. С. 129-136). DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-6-129-136

USING SATELLITE DATA OF DIFFERENT SPECTRAL RANGES TO ASSESS WATER AVAILABILITY OF ARID AGRICULTURAL REGIONS

E. L. MUZYLEV[1], Z. P. STARTSEVA[1], E. V. VOLKOVA[2], E. V. VASILENKO[2]
[1]*Water Problem Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, muzylev@iwp.ru;*
[2]*Scientific Research Centre "Planet", Moscow, Russia, quantocosa@bk.ru*

Abstract. A method is proposed to calculate soil water content W, evapotranspiration Ev, and other water and heat regime elements of agricultural regions with different moistening conditions for vegetation season. The method is based on the physical-mathematical model of water and heat exchange between land surface and atmosphere LSM (Land Surface Model) adapted to satellite data on the land surface and meteorological characteristics. Satellite information is presented by the measurement data from radiometers AVHRR/NOAA, MSU-MR/Meteor-M, and SEVIRI/Meteosat. The studies were carried out for the forest-steppe territory of seven administrative areas of the Central Black Earth Region of 227,300 km^2, the steppe Rostov region of 100,000 km^2 and the left-bank part of the Saratov and Volgograd regions located in the dry steppe zone of 66,600 km^2 for vegetation seasons of 2017-2019. The procedures to assimilate satellite data in the model were improved and tested for the areas under consideration. Soil surface moisture estimates were retrieved from scatterometer ASCAT/MetOp measurements and then they were utilized to calculate soil water content using the LSM.

Keywords. Model of water and heat exchange, water and heat regimes, satellite data, soil water content, evapotranspiration, soil surface moisture, vegetation index NDVI, vegetation cover fraction, leaf index LAI, precipitation, land surface temperature

ОЦЕНКА УРОЖАЙНОСТИ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ НАЗЕМНЫХ И СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ОТДЕЛЬНЫХ РАЙОНОВ СЕВЕРО-КАВКАЗСКОГО И ПРИВОЛЖСКОГО УГМС

А. Д. КЛЕЩЕНКО, О. В. САВИЦКАЯ
ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной метеорологии» (ФГБУ ВНИИСХМ),
Обнинск, cxm-dir@obninsk.ru.

Аннотация. Представлены результаты применения корреляционно-регрессионного анализа и метода главных компонент для оценки ожидаемой урожайности озимой пшеницы по спутниковой и наземной метеорологической информации для районов Северо-Кавказского и Приволжского УГМС. Были построены регрессионные модели зависимости средней районной урожайности озимой пшеницы от спутниковых и метеорологических параметров. Проведен сравнительный анализ точности расчетов, полученных при использовании регрессии, построенной на исходных данных и регрессии главных компонент.

Ключевые слова. NDVI, VCI, LAI, урожайность, метеорологическая информация, регрессия на главные компоненты

Введение

В настоящее время в оперативной практике обслуживания зернового хозяйства России практически не существует методов прогноза урожайности по отдельным муниципальным районам. Из-за редкой сети гидрометеорологических станций такую задачу достаточно сложно решить на основе только наземной информации. В большинстве случаев число муниципальных районов существенно превышает количество станций в субъекте. Спутниковая информация позволяет получать данные по любой необходимой территории, а ее применение в сочетании с наземными метеорологическими параметрами позволяет разработать методы оценки ожидаемой урожайности на районном уровне. В последние годы в ФГБУ «ВНИИСХМ» ведутся исследования использования спутниковой информации для оценки ожидаемой средней районной урожайности (Клещенко и др., 2014; Клещенко и др., 2020).

Объекты и методы исследования

В ФГБУ «ВНИИСХМ» разработаны методы оценки средней районной урожайности озимой пшеницы на основе комплексного использования наземных и спутниковых данных (Клещенко и др., 2014; Клещенко и др., 2020). В исследовании были использованы спутниковые индексы NDVI, VCI и спутниковый информационный продукт LAI. Эти индексы получены на основе информации со спектра радиометра Modis и доступны с еженедельной частотой на сервисе ВЕГА-PRO, разработанном Институтом космических исследований РАН. Вегетационный индекс NDVI нашел применение для оценки состояния и продуктивности посевов сельскохозяйственных культур (Клещенко и др., 2014; Страшная и др., 2015) и NDVI представляет собой частное от деления разности между коэффициентом отражения в красном и ближнем инфракрасном участках спектра к их сумме.

Индекс условий вегетации VCI одним из первых предложил F.Kogan (Kogan, 1990). VCI это процентное отношение значений NDVI за время j по отношению к максимальной амплитуде изменений значений NDVI за рассматриваемый период времени:

$$VCI_j = \frac{NDVI_j - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} * 100\%, \quad (1)$$

где VCI_j – значение индекса условий роста растительности для даты j; $NDVI_j$ – значение NDVI для даты j; $NDVI_{max}$ – значения максимальных NDVI внутри всего набора данных; $NDVI_{min}$ – значение минимальных NDVI внутри всего набора данных.

Индекс VCI оказался востребованным как для оценки состояния растительности, так и для мониторинга засух.

ИКИ РАН разработало новый информационный продукт LAI, характеризующий площадь листовой поверхности растительного покрова. Вычисление ежедневных значений LAI основано на данных измерений коэффициента спектральной яркости (КСЯ) в красном и ближнем ИК каналах MODIS, имеющих пространственное разрешение 250 м, с использованием результатов моделирования переноса фотонов в растительном покрове (Шабанов и др., 2018). Полученные значения LAI используются для построения очищенных от влияния облаков композитных изображений и реконструкции на их основе временных рядов индекса.

Наземная метеорологическая информация получена по данным наблюдений на гидрометеорологических станциях Росгидромета. В качестве наземных данных использовались: средняя декадная температура воздуха, средняя температура воздуха за 3 декады, сумма осадков за декаду, сумма осадков за 3 декады, средний за декаду дефицит влажности воздуха, средний дефицит влажности воздуха за 3 декады. Исследования проводились для районов отдельных субъектов Северо-Кавказского и Приволжского управлений Росгидромета. В качестве методов исследования использовались метод обратных взвешенных квадратов расстояний, корреляционно-регрессионный анализ и метод главных компонент.

Метод обратных взвешенных квадратов расстояний применялся с целью получения метеорологической информации для районов, в которых отсутствовали станции.

Корреляционно-регрессионный анализ использовался для построения регрессионных моделей зависимости средней районной урожайности озимой пшеницы от спутниковых и метеорологических параметров.

Метод главных компонент применялся совместно с регрессионным анализом и позволил решить проблему мультиколлинеарности (взаимозависимости) используемых переменных.

Результаты и обсуждение

Исследования проведены для некоторых субъектов Северо-Кавказского (Краснодарский и Ставропольский края, Волгоградская и Ростовская области) и Приволжского УГМС (Ульяновская, Пензенская, Саратовская, Самарская и Оренбургская области). Для расчетов использовались данные с 2012 по 2017 год. Для увеличения длины выборки и учета агроклиматической зональности районы объединялись в группы. Дифференциация территории субъектов на зоны осуществлялась на основе агроклиматического районирования территории, разработанного Д.И. Шашко (Шашко, 1967). Поскольку исходные статистические ряды для каждого района имеют разную вариабельность и разное среднее, предварительно осуществлялась процедуры центрирования и нормирования данных. Выбор продолжительности анализируемого период зависел от хода развития озимой пшеницы в каждом регионе. Для субъектов Северо-Кавказского УГМС, исследования проводились для периода с первой декады мая по первую декаду июня, для районов в субъектах Приволжского УГМС рассматривался период со второй декады мая по вторую декаду июня.

На первом этапе для выбора наиболее информативных параметров для построения ежедекадных регрессионных моделей рассчитывались коэффициенты корреляции между спутниковой, метеорологической информацией и средней районной урожайностью озимой пшеницы. Для примера в таблице 1 показаны коэффициенты корреляции, характеризующие тесноту связей урожайности озимой пшеницы с метеорологическими и спутниковыми данными для групп районов Ставропольского края.

Таблица 1. Коэффициенты корреляции между метеорологической информацией и средней районной урожайностью озимой пшеницы для выделенных групп районов Ставропольского края

Группа	Длина ряда	Месяц	Декада	Метеорологическая информация							Спутниковая информация		
				T	P	D	T3	P3	D3	GTK	NDVI	VCI	LAI
1	96	май	1	-0,82	0,69	-0,86	-0,78	0,53	-0,90	0,60	0,64	0,65	0,64
		май	2	-0,67	0,54	-0,79	-0,88	0,65	-0,95	0,69	0,81	0,81	0,82
		май	3	-0,43	0,17	-0,20	-0,80	0,63	-0,87	0,66	0,80	0,83	0,81
		июнь	1	-0,41	-0,11	-0,11	-0,64	0,28	-0,51	0,35	0,76	0,81	0,76
2	30	май	1	-0,61	0,45	-0,63	-0,62	0,50	-0,75	0,51	0,68	0,69	0,73
		май	2	-0,61	0,42	-0,70	-0,78	0,58	-0,85	0,63	0,82	0,83	0,86
		май	3	-0,36	0,03	-0,19	-0,76	0,49	-0,79	0,63	0,73	0,70	0,71
		июнь	1	-0,39	-0,11	-0,15	-0,63	0,19	-0,40	0,37	0,54	0,47	0,57
3	30	май	1	-0,72	0,57	-0,66	-0,89	0,25	-0,79	0,35	0,66	0,69	0,57
		май	2	-0,66	0,35	-0,65	-0,91	0,38	-0,77	0,45	0,88	0,88	0,88
		май	3	-0,29	0,16	0,12	-0,75	0,51	-0,55	0,53	0,86	0,87	0,87
		июнь	1	-0,20	-0,46	0,19	-0,56	-0,06	-0,12	0,07	0,71	0,72	0,74

Примечание – NDVI – среднее за декаду значение вегетационного индекса; VCI – среднее за декаду значение индекса условий роста растительности; LAI – среднее за декаду значение листового индекса; T – средняя декадная температура воздуха; T3 – средняя температура воздуха за 3 декады; P – сумма осадков за декаду; P3 – сумма осадков за 3 декады; D – средний за декаду дефицит влажности воздуха; D3 – средний дефицит влажности воздуха за 3 декады; GTK – значение ГТК за месяц.

Из таблицы 1 видно, что из метеорологических параметров наиболее высокие отрицательные коэффициенты корреляции отмечаются с дефицитом влажности воздуха и температурой воздуха, что связано с недостаточной влагообеспеченностью и частой засушливостью этих территорий. Наблюдаются тесные связи между урожайностью озимой пшеницы и спутниковыми индексами. Стоит отметить, что наблюдается высокая корреляция как между спутниковыми индексами (NDVI, LAI, VCI), так и метеорологическими параметрами. Однако в силу взаимозависимости этих параметров, от некоторых из них при построении регрессионных моделей пришлось отказаться и использовать только те параметры, которые оказывают наиболее существенное влияние на урожайность озимой пшеницы. Были построены регрессионные модели для всех исследуемых групп районов. По разработанным регрессионным моделям была рассчитана ожидаемая урожайность озимой пшеницы. В 2020 г. были проведены первые производственные испытания разработанного метода (таблица 2).

Таблица 2. Сравнение фактической и рассчитанной урожайности озимой пшеницы по уравнениям регрессии за 2020 год для районов Ростовской и Волгоградской областей

Область	Относительная ошибка, %			
	1 декада мая	2 декада мая	3 декада мая	1 декада июня
Волгоградская	9,6	11,5	12,1	12,5
Ростовская	8,1	7,9	9,5	9,5

Как видно из таблицы 2, наблюдается достаточно хорошая сходимость расчетов. Однако, ошибку расчетов можно было бы уменьшить, если расширить список входных параметров, имеющих достаточно высокую корреляцию с урожайностью. Как было сказано ранее, регрессионный подход не позволяет использовать весь список переменных из-за линейной зависимости между ними. При мультиколлинеарности оценки параметров регрессии не всегда надёжные. Для решения этой проблемы применялся метод главных компонент, который успешно используется

в гидрометеорологических исследованиях (Мещерская и др., 1970; Русакова и др., 2006; Сиротенко, 2012]. При использовании данного метода осуществляется замена сильно коррелированных переменных совокупностью новых переменных (компонент), между которыми корреляция отсутствует. Для дальнейшего анализа используются только те компоненты, которые объясняют дисперсию хотя бы одной исходной переменной. У таких компонент собственные значения (λ) превышают единицу.

Нами проведены исследования по использованию метода главных компонент для оценки ожидаемой средней районной урожайности озимой пшеницы. В результате исследований было выявлено, что первые две компоненты в основном объясняют более 90% общей дисперсии исходных переменных, т. е. практически полностью учитывают разброс зависимости урожайности от рассматриваемых переменных. При этом 1-я компонента, как правило, связана со спутниковыми индексами, а 2-я компонента – с метеорологическими параметрами. В основном первые две компоненты выступают предиктантами при построении регрессионных моделей имеющих следующий вид:

$$Y = a + b\cdot C1 + d\cdot C2, \quad (2)$$

где Y – урожайность озимой пшеницы; a – свободный член уравнения регрессии; b, d – коэффициенты уравнения регрессии; C1 – компонента 1; C2 – компонента 2.

В результате расчётов был получен набор регрессионных моделей зависимости урожайности озимой пшеницы от главных компонент, использующих спутниковые индексы и метеорологические параметры совместно. Сравнительный анализ результатов расчетов, показал преимущества регрессии, построенной на основе метода главных компонент по сравнению с регрессией, построенной на исходных показателях. Средняя величина относительной ошибки в первом случае составила 8,6%, а во втором 7,5%.

Выводы

Были разработаны регрессионные модели зависимости районной урожайности озимой пшеницы на основе использования метода корреляционно-регрессионного анализа и метода главных компонент. При достаточно хорошей сходимости рассчитанных значений урожайности по сравнению с фактическими для обоих методов, лучшие результаты получены при использовании метода главных компонент.

Список литературы / References

1. Клещенко А. Д., Савицкая О. В. Оценка пространственно-временного распределения урожайности зерновых культур и стандартизованного индекса осадков (SPI) по спутниковой и наземной информации // Труды ГГО. 2014. Вып. 571. С. 147–161.
2. Клещенко А.Д., Савицкая О.В., Косякин С. А. Оценка средней районной урожайности озимой пшеницы по спутниковой и наземной метеорологической информации // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 3. С. 103–121.
3. Мещерская А. В., Руховец Л. В., Юдин М. И., Яковлева Н. И. Естественные составляющие метеорологических полей. Л.: Гидрометеоиздат. 1970. 199 с.
4. Русакова Т. И., Лебедева В. М., Грингоф И. Г., Шкляева Н. М. Современная технология поэтапного прогнозирования урожайности и валового сбора зерновых культур // Метеорология и гидрология. 2006. № 7. С. 101–108.
5. Сиротенко О. Д. Основы сельскохозяйственной метеорологии. Обнинск. 2012. Т. 2. 135 с.
6. Страшная А. И., Тарасова Л. Л., Богомолова Н. А., Максименкова Т. А., Береза О. В. Прогнозирование урожайности зерновых и зернобобовых культур в центральных черноземных

областях на основе комплексирования наземных и спутниковых данных // Труды Гидрометцентра России. 2015. Вып. 353. С. 128–153.
7. Шабанов Н. В., Барталев С. А., Ерошенко Ф. В., Плотников Д. Е. Развитие возможностей дистанционной оценки индекса листовой поверхности по данным MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 166–178.
8. Шашко Д. И. Агроклиматическое районирование СССР. М.: Колос. 1967. 336 с.
9. Kogan F. N. Remote sensing of weather impact on vegetation in non-homogeneous areas // International Journal of Remote Sensing. 1990. 11. No 8. P. 1405–1419.

ESTIMATION OF WINTER WHEAT YIELD BASED ON THE INTEGRATION OF GROUND AND SATELLITE DATA FOR SOME REGIONS OF THE SOUTH OF RUSSIA

A. D. KLESCHENKO, O. V. SAVITSKAYA
National Research Institute on Agricultural Meteorology, Obninsk, Russia, cxm-dir@obninsk.ru.

Abstract. The results of applying correlation-regression analysis and the principal components method to estimate the expected winter wheat yield using satellite and ground meteorological information for the regions of the North Caucasus and Volga UGMS are presented. Regression models of the dependence of the average district yield of winter wheat on satellite and meteorological parameters were built. A comparative analysis of the accuracy of the calculations obtained using the regression based on the initial data and the regression of the principal components is carried out.

Keywords. NDVI, VCI, LAI, yield, meteorological information, principal component regression.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОДУКТИВНОСТЬЮ ПШЕНИЦЫ В УСЛОВИЯХ АРИДНОЙ ЗОНЫ (НА ПРИМЕРЕ СЕВЕРНОГО КАЗАХСТАНА)

А. А. КОМАРОВ[1], Б. Р. ИРМУЛАТОВ[2]., В. В. ЯКУШЕВ[1], А. Д. КИРСАНОВ[1], Ю. Г. ЗАХАРЯН[1]
[1] ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт» (ФГБНУ АФИ), Санкт-Петербург, Zelenydar@mail.ru;
[2]ТОО НПЦ Зернового хозяйства им. А.И. Бараева. Казахстан, e-mail: irmulatov61@mail.ru

Аннотация. На основании дистанционного зондирования Земли и сопряженных наземных исследований представлены результаты дифференцированного внесения удобрений в условиях Северного Казахстана. Исследования проводились в 2018-2020 гг. на полигоне точного земледелия, где проводилась детальная оценка неоднородности состояния почвенного покрова по основным агрохимическим показателям. Детализацию оценки плодородия почв осуществляли по схемам (сеткам обследования) с размерами элементарных участков 1, 5 и 25 га. Удобрения вносились по картам-заданиям дифференцированно припосевным и поверхностным способами. При этом, было впервые установлено, что только одна агрохимическая неоднородность поля частично нивелировалась дифференцированным внесением элементов питания. Показано, что в условиях аридного климата Северного Казахстана определяющее влияние на продуктивность яровой пшеницы оказывают агроландшафтные условия, которые характеризуются уклоном местности, распределением водотоков, обеспечивающими лучший запас продуктивной влаги вниз по склону.

Ключевые слова. Северный Казахстан, пшеница, точное земледелие, дистанционное зондирование Земли, вегетационный индекс NDVI, дифференцированное внесение удобрений.

Введение

Земледелие Казахстана в настоящее время характеризуется неустойчивой урожайностью, где разрыв между максимальными и минимальными показателями достигает до 10 раз. Одна из главных задач земледелия на севере Казахстана — это реализация потенциала продуктивности пахотных почв на уровне 20-40 ц/га зерна (Малицкая и др., 2020). Однако для достижения поставленной задачи необходимо разрабатывать новые системы ведения земледелия, предусматривающие снижение затрат на производство единицы продукции (Авров, 2014). За последние 30 лет отечественными селекционерами выведено и районировано более 120 сортов зерновых культур с потенциальной продуктивностью 5.0–7.0 т/га, но их фактическая урожайность не превышает 2.5 т/га (Ларионов, 2004). Причина в том, что генетический потенциал растений используется всего на 25–30%, а также в отсутствии современных сортовых технологий (Малицкая и др., 2020). Одним из перспективных направлений для Казахстана является **точное земледелие***,* однако внедрение ТЗ в Казахстане требует адаптации к специфическим условиям аридного климата. При этом, для дифференцированного внесения удобрений в условиях Северного Казахстана весьма актуальным является использование оперативных и информативных данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

Объекты и методы исследования

Исследования проводились в условиях северного Казахстана с 2018 по 2020 гг. на землепользовании ТОО «НПЦЗХ им. А.И. Бараева», где был организован опытный полигон на площади 3000 га. На полигоне были развернуты прецизионные исследования с использованием наземного обследования и данных дистанционного зондирования Земли (Абдуллаев и др., 2019; Ирмулатов и др., 2019).

Основным объектом исследования являлись высокопродуктивные сорта яровой пшеницы. Спутниковый мониторинг осуществлялся с использованием LandViewer (https://eos.com) с использованием спутников группы Sentinel 2. Кроме космической съемки использовались БПЛА. Все поля располагались в пределах одной почвенной разности на темно-каштановых почвах (Ирмулулатов и др., 2021). Поле №35, где формировалась 5 гектарная сетка агрохимического обследования, было засеяно сортами яровой пшеницы разных групп спелости «Астана» и «Шортандинская 95» (рис. 1).

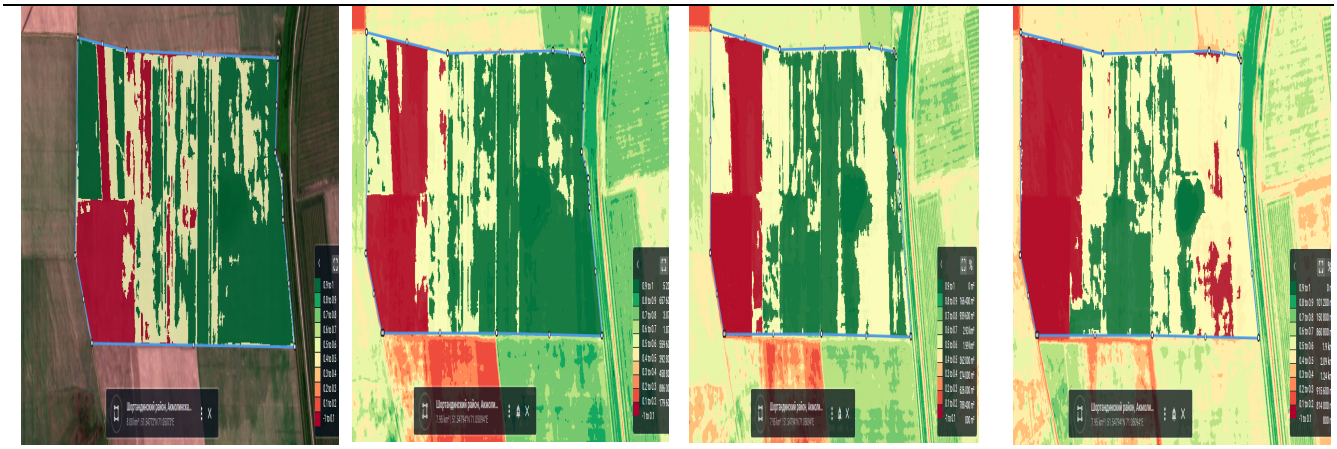
Рис. 1. Поля с разной сеткой отбора: 1) А- 5 га; Б- 1 га; С - 25 га; 2) NDVI снимок полей №34-35 на 29.06.2019.

Таким образом, была сформирована сеть из 159 элементарных участков, каждый площадью 1 га. Кроме того, была сформирована сеть полигонов по 5 га, по 10 га и по 25 га (Ирмулатов и др., 2021). Основные удобрения вносили припосевным и поверхностным способами. Уборка урожая осуществлялась в системе картирования урожайности (Иванченко, Султанов, 2020), с получением детализированных карт урожайности (Ирмулатов и др., 2021).

Результаты и обсуждение

Результаты внедрения системы точного земледелия, впервые реализованные в условиях северного Казахстана, были связаны с использованием сопряженных наземных данных и ДЗЗ (Абдуллаев и др., 2019; Ирмулатов и др., 2019). Отличительной особенностью проводимых исследований являлся их прецизионный характер, который позволил по-новому оценить состояние полей с помощью ДЗЗ (Ирмулатов и др., 2021).

Результаты агрохимического обследования показали, что содержание элементов питания в почве было неоднородными как по показателям, так и в пространстве полей (Abdulaev et al., 2020). Причины, определяющие эту неоднородность состояния поля, были нами проанализированы и нашли своё отражение в следующих работах (Abdulaev et al., 2020; Ирмулатов и др., 2021; Комаров и др., 2021). При этом, было впервые установлено, что только одна агрохимическая неоднородность экспериментального поля частично нивелировалась дифференцированным внесением элементов питания (Ирмулатов и др., 2021). То есть, традиционным использованием системы точного земледелия (а именно, оценка, расчет и дифференцированное внесение удобрений по карте заданию) не удалось «выровнять» внутриполевую неоднородность. Причем, эта неоднородность отчетливо проявилась как на снимках ДЗЗ, так и при детальном учете данных по урожайности по разноименным участкам поля. Для изучения этой особенности была произведена кластеризация полей с помощью ДЗЗ и выделены отличительные участки (рис. 2). Кластеризация была проведена для полей №34-35 во времени.



А Б С Д

Рис. 2. Кластеризация полей №34-35: А (29.06.2019); Б (7.07.2019); С (17.07.2019); Д (6.08.2019)

Ранее было показано, что при кластеризации участков перспективно использование геостатистики в практике растениеводства (Комаров, Захарян, Кирсанов, 2016), в том числе с использованием методов ДЗЗ (Захарян, Комаров, 2019). Далее, на основе анализа пространственных распределений урожайности может быть сделано обоснование дифференциации агротехнологий (Комаров, Захарян, Кирсанов, 2017). Было установлено, что, при правильно выбранной схеме районирования территории, достаточно дифференциации решений по трем градациям варьирующего фактора (Комаров и др. 2021).

Первоначально разделив поле по зонам неоднородности массива на три кластерных сектора, было отмечено, что средняя урожайность в верхней части поля (сектор 1) была на 15-20% ниже, чем в центре (сектор 2), а в нижней части — на 30-40% (сектор 3). Таки образом «работал» агроландшафтный фактор. В тоже время было определено (Ирмулатов и др., 2021), что, с повышением степени прецизионности исследований (сетки 25, 5 и 1 га), как общая урожайность, так и дифференциация урожая по склону, возрастали. На основании сопряженных прецизионных исследований нам удалось выявить причину изменения урожайности по разным частям поля, которая определялась не сколько внесенными дифференцированно удобрениями, сколько склоном поля и, соответственно, разной степенью влагообеспеченности. Здесь впервые был выделен фактор, обусловленный особенностью рельефа местности, а также совокупностью почвенных и гидрологических условий агроландшафта, то есть почвенно-ландшафтно-гидрологическими условиями (Ирмулатов и др., 2021; Комаров и др., 2021). Последнее было реализовано с помощью ДЗЗ и создания цифровой модели рельефа (ЦМР). В дальнейшем, на основании критерия неоднородности по почвенным, агроклиматическим факторам, вегетационному индексу развития растений NDVI, а также урожайности, была произведена оценка состояния полей с использованием алгоритма геостатистики (Захарян, Комаров, 2019; Комаров и др., 2021). Эти данные были использованы для геостатистического анализа состояния растений по данным ДЗЗ для каждого фрагмента поля. Такая оценка и аналитическая аппроксимация вариограмм для сельскохозяйственных полей в условиях Акмолинского региона Казахстана показана в работе (Комаров, Захарян, Ирмулатов, 2021).

Выводы

Таким образом, на основании ДЗЗ и сопряженных с ними наземных измерений, можно оценить специфику дифференциации внесения удобрений и отклика растений на изменение индекса вегетации, а, следовательно, и на особенности физиологических процессов роста и развития возделываемых культур, что, в конечном итоге, отразилось на получении урожайности. Оценка механизмов наблюдаемых явлений, проведенная с помощью ДЗЗ и сопряженных наземных

измерений, позволяет перейти к управлению биопродуктивностью возделываемых растений. При этом, с помощью ДЗЗ можно оперативно выявлять зоны депрессии в развитии растений и своевременно производить необходимые корректирующие мероприятия.

Выявлена причина изменения урожайности по разным частям поля, которая определялась не сколько внесенными дифференцированно удобрениями, сколько склоном поля и, соответственно, разной степенью влагообеспеченности. Здесь впервые был выделен фактор, обусловленный особенностью рельефа местности, а также совокупностью почвенных и гидрологических условий агроландшафта, то есть почвенно-ландшафтно-гидрологическими условиями.

Благодарности

Авторы выражают признательность Абдулаеву К.К. и всему коллективу НПЦЗХ им. А.И. Бараева за представленную возможность осуществить совместные исследования.

Список литературы

1. Авров А.П. Анализ синхронности и устойчивости в колебаниях урожайности зерновых в Республике Казахстан // Вестник НГУЭУ. 2014. № 4. С. 101-115.
2. Абдуллаев К., Ирмулатов Б., Комаров А., Якушев В. Внедрение системы точного земледелия в условиях северного Казахстана с использованием ДДЗ // Материалы II Междунар. Научн.конф. «Тенденции развития агрофизики: от актуальных проблем земледелия и растениеводства к технологиям будущего. СПб.: АФИ, 01-04.10.2019. С. 770-773.
3. Иванченко П.Г., Султанов И.И. Система картирования урожайности и её элементы при внедрении технологии точного земледелия // Вестник Кустанайской ГСХА. 2020. № 1. С. 57-61.
4. Ирмулатов Б.Р., Комаров А.А., Заболотских В.В., Кирсанов А.Д. Использование ДДЗ для оценки состояния опытных полей в весенний период в условиях Северного Казахстана // Материалы II Междунар. Научн.конф. «Тенденции развития агрофизики: от актуальных проблем земледелия и растениеводства к технологиям будущего. СПб.: АФИ. 01-04.10.2019. С. 836-842.
5. Ирмулатов Б.Р., Абдуллаев К.К., Комаров А.А., Якушев В.В. О перспективах прецизионного управления продуктивностью пшеницы в условиях Северного Казахстана // Сельскохозяйственная биология. 2021. Т. 56. № 1. С. 92-102. DOI: 10.15389/ agrobiology.2021.1.92rus
6. Комаров А.А., Захарян Ю.Г., Кирсанов А.Д. Анализ пространственных распределений урожайности для обоснования дифференциации агротехнологий // Известия Санкт-Петербургского аграрного университета. № 47 (2). 2017. С. 48-57.
7. Комаров А.А., Захарян Ю.Г., Ирмулатов Б.Р. Оценка и аналитическая аппроксимация вариограмм для сельскохозяйственных полей в условиях Акмолинского региона Казахстана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. №3. С. 182–191. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-182-191
8. Ларионов Ю.С. Проблемные аспекты современного семеноводства и семеноведения // Селекция и семеноводство. 2004. № 3. С. 17–19.
9. Малицкая Н.В., Пучкова С.Ю., Сыздыкова Г.Т., Аленов Ж.Н., Айдарбекова Т.Ж., Рукавицина И.В., Галиуллин А.А. Урожайность и качество зерна различных сортов яровой мягкой пшеницы в условиях Акмолинской области Казахстана //Известия ТСХА, вып. 1. 2020. С.33-48. DOI: 10.26897/0021-342X-2020-1-33-48
10. Захарян Ю.Г., Комаров А.А., Кирсанов А.Д. Перспективы использования геостатистических анализов в практике растениеводства// Информация и космос. №1. 2016. С. 92-99.

11. Захарян Ю.Г., Комаров А.А. Перспективы использования геостатистики для анализа состояния растений по данным дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т.16. №3. С. 140-148. DOI 10/21046/2070-7401-2019-16-3-140-148.
12. Abdulaev K., Irmulatov B., Komarov A., Nugis E. Precision agriculture in the north of Kazakhstan// Journal of Agricultural Science, 2020. T. 31. № 2. C. 115-121.

USE OF REMOTE SENSING DATA TO CONTROL WHEAT PRODUCTIVITY IN THE ARID ZONE (ON THE EXAMPLE OF NORTHERN KAZAKHSTAN)

A. A. KOMAROV[1], B. R. IRMULATOV[2], V. V. YAKUSHEV[1], A. D. KIRSANOV[1], Y. G. ZAKHARYAN[1]
[1]Agrophysical Research Institute, St. Petersburg, Russia, agrophys.inst@yandex.ru Agrophysical Research Institute (Zelenydar@mail.ru).
[2]Scientific and Production Center of Grain Farming A.I. Baraev. Kazakhstan

Annotation. On the basis of remote sensing of the Earth and coupled ground-based studies, the results of differentiated fertilization in the conditions of Northern Kazakhstan are presented. The studies were carried out in 2018-2020. at the landfill of precision agriculture, where a detailed assessment of the heterogeneity of the state of the soil cover was carried out according to the main agrochemical indicators. The detailed assessment of soil fertility was carried out according to schemes (survey grids) with the size of elementary plots of 1, 5 and 25 hectares. Fertilizers were applied according to the task cards differentially by sowing and surface methods. At the same time, it was first established that only one agrochemical field heterogeneity was partially leveled by the differentiated introduction of nutrients. It is shown that in the conditions of the arid climate of Northern Kazakhstan, agrolandscape conditions have a decisive influence on the productivity of spring wheat, which are characterized by the slope of the terrain, the distribution of watercourses that provide the best supply of productive moisture down the slope.

Key words. Northern Kazakhstan, wheat, precision farming, Earth remote sensing, vegetation index NDVI, differential fertilization.

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ОБНАРУЖЕНИЯ И ВЫДЕЛЕНИЯ ВНУТРИПОЛЕВОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПО МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫМ СНИМКАМ И ОПТИЧЕСКИМ КРИТЕРИЯМ

А. Ф. ПЕТРУШИН, О. А. МИТРОФАНОВА, Е. П. МИТРОФАНОВ
ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт» (ФГБНУ АФИ), Санкт-Петербург, E-mail: apetrushin@agrophys.ru;

Аннотация. Применение технологий точного земледелия (ТЗ) невозможно без адаптации технологических операций к пространственной неоднородности конкретного поля. Каждое сельскохозяйственное поле неоднородно и основной задачей, при переходе к использованию технологий ТЗ, является выявить причины неоднородности, и выделить границы изменчивости на конкретном контуре в заданное время. Работа является продолжением разработки базового алгоритма обнаружения и выделения границ внутриполевой изменчивости по оптическим критериям и гиперспектральным снимкам для ТЗ. Представлено описание структуры базы данных (БД), содержащей описание основных используемых оптических критериев и базы знаний (БЗ), содержащей сопоставление значения оптических критериев и физиологическое состояние посевов сельскохозяйственных культур в оптимальных и стрессовых условиях

Ключевые слова. точное земледелие, внутриполевая изменчивость, дистанционное зондирование, оптические характеристики растений.

Введение

Точное земледелие – это оптимальное управление продуктивностью посевов с учётом вариабельности среды обитания и состояния растений. При использовании технологии точного земледелия каждое сельскохозяйственное поле рассматривается как неоднородное, т.е. оно разделяется на некоторое количество новых единиц управления, которые являются однородными участками. Суть заключается в том, что для получения с данного поля максимального количества качественной продукции для всех растений этого массива создаются оптимальные условия произрастания с учётом выявленной неоднородности участка.

Для получения детальной информации о состоянии посевов предлагается использовать данные дистанционного зондирования, как космические, так и аэрофотосъемку [4]. Уже давно доказана возможность определения состояния посевов по оптическим показателям и их потребность в минеральном питании [2].

В работе проведено обобщение существующих вегетационных индексов (оптических критериев), отражающих состояние сельскохозяйственных культур, создана база данных для описания вегетационных индексов, разработана структура базы знаний для хранения результатов экспериментов по возделыванию культур в стрессовых и оптимальных условиях с регистрацией оптических характеристик.

Объекты и методы исследования

Расчет вегетационного индекса NDVI основывается на формуле (1), содержащей оптические значения в видимом и инфракрасном диапазонах:

$$NDVI=(NIR+RED)/(NIR-RED) \quad (1)$$

Соответственно, в базе данных записываются значения оптических диапазонов в нанометрах (нм), на основании которых производится расчет (2):

$$RED=[645:760],\ NIR=[781:1399] \quad (2)$$

Но большинство вегетационных индексов опирается на конкретные значения длин волн, например индекс содержание хлорофилла:

$$ChlRI = (R_{750}-R_{705})/(R_{750}+R_{705}-2R_{445}) \quad (3)$$

Тогда в базе данных записывается центр используемого канала и его ширина (4), например:

$$R750 = [750,10] \quad (4)$$

Помимо вегетационных индексов в базе данных хранятся характеристики используемых космических сенсоров и аэрофотокамер. Это сделано для автоматизации процесса расчета вегетационных индексов, достаточно указать какой тип исходного сенсора, и система сама будет выбирать необходимые каналы для расчета вегетационного индекса.

Для реализации базового алгоритма обнаружения и выделения границ внутриполевой изменчивости по оптическим критериям и гиперспектральным снимкам так же создана база знаний, в которую заносится соответствие значения оптического показателя для определенной культуры в фазу её развития, характеризующего физиологическое состояние, в оптимальных и угнетенных условиях, созданные определенным стрессором.

Результаты и обсуждение

При расчете оптических критериев в автоматическом режиме возникает проблема выбора нужного канала. Так, например, характеристики спутника Sentinel-2 (таблица 1), содержащиеся в базе данных, показывают, что для расчета вегетационного индекса NDVI (1) с описанными диапазонами (2), возможно использовать каналы B4, B5, B6. В алгоритм выбора канала заложен принцип, выбирать наиболее широкий канал, подпадающий под нужные характеристики. Для расчета индекса NDVI будут использованы каналы *B4* для *RED* и *B8* для *NIR*.

Таблица 1. Характеристика каналов спутника Sentinel-2

Канал	Начало	Середина	Конец	Ширина
B1	433	443	453	20
B2	458	490	522	65
B3	543	560	577	35
B4	650	665	680	30
B5	698	705	712	15
B6	733	740	747	15
B7	773	783	793	20
B8	785	842	899	115
B8a	855	865	875	20
B9	935	945	955	20
B10	1360	1375	1390	30
B11	1565	1610	1655	90
B12	2100	2190	2280	180

В случае, если описанный в базе данных вегетационный индекс не попадает ни в один из каналов сенсора, то тогда будет выбран наиболее близкий канал, о чем будет сообщено пользователю.

Выводы

Предложенная программная реализация базового алгоритма позволяет накапливать знания ученых исследователей о соответствии оптических критериев и физиологическом состоянии растения, что позволит в автоматическом режиме выделять зоны угнетенности и определять причину угнетенности.

В дальнейшем планируется добавить функциональность по автоматической кластеризации зон неоднородности на возделываемом поле и подготовке карты-задания для дифференцированной техники, используемой в точном земледелии.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-29-05184-мк «Разработка теоретических основ дистанционной и наземной количественной оценки внутриполевой изменчивости для точного земледелия»).

Список литературы / References

1. 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 № 2008614663 от 29 сентября 2008 г.
2. Канаш Е. В., Якушев В. П., Русаков Д. В., Блохина С. Ю., Кравцова А. В. Оптические характеристики листьев яровой пшеницы при дефиците азота и воды // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2017. № 4. С. 9–12.
3. Матвеенко Д. А., Воропаев В. В., Якушев В. В., Блохин Ю. И., Блохина С. Ю., Митрофанов Е. П., Петрушин А. Ф. Состояние и перспективы создания новых методов количественной оценки внутриполевой изменчивости в точном земледелии // Агрофизика. 2020. № 1. С. 59–70.
4. Якушев В. П., Канаш Е. В., Конев А. А., Ковтюх С. Н., Лекомцев П. В., Матвеенко Д. А., Петрушин А. Ф., Якушев В. В., Буре В. М., Осипов Ю. А., Русаков Д. В. Теоретические и методические основы выделения однородных технологических зон для дифференцированного применения средств химизации по оптическим характеристикам посева (Практическое пособие). СПб.: АФИ, 2010. 59 с.
5. 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.

A SOFTWARE PACKAGE FOR DETECTING AND ISOLATING INTRA-FIELD VARIABILITY BASED ON MULTISPECTRAL IMAGES AND OPTICAL CRITERIA.

A. F. PETRUSHIN, O. A. MITROFANOVA, E. P. MITROFANOV
Agrophysical Research Institute, St. Petersburg, Russia, apetrushin@agrophys.ru;

Abstract. The use of precision agriculture technologies is impossible without adapting technological operations to the spatial heterogeneity of a particular field. Each agricultural field is heterogeneous and the main task, when switching to the use of precision agriculture technologies, is to identify the causes of heterogeneity, and to highlight the boundaries of variability on a specific contour at a given time. The work is a continuation of the development of a basic algorithm for detecting and distinguishing the boundaries of intra-field variability by optical criteria and hyperspectral images for precision agriculture. A description of the structure of the database containing a description of the main optical criteria used and a knowledge base containing a comparison of the values of optical criteria and the physiological state of agricultural crops under optimal and stressful conditions is presented

Keywords. Precision agriculture, intra-field variability, remote sensing, optical characteristics of plants.

ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИТОСАНИТАРНОГО СОСТОЯНИЯ ПОСЕВОВ И СПОСОБОВ ИХ ЗАЩИТЫ ОТ СОРНЯКОВ

УДК 663.75:4

ДИАГНОСТИКА ЗАСОРЕННОСТИ И МЕРЫ БОРЬБЫ С БОРЩЕВИКОМ СОСНОВСКОГО НА ТРУДНОДОСТУПНЫХ УЧАСТКАХ МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ

А. И. БЕЛЕНКОВ, Д. В. АРТЕМОВ
Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К. А. Тимирязева

Исследования проводились группой ООО «Архимед» в условиях Серебряно-Прудского и Зарайского районов Московской области в 2018-2019 гг. Целью данной работы стала оценка практических исследований по возможности применения инновационного метода гербицидной обработки труднодоступных площадей, пораженных борщевиком Сосновско. Была проведена сравнительная характеристика применения ручного метода обработки с помощью ранцевых мотоопрыскивателей и с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) (агродрона с опрыскивателем). Практическая эффективность обработки с БПЛА выше ручной в 10 раз. Важным условием при выборе технологий является максимально возможная безопасность исполнителей работ. Контакт с препаратами, в случае применения БПЛА, происходил только при заправке гербицидной емкости.

Рабочая группа ООО «Архимед» в рамках договора с администрацией Зарайского городского округа выполняла работу в 2019 г. Высота сорняка на начало работ составляла около 30 см. Погодные условия были оптимальны для быстрой вегетации борщевика Сосновского. Дневные температуры +22–28°С. До начала работ прошли обильные дожди. Поэтому к окончанию первого этапа гербицидных обработок 25-27 мая высота сорняка достигала 70-80 см (Рис. 1, 2).

Рисунок 1. Борщевик перед началом работ в мае, Московская область, Зарайский район, 2019 г.

Рисунок 2. Бригада рабочих с мотоопрыскивателями, Московская область, Зарайский район, 2019 г.

Для выполнения работ использовалась баковая смесь гербицидов: Торнадо 500, ВР 4 л/га (изопропиламинная соль глифосата кислоты, 500 г/л) + Магнум ВДГ 0,05 кг/га (метсульфурон-метил 600 г/кг) + Адью, 0,2 л/га (ПАВ). Расход рабочей жидкости 250 л/га для штанговых опрыскивателей и 150 литров на 1 гектар для ранцевых мотоопрыскивателей.

Несмотря на приобретение БПЛА с опрыскивателем, полностью отказаться от ручной обработки (с помощью ранцевых мотоопрыскивателей) не представлялось возможным, поскольку некоторые локации борщевика Сосновского располагались под кронами деревьев и линиями электропередач.

Беспилотный летательный аппарат JT 6L-404 предназначен для обработки небольших площадей средствами защиты растений, объем химикатов способный поднять аппарат около 6 литров, площадь покрытия составляет около 0,3 га, на эту же площадь обработки хватает и емкости заряда аккумуляторной батареи, источника энергии. Само время облета и опрыскивание этой площади без учета подлета, взлета и посадки около 8 минут. При использовании двух дополнительных батарей и бензо-генератора с подключенным зарядным устройством, непрерывный цикл работ, в том числе смена батарей, заправка баковой смеси составил около 45 минут. За это время удается обработать площадь 1,5 га. После окончания рабочего цикла необходим перерыв на зарядку батарей, около 30 минут. Далее работы возобновляются. За 8-ми часовую рабочую смену выполнялось 6 циклов и обрабатывалось в среднем 9 Га площадей. При выполнении работ с БПЛА задействовано 2 исполнителя: оператор и рабочий (заправка БПЛА, поднос и смена аккумуляторных батарей). Для сравнения, реальная площадь обработки ранцевым мото-опрыскивателем при сложном рельефе не более 1-2 га за 8-ми часовую смену для двух операторов. Реальная эффективность технологии внесения гербицидов с помощью БПЛА в 5-10 раз (в зависимости от условий) выше метода с использованием ранцевых опрыскивателей. В данном случае идет сравнение с наименее мощной моделью БПЛА, в линейке производителя присутствуют модели с объемом емкости до 32 литров, что при наличии достаточного количества аккумуляторных батарей может довести реальную выработку до 40 га за смену. При выполнении работ с помощью БПЛА была применена система малообъемного опрыскивания, до этого массово используемая при авиационной обработке и при использовании опрыскивателей с роторными форсунками «Заря» (Рис. 3).

Рисунок 3. БПЛА JT 6L-404 с баком на 32 литра, Московская область, Зарайский район, 2019 г.

Работы проводились преимущественно в безветренную, или с небольшим ветром погоду 3-8м/с, при отсутствии осадков, поэтому существенного сноса облака распыленной баковой смеси не наблюдалось. Как отмечалось ранее, к работам с помощью БПЛА и комплектом дополнительного оборудования приступили в конце первого этапа обработки, высота растений достигала 50-70см, однако после контрольного осмотра 16 июня было отмечено значительное угнетение борщевика Сосновского именно в местах обработки с помощью БПЛА. Практически отсутствовали пропуски и неравномерность обработок. После контрольного осмотра территорий 30 июня, отмечалась полная гибель «первой волны» борщевика Сосновского, хлороз и

отмирание надземной части растения, и образование характерных отверстий в почве после разложения стержневой корневой системы

Аппарат БПЛА JT 6L-404 может выполнять опрыскивание территории в двух режимах: ручном и автоматическом. Ручной режим более требователен к квалификации оператора. Так же в режиме ручного управления не рационально расходуется емкость аккумуляторных батарей. Поэтому этот метод возможно использовать на небольших, самых труднодоступных участках.

При выполнении работ в Зарайском районе полеты осуществлялись в автоматическом режиме: до начала полетов специалистом с помощью персонального компьютера (смартфона) и специального программного обеспечения определялись границы участка для обработки, которые затем вводились в блок управления. После заправки емкости баковой смесью, БПЛА оператором отправлялся выполнять задание. При выработке жидкости или разряде батареи аппарат в автоматическом режиме возвращался в точку вылета (базу). После этого он возвращался в точку продолжения работ, так же в автоматическом режиме. Однако надо учитывать при составлении карты полетного задания возможные препятствия, расположенные в контуре обработок, это может быть отдельно стоящие деревья, постройки, опоры ЛЭП.

При проведении работ второго этапа в Зарайском районе, использование БПЛА было более масштабным, общая площадь обработок по данной методике составляла около 20 га. И снова, по результатам контрольных осмотров отмечена полная гибель сорняка с высоким качеством обработки площадей.

БПЛА активно использовался в местах, где невозможно или затруднено применение штанговых опрыскивателей, агрегатированных с тракторами, то есть там, где предполагалось применение ранцевых мотоопрыскивателей. Поэтому экономическая эффективность данной технологии может быть рассчитана следующим образом:

Для обработки 20 га требуется не менее 20 смен работы одного рабочего с ранцевым опрыскивателем, это при условии устойчивой погоды без осадков. Только стоимость оплаты труда (сдельная) составит 2500 руб. х 20 смен = 50000 руб. При использовании БПЛА эта площадь была обработана за две рабочие смены. Стоимость оплаты труда составила: 3500 руб. х 2 смены = 700 руб. При учете стоимости оплаты труда подсобного рабочего разница станет еще более очевидной. Из вышесказанного можно сделать вывод, что эффективность работ с помощью, даже самого маломощного БПЛА, в 7 раз выше ручного труда. Так же нельзя не учитывать количество используемой воды. При использовании БПЛА применялся малообъемный метод внесения гербицидов при среднем расходе воды в 15 литров на 1 га. При работе с ранцевым опрыскивателем этот показатель не менее 150 литров на 1 га. При сложности доступа к источникам чистой воды, данный факт очень важен.

Борьба с зарослями Борщевика Сосновского — это весьма дорогостоящий процесс. Важность её проведения опирается на несколько факторов: экологический, народно-хозяйственный, экономический, эстетический и т.д. Если рентабельность производства сельскохозяйственной продукции зависит от уровня урожайности, стоимости удобрений и т.д., то при борьбе с борщевиком решающая роль выпадает на производительность процесса обработки участка гербицидами.

В нашей работе мы рассматривали обработку гербицидами самопроизвольно распространяющихся растений борщевика Сосновского, которые образовали заросли определенной плотности (таблица).

Таблица. Показатели экономической эффективности применения беспилотных летательных аппаратов в сравнении с ручным опрыскиванием

Показатели	Ручное опрыскивание	Применение БПЛА
Максимальная производительность, га (за смену 8 часов)	6	9
Оплата заказчиком за 1 га, руб.	11000	
Выручка от реализации с 1 га, руб.	66000	99000
Производственные затраты на 1 га работ, руб.	9712	4762
Производственные затраты, руб.	58272	42858
Прибыль за 1 смену, руб.	7728	56142
Уровень рентабельности, %	13,2	130,9

Таблица 1 показывает нам экономический аспект борьбы с Борщевиком Сосновского в зависимости от применяемого подхода в опрыскивании. Затраты на ручном опрыскивании выше, т.к. количество основного и вспомогательного персонала больше, чем при использовании БПЛА, 5 человек при ручном и 2 человека при использовании дрона. Исходя из данных, рассмотренных выше, можно сказать, что уровень рентабельности при использовании беспилотного летательного аппарата выше в 10 раз. Кроме того, важно и то, что при работе агродроном с пестицидами контактирует только один человек – оператор-заправщик, а при использовании ручного способа - вся бригада.

Список литературы

1. Афонин А.Н. Эколого-географический анализ распространения и встречаемости борщевика Сосновского (Heracleum sosnowskyi) в связи со степенью аридности территорий и его картирование для европейской территории России / Афонин А.Н., Лунева Н.Н., Ли Ю.С., Коцарева Н.В. // Экология. 2017. № 1. С. 66-69.
2. Бударин С.Н. Инвазивный характер борщевика Сосновского (Heracleum sosnowskyi) при распространении в агроэкосистемах Московской области / Бударин С.Н., Ларикова Ю.С., Кондратьев М.Н. // Материалы 3-й Всеросс. науч.-практ. конф. с Межд. участием, посвященной. Самара, 2014. С. 41-48.
3. Выявление и оконтуривание мест распространения борщевика Сосновского на территории городского округа Домодедово на основе ГИС-технологий» // ООО «Раменский региональный экологический центр», 2014 http://www.rrec.ru/news/index.php?news=2061
4. Далькэ И.В. Влияние глифосатсодержащего гербицида на рост, развитие и функциональные показатели борщевика Сосновского/ Далькэ И.В., Чадин И.Ф // Известия Коми научного центра Уральского отделения РАН. № 4. 2010. С. 36-42.
5. Камбулин В.Е. К вопросу применения беспилотного летательного аппарата для дистанционного зондирования угодий в Казахстане/ В.Е. Камбулин, М.Д. Болтаев //Защита растений в современных технологиях возделывания сельскохозяйственных культур: материалы Международной научно-практической конференции; под общ. ред. Н.Г. Власенко. Краснообск, 2013. С. 132– 35.
6. Кондратьев М.Н. Физиолого-экологические механизмы инвазивного проникновения борщевика Сосновского (Heracleum sosnowskyi Manden.) в неиспользуемые агроэкосистемы / Кондратьев М.Н., Бударин С.Н., Ларикова Ю.С. // Известия ТСХА. 2015. Вып. 2. С. 36–49.
7. Лунева Н.Н. Борщевик Сосновского в Российской Федерации // Защита и карантин растений. 2014. № 3. С. 12-18.
8. Лысов А.К. Механизация применения пестицидов в системах интегрированной защиты растений / Лысов А.К., Корнилов Т.В.// Защита и карантин растений. 2019. № 11. С. 7–10.

9. Панасенко Н.Н. Некоторые вопросы биологии и экологии борщевика Сосновского (*Heracleum Sosnowskyi* Manden) // Российский журнал биологических инвазий. 2017. № 2. С. 95–106.
10. Рутман В.В. Разработка компьютерной программы для идентификации и борщевика Сосновского по аэрофотоснимку / Рутман В.В., Кантор Г.Я // Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем Материалы XIV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. 2016. С. 183–185.
11. Флеенко А. С. Воздействие инвазивных видов растений на природную среду и человека на примере вида борщевик Сосновского (Heracleum sosnowskyi)/ Флеенко А. С., Короткая С. В. // Молодой ученый. 2017. № 37. С. 38–42. URL https://moluch.ru/archive/171/45629/ (дата обращения: 17.09.2018).
12. Черевко Л.Д. Организация производства и предпринимательство в АПК: методические указания / Л.Д. Черевко, А.В. Гришин. М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2013
13. Якимович Е.А. Методические рекомендации по борьбе с борщевиком Сосновского / Якимович Е.А., Сорока С.В., Ивашкевич А.А. // РУП «Институт защиты растений». 2-е изд. доп. Минск. 2011. 76 с.
14. Якимович Е.А. Гербициды против борщевика Сосновского/ Якимович Е.А., Шкляревкая О.А., Пекутько С.А., Ницевич С.А. // Наше сельское хозяйство. 2018. Октябрь. С. 2–19.
15. https://msh.mosreg.ru

DIAGNOSTICS OF POLLUTION AND MEASURES OF COMBATING BORSCHEVIK SOSNOVSKY IN DIFFICULTY AREAS OF THE MOSCOW REGION

A. I. Belenkov, D. V. Artemov
Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazeva

The studies were carried out by a group of OOO «Archimedes» in the conditions of the Serebryano-Prudsky and Zaraisky districts of the Moscow region in 2018-2019. The purpose of this work was to evaluate practical research on the possibility of using an innovative method of herbicidal treatment of hard-to-reach areas affected by the Sosnovsko hogweed. A comparative characteristic of the application of the manual method of processing with the help of knapsack motor-sprayers and with the use of unmanned aerial vehicles (UAVs) (agrodron with a sprayer) was carried out. The practical efficiency of UAV processing is 10 times higher than manual processing. An important condition when choosing technologies is the maximum possible safety of the work performers. Contact with drugs, in the case of using a UAV, occurred only when filling the herbicide container.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ СВЕКЛОВИЧНЫХ ПОЛЕЙ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ УЧЁТА ЗАРАЖЁННОСТИ ПОЧВ СВЕКЛОВИЧНОЙ ЦИСТООБРАЗУЮЩЕЙ НЕМАТОДОЙ

К. А. ПЕРЕВЕРТИН[1], Н. Н. ИВАНЦОВА[2], Т. А. ВАСИЛЬЕВ[3]
[1]ФГБНУ Институт проблем экологии и эволюции им. Северцова РАН, центр паразитологии ИПЭЭ, Россия, 119071, Москва, Ленинский проспект, д. 33, perevertink@mail.ru;
[2]РГАУ-МСХА им. К. А. Тимирязева;
[3]ФБГНУ ФИЦ «Почвенный институт им. В. В. Докучаева»

Аннотация. Развитие отечественного свекловодства в последние годы вновь актуализирует проблему свекловичной цистообразующей нематоды и соответственно требует фитосанитарного мониторинга. Предварительный анализ спутниковых снимков свекловичных полей не может исчерпывающим образом диагностировать заражение, но помогает спланировать маршрутные обследования на полях, где наблюдается риск развития очагов нематоды.

Ключевые слова. Спутниковые снимки, свекловичная цистообразующая нематода.

Введение

Свекловичная цистообразующая нематода – опаснейший вредный организм, неоднократно приводивший к кризису свекловодческой отрасли, начиная с середины XIX века в Германии, когда специализированно против этой проблемы была создана Опытная станция в Галле, которую принято рассматривать, как первый в мире Институт защиты растений. Именно повторение германского сценария (почти бессменное возделывание сахарной свёклы) привело к закрытию отрасли свекловодства в Южном Казахстане и Киргизии в конце 1970-х -- начале 1980-х годов вследствие нематодного «свеклоутомления -Zuckerrubenmudigkeit (нем.)» почв.
Системный аграрный кризис 90-х годов в значительной мере коснулся свекловодства. Наряду с потерей отечественного семеноводства, коммерчески более привлекательным оказалась работа значительной части сахарных заводов на привозном (тростниковом) сырье. Сокращение посевных площадей с выводом основной культуры (сахарной свёклы) наряду с безусловными стратегическими минусами имело несомненный положительный эффект в плане улучшения фитосанитарной обстановки по свекловичной нематоде. Плотность популяции резко сократилась, однако, механизмы сохранения (мезобиоз, паразитирование на сорняках-резерваторах) обеспечивали латентное присутствие нематоды. С 2014 года был взят курс на отказ от привозного тростникового сырья и полное самообеспечение. В 2016 году Россия впервые в своей истории даже стала экспортёром сахара [1]. Однако коммерциализация производства обуславливает нарушение севооборота и к настоящему времени в традиционных регионах свеклосеяния плотность популяции нематоды близка к выходу выше хозяйственно-неощутимого уровня. Это делает крайне актуальным фитосанитарный мониторинг, в том числе и дистанционными методами. Кроме сахарной свёклы дистанционный метод может быть эффективен при выявлении эпифитотических очагов гетеродероза сои, зерновых, люцерны, мелойдогиноза томата, огурца, табака, хлопчатника, льна, афеленхоидоза риса, дитиленхоза люцерны и других фитогельминтозов [2].

Объекты и методы исследования

В нашей стране дистанционные методы для диагностики фитогельминтозов начали разрабатывать с 1976 года по инициативе А. А. Шестеперова [3]. В результате многолетних исследований сотрудников ВИГИС (Всероссийский институт гельминтологии им. К. И. Скрябина) и Калужской инспекции по карантину растений были разработаны визуальный, аэровизуальный и аэрофотографический методы выявления очагов глободероза картофеля. В ВИГИС впервые разработана методология изучения влияния различных факторов (фенологического, фитопатологического, фитогельминтологического, агрохимического состояния посадок

картофеля) на эффективность дистанционных методов выявления очагов глободероза. Определение с помощью денситометра СР-25М оптических плотностей аэронегативов, дешифровка аэрофотоснимков, аэровизуальная, визуальная оценка глободероза и определение плотности популяции Золотистой картофельной нематоды в почве позволили выявить группы факторов, влияющих на методы выявления очагов глободероза.

Выбор времени проведения визуальных, аэровизуальных обследований и аэрофотосъемки для обнаружения глободероза определялся началом фазы бутонизации картофеля, когда между инвазированными и здоровыми растениями устанавливался максимальный контраст, и заканчивался в фазу массового цветения, когда начинали проявляться симптомы других болезней (фитофтороз, макроспориоз, вирусные болезни). При проведении обследований в это время повышается вероятность однозначного определения поражений картофеля именно глободерозом [3].

Наибольшее внимание, как в отечественной, так и в мировой практике дистанционной диагностики зараженности почвы цистообразующими нематодами уделялось картофельной глободере, что определяется важностью и практически повсеместной распространённостью культуры-хозяина. Сахарная свёкла также относится к стратегическим культурам, причём дистанционная диагностика гетеродероза обещает быть более успешной, вследствии относительно компактного характера расположения свекловичных полей. Связано это с тем, что для минимизации затрат на транспортировку корнеплодов свекловичные поля располагаются вокруг сахарных заводов. Так, например, для Тамбовской области зоны свекловодства локализуются, в частности вокруг Никифоровского и Уваровского сахзаводов (соответственно к с.-з. и ю.-в. от Тамбова).

Рис. 1. Спутниковый снимок полей вблизи Уваровского сахарного завода Тамбовской области. Объект мониторинга – поле 025MPR_KLNS_007_004

Рис. 2. Поле 025MPR_KLNS_007_004 на снимке Sentinel-2a 17 августа 2016 г.

Выявление паттернов развития болезней с помощью пространственных методов имеет решающее значение для оперативной ее оценки. Анализ развития формы неоднородности пораженных участков является важным наряду с разработкой спектральных индексов для обнаружения заболевания растений [4].

Дистанционные методы значительно сокращают затраты труда и средств по сравнению с наземными способами выявления фитопатогенных организмов сельскохозяйственных культур на больших площадях с.-х. культур.

Дистанционный метод может быть эффективен при выявлении эпифитотических очагов гетеродероза сои, сахарной свеклы, зерновых, люцерны, мелойдогиноза томата, огурца, табака, хлопчатника, льна, афеленхоидоза риса, дитиленхоза люцерны и других фитогельминтозов [1, 3, 4].

Рис. 2. Окончательный диагноз заражённости возможен только непосредственно на поле

Наряду со спутниковыми снимками неоднократно была продемонстрирована возможность использования для предварительной оценки пораженности с.-х. культур болезнями, в том числе фитогельминтозами - самолетов, вертолетов, сверхлегких (СЛА) и беспилотных (БПЛА) летательных аппаратов.

Заключение

1. Предлагается анализ развития пространственных неоднородностей вегетационных индексов по снимкам для подтвержденных зараженных полей. Паттерны динамики неоднородностей могут быть использованы для выявления заражения.
2. Для подтверждения полученных данных обязательно требуется на окончательном этапе присутствие специалиста непосредственно на поле, но предварительная оценка возможных заражений значительно облегчает задачи мониторинга.
3. Особое внимание при анализе снимков следует обращать на хлороз листьев в очагах поражения и пятна выпада растений на поздних стадиях вегетации.

Список литературы / References

1. Перевертин К.А. Россия впервые стала экспортёром сахара. Модель оценки экономических и экологических последствий невалидных агрономических решений // Математическое моделирование в экологии Пущино, 2017 С. 152-154.
2. Шестеперов А.А., Вольвач В.В., Скорик В.П. Выявление очагов глободероза картофеля с помощью аэрофотосъемки // Защита растений №8, 1987, С. 46–48.
3. Шестеперов А.А., Перевертин К.А., Приданников М.В. Свекловичная цистообразующая нематода и её опасность для сахарной свёклы // Сахарная свекла. 2017. № 2. С. 18–23.
4. Martinelli F., Scalenghe R. et al., Agron. Sustain. Dev. (2015) 35:1–25. DOI: 10.1007/s13593-014-0246-1

UTILISING SATELLITE IMAGES BEET FIELDS TO OPTIMIZE ACCOUNTING INFECTION OF SOILS WITH BEET-FORMING CYSTO-FORMING NEMATODE

K. A. PEREVERTIN[1], N. N. IVANTSOVA[2], T. A. VASILIEV[3]
[1]A. N. Severtsov Institute of ecology and evolution of RAS,
33, Leninsky ave, Moscow, perevertink@mail.ru;
[2]Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy,
49, Timiryazevskaya st., Moscow;
[3]V. V. Dokuchaev Soil Science Institute, 7/2, Pyzhyovskiy lane, Moscow.

Abstract. The development of domestic beet growing in recent years again actualizes the problem of the beet cyst nematode and, accordingly, requires phytosanitary monitoring. Preliminary analysis of satellite images of sugar beet fields cannot fully diagnose infestation, but it helps to plan route surveys in fields where there is a risk of nematode outbreaks.

Keywords. Satellite images, sugar beet nematode

РАЗВИТИЕ ДИСТАНЦИОННЫХ МЕТОДОВ МОНИТОРИНГА ФИТОСАНИТАРНОГО СОСТОЯНИЯ АГРОЭКОСИСТЕМ РОСИИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПЕСТИЦИДОВ (СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ)

В. А. ЗАХАРЕНКО
Федеральный исследовательский центр «Немчиновка»
143026 Московская обл., Одинцовский р-н, ул. Агрохимиков, 6, Россия
E-mail: zwa@mosniish.ru

Аннотация. Представлены обобщенные результаты оценки динамики развития технологий дистанционного фитосанитарного мониторинга агроэкосистем на основе наземных и авиационных, сверхлегких летательных пилотируемых аппаратов (СЛА) и беспилотных аппаратов (БПЛА), усовершенствованных комплектующими приборами и оборудованием, обеспечивающими элементы информационных технологий в фитосанитарном мониторинге при определения вредных организмов в связи с эффективным использованием пестицидов при численности выше экономических порогов вредоносности (ЭПВ).

Ключевые слова. Агроэкосистемы, фитосанитарный мониторинг, дистанционный мониторинг, вредные организмы, экономический порог вредоносности, пестициды, пилотируемые и беспилотные летательные аппараты, спутники

На основе многолетних исследований (с 1959 г.) и обобщения литературных данных за последние годы представлены результаты оценки развития дистанционных методов мониторинга фитосанитарного состояния агроэкосистем в связи с использованием пестицидов, избирательных к конкретным культурным растениям и эффективно подавляющих вредные организмы [1, 2]. При этом учитываются показатели видового состава и уровня распространения вредных организмов, вызывающих риски снижения потенциала продуктивности культур (по показателю урожайности). Полученный показатель мониторинга сопоставляется с показателем экономического порога вредоносности (ЭПВ) вредных организмов, вызывающих при их численности, риск потерь урожая в стоимостной оценке, меньший чем затраты на применение пестицидов: при численности ниже ЭПВ применение отменяется, а при численности выше ЭПВ - рекомендуется внесение пестицидов, разрешенные для применении на территории Российской Федерации [3].Параметры ЭПВ разработаны по культурам и экономически опасным вредным организмам для практического использования агрономическим персоналом сельскохозяйственных предприятий и крестьянских (фермерских) хозяйств, а также специалистами службы ФГБУ «Россельхозцентр».

В статье рассмотрены тенденции развития дистанционных методов мониторинга фитосанитарного состояния агроэкосистем (посевов культур) в связи с использованием пестицидов. В группе наземных методов дистанционного мониторинга выявлена эффективность использования автомобильных диагностических лабораторий, которые в процессе движения вдоль поля с посевом культур (будучи укомплектованными специальными споро-уловителями, определяют по интенсивности отлова спор, всасываемым воздухом видовой состав, численность и опасность развития возбудителей листостебельных заболеваний) (разработка ВНИИБЗР). Более совершенными и прогрессивными рассматриваются созданные и осваиваемые в течение текущего десятилетия методы с элементами информационных технологий (ИТ) для наземного мониторинга и картирования с использованием GIS–географических информационных приемников, нашедших практической применение специалистами ФГБУ «Россельхозцентр» с 2010-2011 гг. в программном продукте ЗАО КБ «Панорама» профессиональной ГИС «Карта-2011». В ГИС-карте, например, по конкретным местам мониторинга выборочно на уровне федеральных округов представляется с заданной точностью информация о распространении, вредных насекомых и грызунов. Варианты карт представляются на сайте ФГБУ «Россельхозцентр» по особо опасным вредителям (мышевидные грызуны, саранчовые, луговой мотылек, клоп вредная черепашка и колорадский) для целенаправленного с большой точностью проведения защитных мероприятий. Широкое распространение получил дистанционный

феромониторинг с использованием синтетических половых феромонов путем отлова самцов вредных видов членистоногих ловушками, обнаружения очагов фитофагов (азиатской хлопковой совки, американской белой бабочки, восточной плодожорки, калифорнийской щитовки, калифорнийского трипса, кукурузного жука, картофельной моли ,непарного шелкопряда, персидской плодожорки, сибирского шелкопряда, средиземноморской плодовой мухи, усачей, томатной моли),границ и численности в пределах очагов. Феромониторингом охвачено 68 субъектов Российской Федерации. Объем феромониторинга за 2009-2014 г. составил 394 тыс. га посевов кукурузы, 138 тыс. га посадок картофеля, 49 тыс. га овощных культур, 897 тыс. га плодовых насаждений, 7508 тыс. лесных угодий и декоративных насаждений.

По сравнению с наземными методами мониторинга на начальном этапе развития дистанционного зондирования получили более производительные авиационные методы с использования самолетов, вертолетов (Ан-2, вертолетов Ми-2,Ка-26), позже сверхлегкие летательных аппаратов (СЛА), в частности аппаратов (дельтапланов), в условиях, когда невозможно применять наземную технику и даже на небольших полях с площадью до 30 га, которых в России больше половины. Особого внимания заслуживает дистанционный мониторинг с использованием СЛА-FO-2-FGRO с установкой: цифровой видеокамеры, (проводящей спектрозональную оценку отражения различными группами растений (групп здоровых культурных растения, сорняков, больных растений, пораженных возбудителями болезней, с нарушением питания макро- и микроэлементами); аппаратуры (автономный пульт сбора и регистрации показаний фитосанитарной информации о распространении вредных организмов и нарушении норм внесения удобрений , поступающих от внешних устройств, обрабатывающих информацию , с целью высокоточного мониторинга вредных организмов на полях и элементарных участках полей для дифференцированного внесения пестицидов на площадках с плотностью популяций выше порогового уровня (ЭПВ) (разработка ВИЗР и СПб ГУАП).

В настоящее время выпускаются пилотируемые СЛА и беспилотные летательные аппараты (БПЛА) с комплектующими элементами (ИТ) более точного приборного обеспечения, позволяющего оценивать характеристики растений по их спектральным отражением, с высокой детализацией картирования получаемой информации за счет повышенной разрешающей способностей (выше 1 см на пиксель) и с высокой тонностью позиционирования относительно земных координат комплектуемыми камерами. Практическое применение находят БПЛА серии Геоскан. Геоскан 201, например, оборудован двумя современными камерами: Sonya 5000 для проведения съемки в видимом красном и в ближнем инфракрасном электромагнитных излучениях с целью определения вегетационного индекса NDVI (по спектру , отражающему строение растительных тканей здоровой растительности по устойчивой к неинфекционным и инфекционным заболеваниям с соотношением большего количества хлорофилла в красном диапазоне и гораздо меньшем в инфракрасном) по сравнению с угнетенной, отмирающей и отмершей растительностью. Аэросъемочная система управляется с наземной станции управления (ноутбук + программное обеспечение). при съемке небольших объектов и при высоте полета 4000 м, что позволяет получать снимки 4–10 см. Геоскан 201 обладает длительностью полета до 180 мин, производительностью съемки за полет 700–2200 га., максимальной взлетная массой – 8 кг, полезной нагрузкой – 1,5 кг. Запуск/ посадка производится по схеме катапульт/парашют, привод выполняется электродвигателем. По рассмотренной схеме функционируют и другие варианты Геоскана 101 и 401 и серии БПЛА других фирм. Масштабная реализация пилотируемых и беспилотных (БПЛА), в настоящее время и в перспективе для фитосанитарного мониторинга, будет происходить при использовании достижений науки и техники в области приборостроения, в частности приборов, позволяющих определять различия

состояний здоровых растений и с признаков поражения растений вредными организмами и неинфекционными заболеваниями. Крупномасштабный фитосанитарный спутниковый мониторинг осуществляется с разрешающей способностью фитосанитарного состояния на больших площадях агроэкосистем, но при ограниченных возможностях учета вредных организмов на мелких учетных площадках поля, порядка гектаров- квадратных метров. Для космического мониторинга наиболее приемлемы являются группировки спутников на геостационарных орбитах (около 36 тыс.км), находящиеся ближе к Земле, которые пролетают над определенной точкой земной поверхности 1-2 раза в сутки и способны фиксировать мелкие очаги вредных организмов. Они требуют меньше в 10-15 раз затрат на вывод на орбиту, чем крупные спутники.

Список литературы

1. Захаренко В.А. Фитосанитарный мониторинг агроэкосистем и его научно методическое обоснование. РАСХН. В кн. Методическое обеспечение мониторинга земель сельскохозяйственного назначения.М., 2010. 554 с.
2. Sacharenko W.A., D. Spaar Krankheitsauftreten. P.158-166; Schadlingsauftretten. 166-183. Naturliche Grundlagen der Gemainschaft Unabhengiger Staaten und den Baltischen Republiken AGRIMEDIA. 628 s.
3. Захаренко В.А., Ченкин А.Ф., Черкасов В.А. и др. М.: ВО Агропромизздат,1985. 415 с.

DEVELOPMENT OF REMOTE METHODS FOR MONITORING THE PHYTOSANITARY STATUS OF AGROECOSYSTEMS OF RUSSIA WHEN USING PESTICIDES (Status and prospects)

V. A. ZAKHARENKO
Federal Research Center «Nemchinovka»
143026, Moscow region, Odintsovo district, ul. Agrochemikov, 6, Russia
E-mail: zwa@mosniish.ru

Annotation. The article presents the generalized results of the assessment of the dynamics of the development of technologies for remote phytosanitary monitoring of agroecosystems based on ground and aviation, ultralight manned aircraft (SLA) and unmanned aerial vehicles (UAVs), improved with components and equipment that provide elements of information technologies in phytosanitary monitoring for the identification of harmful organisms in connection with the effective use of pesticides in the population above the economic thresholds of harmfulness (EPV).

Keywords. Agroecosystems, phytosanitary monitoring, remote monitoring, harmful organisms, economic threshold of harmfulness, pesticides, manned and unmanned aerial vehicles, satellites

МЕТОДОЛОГИЯ ИЗУЧЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ГЕТЕРОГЕННОСТИ ФИТОСАНИТАРНОГО СОСТОЯНИЯ АГРОБИОЦЕНОЗОВ СРЕДСТВАМИ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

А. М. ШПАНЕВ, В. В. СМУК
ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт» (ФГБНУ АФИ), Санкт-Петербург, ashpanev@mail.ru; vvsmuk@mail.ru

Аннотация. Разработки в области методологии изучения гетерогенности фитосанитарного состояния агробиоценозов проводились на экспериментальной базе Меньковского филиала Агрофизического научно-исследовательского института. С этой целью тестовые поля подвергались детализированному учету распространения и развития вредных организмов. Одновременно с классическими наземными методами учета проводилась аэрофотосъемка поля с помощью беспилотного летательного аппарата «Геоскан 401». Использовался портативный ручной датчик GreenSeeker, с помощью которого определялось значение вегетационного индекса NDVI для каждой выделенной учетной площадки. Для анализа пространственного размещения вредных организмов в пределах поля рассчитывались коэффициенты вариации и агрегации. Цифровые карты пространственного размещения вредных организмов составлялись с помощью программ ГИС АФИ и Surfer 11.

Ключевые слова. Фитосанитарное состояние, пространственная неоднородность, дистанционное зондирование, вегетационный индекс NDVI, цифровые карты.

Введение

Управление фитосанитарным состоянием посевов – один из наиболее эффективных рычагов повышения их продуктивности и улучшения качества товарной продукции [1-2]. Ключевым аспектом при этом является максимальное ограничение негативного воздействия на объекты окружающей среды за счёт полноценной реализации принципа пространственной дифференциации [3]. Изучением пространственной неоднородности фитосанитарного состояния посевов и посадок сельскохозяйственных культур активно занимаются в передовых странах Европы на протяжении трех последних десятилетий. При этом наибольшие успехи достигнуты в изучении пространственного размещения в агроценозах сорных растений. Это связано с биологическими особенностями данной группы вредных организмов, а именно их произрастанием на одном месте и приуроченностью к специфическим почвенно-экологическим условиям, пестрота которых может достигать 50% [4, 5]. На характер распространения сорных растений оказывает влияние неравномерное внесение органических и минеральных удобрений, неравномерная глубина обработки почвы, неравномерность высева культур [6-9]. В пространственном распространении сорных растений может иметь значение ландшафт, рельеф, а также микрорельеф поля, влияющие на приток тепла и влаги, промывной режим, а значит и на содержание доступных элементов питания [10, 11].

Изучению пространственной неоднородности фитосанитарного состояния посевов и посадок сельскохозяйственных культур в России, по-прежнему, уделяется мало внимания. Одной из причин такого положения является отсутствие методологии и четкого понимания каким образом это следует делать. Между тем, недостаток знаний об особенностях пространственного распространения вредных организмов сдерживает широкое внедрение системы точного земледелия, что позволило бы добиться существенного снижения пестицидной нагрузки на агроценозы и окружающую среду. Все это указывает на актуальность и практическую значимость изучения данного вопроса для дальнейшего развития научных основ и реализации в производстве дискретного применения средств защиты растений в системе точного земледелия.

Объекты и методы исследования

Разработки в области методологии изучения гетерогенности фитосанитарного состояния агроценозов проводились на экспериментальной базе Меньковского филиала Агрофизического научно-исследовательского института (Ленинградская область, Гатчинский район) на

протяжении последних 5 лет. С этой целью тестовые поля подвергались детализированному учету распространения и развития вредных организмов. Поле виртуально делилось на элементарные участки (8 × 8 м, 10 × 10 м), количество которых в зависимости от площади может составлять от 24 до 150 и более. Внутри каждого из участков с помощью разового наложения учетной рамки (0,25 м^2) или установки постоянных площадок (0,1 м^2 – культуры сплошного сева, 1,4 м^2 – пропашные культуры) определялся видовой и численный состав сорных растений, их проективное покрытие, плотности размещения вредных насекомых или степени наносимых ими повреждений культурным растениям, а также развитие болезней. С помощью GPS приемника AgGPS-132 фирмы Trimble (точность геопозицирования до 0,5 м) определялись координаты каждой учетной точки, которые в дальнейшем использовались для построения сетки проводимых учетов фитосанитарного состояния на цифровом изображении поля. Кроме того, применяли портативный ручной датчик GreenSeeker, с помощью которого определялось значение вегетационного индекса NDVI для каждой выделенной учетной площадки.

Одновременно с классическими наземными методами учета вредных организмов проводилась аэрофотосъемка поля с помощью беспилотного летательного аппарата «Геоскан 401», оснащенного камерой Sony Nex5 (16 МП). При дистанционной оценке фитосанитарного состояния агроценозов использовался нормализованный относительный индекс растительности NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), который тесно связан с индексом листовой поверхности и проективным покрытием вегетирующей растительности. Расчет данного индекса и составление NDVI карты исходных снимков осуществлялись с помощью программы QGIS.

Для анализа пространственного размещения вредных организмов в пределах поля рассчитывались коэффициенты вариации и агрегации. Первый из них представляет собой стандартное отклонение, выраженное в процентах к средней арифметической данной совокупности, второй – отношение дисперсии к среднему значению. Изменчивость принято считать незначительной, если коэффициент вариации не превышает 10%, средней – от 10 до 20% и значительной – более 20% [12]. Коэффициент агрегации равен 1 при случайном, больше 1 при групповом и меньше 1 при регулярном размещении особей [13].

Цифровые карты пространственного размещения вредных организмов в обследуемом поле составлялись с помощью программ ГИС АФИ, разработанной в лаборатории информационного обеспечения точного земледелия Агрофизического института, и Surfer 11.

Результаты и обсуждение

Для изучения особенностей пространственного размещения сорных растений лучше всего подходит паровое поле, которое освобождено от культурной растительности и где складываются максимально благоприятные условия для прорастания самых разных видов сегеталов, чьи семена и вегетативные зачатки размножения находятся в пахотном горизонте. Для достижения поставленной цели на всей площади поля были выделены 124 элементарных участка площадью 8×8 м. В середине каждого из участков с помощью наложения учетной рамки 0,25 м^2 проводилось определение видового и численного состава сорных растений, а также их проективного покрытия. Делалось это в начальный период роста сорных растений, когда у малолетних двудольных видов насчитывалось 2-4 настоящих листа, а многолетние двудольные находились в фазе розетки.

По результатам исследований выявлена пространственная неравномерность в размещении сорных растений в паровом поле, обусловленная особенностями его микрорельефа. На участках с микропонижениями рельефа фиксировалось низкое видовое и численное обилие, а также проективное покрытие сорных растений. При этом в большей степени от особенностей

микрорельефа поля зависело размещение малолетних видов сорных растений, чем многолетников, для которых характерно ярко выраженное произрастание куртинами [14].

Пространственную неоднородность в размещении сорных растений на паровом поле, вызванную сложным рельефом местности, удается визуализировать с помощью вегетационного индекса NDVI. Участки с микропонижением рельефа, за счет малого количества произрастающих сорных растений, их проективного покрытия и фитомассы, имели значения индекса NDVI в 2,3 и 3,1 раза меньшей величины по сравнению с большей частью поля и сильнозасоренными его фрагментами.

Для изучения пространственного размещения сорных растений в посадках картофеля поле виртуально делилось на 54 элементарных участка размером 10×10 м. В середине каждого участка размещалась постоянная площадка 1,4 м^2, на которой проводились детализирующие учеты численности сорных растений в отдельности по видам.

Результаты исследований указывают на хорошие перспективы использования индекса NDVI при оценке засоренности посадок картофеля в период до появления всходов культурных растений. Обнаружено, что величина NDVI наиболее тесно связана с численностью многолетних сорных растений (0,51-0,77, $p \leq 0,05$). Из полученных данных следует, что в довсходовый период слабозасоренные (до 50 экз./м^2) пыреем ползучим посадки картофеля имели значения индекса равное 0,16-0,20, среднезасоренные (51-150 экз./м^2) – 0,21-0,25, а сильнозапыреенные (200-500 растений/м^2) – 0,27-0,38. Коэффициенты корреляции между величиной NDVI и численностью другой сорной растительности были ниже или такая связь была статистически недостоверной [15].

Для посадок картофеля оказалась характерна пространственная неравномерность распространения сорных растений, которая подтверждается высокими коэффициентами вариации (43% и более) и агрегации (1,8 и более). Для многолетних сорных растений, особенно двудольных, просматривалась значительно более выраженная пространственная неоднородность в структуре засоренности посадок картофеля. Неравномерное размещение сорных растений являлось следствием разного содержания элементов питания и кислотности пахотного горизонта, обусловленного длительным применением минеральных удобрений в севообороте согласно схеме опыта [16].

Для изучения пространственного размещения сорных растений в посеве ярового ячменя виртуально выделялось 54 элементарных участка размером 10×10 м. Внутри каждого участка размещались по 2 постоянные площадки 0,1 м^2, на которых в фазу кущения ячменя проводился учет численности и проективного покрытия сорных растений в отдельности по видам. Таким образом, в анализе пространственного размещения сорных растений использовались данные по засоренности посева ярового ячменя с 108 постоянных учетных площадок.

Для посевов ярового ячменя оказалась характерна пространственная неравномерность распространения сорных растений, которая подтверждается высокими коэффициентами вариации (20% и более) и агрегации (1,8 и более). Неравномерность пространственного размещения оказалась свойственна всем массовым видам сорных растений. Коэффициенты вариации для мари белой по годам составляли 35,6-101,2, фиалки полевой – 29,9-101,4, пастушьей сумки – 42,2-275,0, торицы полевой – 60,1-124,1, пикульников – 66,9-110,8, дымянки аптечной – 63,4-236,4. Неравномерное размещение сорных растений являлось следствием разного содержания элементов питания и кислотности пахотного горизонта, обусловленного длительным применением минеральных удобрений, а для многолетних двудольных еще и особенностями их размножения. Внесение минеральных удобрений приводило к снижению неоднородности и изменению характера пространственного размещения сорной растительности в посеве ячменя.

При детализированном изучении пространственного размещения личинок жуков-щелкунов в соответствии со схемой опыта на поле картофеля выделялось 24 элементарных участка размером 15×15 м. В первой декаде мая внутри каждого участка бралась одна почвенная проба 0,25 м^2 на глубину 25 см, в которой велся подсчет численности личинок жуков-щелкунов, а в лабораторных условиях уточнялась их видовая принадлежность.

По результатам исследований была подтверждена пространственная неравномерность размещения личинок щелкунов на посадках картофеля. На это указывают значения коэффициентов вариации, которые для разных видов составляли от 62,3 до 485,7% в 2019 г. и от 78,8 до 245,8% в 2020 г. По результатам статистической обработки данных выявлено достоверное влияние минерального питания на численный состав личинок жуков-щелкунов и характер их пространственного размещения в агроценозе картофеля [17].

Выводы

Методология изучения пространственной гетерогенности фитосанитарного состояния оказалась успешно апробирована в паровом поле, посадках картофеля и посевах ярового ячменя на экспериментальной базе Меньковского филиала Агрофизического научно-исследовательского института. Была выявлена, охарактеризована и визуально представлена с помощью цифровых карт пространственная неравномерность в распространении сорных растений и личинок жуков-щелкунов. Выявленные случаи оказались обусловлены особенностями микрорельефа поля, а также следствием разного содержания элементов питания и кислотности пахотного горизонта, в результате длительного применения минеральных удобрений в севообороте согласно схеме опыта. Выявленная неравномерность пространственного размещения вредных организмов в агроценозах получила статистическое подтверждение на основе проведения дисперсионного анализа, расчета коэффициентов вариации и агрегации.

Список литературы / References

1. Архипов М.В., Данилова Т.А., Синицына С.М., Иванов А.И., Пасынкова .Н. Научные основы эффективного использования агроресурсного потенциала Северо-Запада России. СПб., 2018. 135 с.
2. Иванов А.И., Конашенков А.А., Иванова Ж.А., Воробьёв В.А., Фесенко М.А., Данилова Т.А., Филиппов П.А. Агротехнические аспекты реализации биоклиматического потенциала Северо-Запада России // Агрофизика. 2016. № 2. С. 35–44.
3. Иванов И.А., Иванов А.И. Научно-практические основы системы земледелия Северо-Западного района России. Великие Луки, 2006. 249 с.
4. Иванов А.И., Иванова Ж.А., Конашенков А.А., Филиппов П.А. Особенности методологии полевых исследований на современном этапе // Агрофизика. 2017. № 2. С. 9–19.
5. Иванов А.И., Конашенков А.А., Хомяков Ю.В., Фоменко Т.Г., Федькин И.А. Оценка параметров пространственной неоднородности показателей почвенного плодородия // Агрохимия. 2014. № 2. С. 39–49.
6. Humer J. Grunlandpflege vom Fruhjahp bis Herbst // Prakt. Landtechn. 1988. Vol. 41, № 5. S. 152–153.
7. Grigo E. Unkrautbekampfung auf Grunland // Rinderwelt. 1989. Vol. 14, № 4. S. 131–133.
8. Biller R.H. Verfahren zur Reduzierung des Aufwandes an chemischen Pflanzenschutzmitteln in der Pflanzenproduktion – eine betriebstechnische Analyse // Landbauforschung Völkenrode. 1994. Vol. 44, № 2. S. 205–215.
9. Wartenberg G. Heterogene Verteilung von Unkräutern auf Ackerflächen-umweltvert-rägliches Anwenden von Herbiziden // Gesunde Pflanzen. 1996. Vol. 48, № 1. S. 3–10.

10. Родионова А.Е. Борьба с сорными растениями в условиях моренного агроландшафта. Тверь, СПб., 2002. 72 с.
11. Назранов Х.М., Хуцинова М.М. Оценка пространственной неоднородности уровня плодородия и засоренности в пределах поля // Известия Горского государственного аграрного университета. 2018. Т. 55. № 2. С. 41–45.
12. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М.: Агропромиздат, 1979. 416 с.
13. Грейг-Смит П. Количественная экология растений. М.: Мир, 1967. 359 с.
14. Шпанев А.М., Смук В.В., Петрушин А.Ф. Влияние микрорельефа поля на пространственное размещение сорных растений // Агрофизика. 2020. № 4. С. 20–26.
15. Смук В.В., Шпанев А.М. Дистанционный мониторинг засоренности посадок картофеля в периоды до и после появления всходов // Агрофизика. 2019. № 4. С. 46–53.
16. Шпанев А.М., Смук В.В. Пространственное размещение сорных растений в посадках картофеля // Земледелие. 2019. № 2. С. 42–45.
17. Шпанев А.М., Смук В.В. Пространственное размещение личинок жуков-щелкунов при длительном применении минеральных удобрений на дерново-подзолистой супесчаной почве // Агрохимический вестник. 2021. № 3. С. 66–70.

METHODOLOGY FOR STUDYING THE SPATIAL HETEROGENEITY OF THE PHYTOSANITARY STATE OF AGROBIOCENOSES BY REMOTE SENSING

A. M. SHPANEV, V. V. SMUK
Agrophysical Research Institute,
St. Petersburg, Russia, ashpanev@mail.ru; vvsmuk@mail.ru;

Abstract. Methodology for studying the heterogeneity of the phytosanitary state of agrocenoses is developed on the experimental base of the Menkovsky branch of the Agrophysical Research Institute. For this purpose, the test fields are subjected to detailed registration of pest distribution and growth. Together with the classical ground-based registration methods, aerial photography of the field is carried out using the "Geoscan 401" unmanned aerial vehicle. A portable handheld sensor GreenSeeker is used, with the help of which the value of the vegetation index NDVI for each registry field is determined. To analyze the spatial distribution of pests within the field, the coefficients of variation and aggregation are calculated. Digital maps of the spatial distribution of pests are compiled using the GIS API and Surfer 11 programs.

Keywords. Digital maps, remote sensing, phytosanitary state of agrocenoses, NDVI, the coefficient of variation.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В РАСТЕНИЕВОДСТВЕ

Т. А. ЩЕГОЛИХИНА
ФГБНУ «Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса» (ФГБНУ «Росинформагротех»), пос. Правдинский,
schegolikhina@rosinformagrotech.ru

Аннотация. В статье представлены общие сведения о использовании беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве. Рассмотрены виды беспилотников и выполняемые ими операции для определения рельефа и точной площади, дефектов посева и проблемных участков, анализа эффективности защитных мероприятий, сопровождения мелиоративных работ и др.

Ключевые слова. растениеводство, точное земледелие, беспилотные летательные аппараты, аэрофотосъемка.

Введение

Одной из сфер гражданского применения беспилотной авиации является агропромышленный комплекс. Согласно находящимся в открытом доступе документам организаций Европейского союза потребительский спрос на применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в сфере сельского хозяйства и лесничества в период с 2015 по 2020 г. составил 13%. Среди стран, где происходит активное использование «сельскохозяйственных» беспилотников, можно выделить США, Китай, Японию, Бразилию, страны ЕС. В России рынок БПЛА для агрокомплекса развивается медленными темпами из-за сложностей в нормативно-правовом регулировании. Постановлением Правительства РФ от 25.05.2019 № 658 утверждены Правила учёта и использования беспилотных летательных аппаратов (Васильченко, 2020).

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является анализ применения беспилотных летательных аппаратов в растениеводстве. Исследование выполнено на основе обработки и обобщения полученной из открытых источников информации о БПЛА, используемых в сфере сельского хозяйства, для уточнения границ сельскохозяйственных земель, проведения мероприятий по защите растений и др.

Результаты и обсуждение

В настоящее время БПЛА широко используют для получения оперативной информации о состоянии сельскохозяйственных угодий: оценки состояния биомассы растений по нормализованному вегетационному индексу (NDVI), распознавания ареалов распространения болезней и вредителей культурных растений, оценки эродированности и влажности почвы, содержания в ней основных питательных элементов, состояния почвенного покрова (изреженность посевов после перезимовки, их полеглость, фенофазы развития растений) (Марченко, Личман, Смирнов, Мочкова, Колесникова, 2017).

В сельском хозяйстве используют два вида БПЛА, отличающиеся конструкцией и летными характеристиками:

– самолетного типа, или «летающее крыло», – наиболее удобный вариант для облёта больших территорий. Характеризуются высокими аэродинамическими показателями, наиболее подходят для мониторинга протяженных объектов или съемки в условиях значительного удаления. Однако из-за особенностей конструкции данный вид беспилотников должен быть в постоянном движении, поэтому не может работать в режиме зависания над объектом, а также осуществлять съемку на ограниченных территориях;

– коптерные беспилотники, или дроны, – могут оснащаться различным количеством винтов, что позволяет справляться с точечной съемкой в одном месте для обследования небольшого земельного участка, трехмерного моделирования, опрыскивания. Квадрокоптеры отличают простая конструкция, стабильность полета, надежность. К недостаткам БПЛА этого вида можно отнести небольшую скорость и ограниченное время полета из-за чего радиус действия их меньше, чем самолетных дронов.

Операции, выполняемые технологично оснащенными БПЛА приведены в таблице 1 (Беспилотники в сельском хозяйстве):

Таблица 1. Операции, выполняемые БПЛА в сфере сельского хозяйства

Аэрофотосъемка	Благодаря небольшой высоте полета является более детальной, чем съемка со спутника. Кроме того, беспилотные системы позволяют снимать даже в условиях порывистого ветра и облачности.
Видеосъемка	Производительность летательного аппарата при этом достигает 30 км/ч, что снижает временные и финансовые затраты по сравнению с использованием наземных видов обследования.
Мультиспектральная съемка	Является основанием для создания карт вегетационных индексов (NDVI, PVI, WDI, SAVI, LAI и др.), по которым можно оценить объем и прирост биомассы, содержание азота и хлорофилла в листьях растений.
3D-моделирование	Позволяет определять переувлажненные или засушливые территории, выемку грунта, создавать планы и карты увлажнения или осушения почвы, рекультивации участков или мелиорации земель.
Тепловизионная съемка	Осуществляется с применением всего спектра инфракрасного излучения: ближнего, среднего и дальнего диапазона. Дает возможность определять сроки дифференцирования точек роста, что напрямую влияет на урожайность и сохранение продуктивных свойств растений с сохранением наследственных возможностей сорта.
Лазерное сканирование	Применяется для анализа местности на труднодоступных или недоступных территориях. Обеспечивает получение точной модели высокой плотности с детальным отображением рельефа при работе в условиях сильной загущенности насаждений.
Точечное опрыскивание	Позволяет обрабатывать только больные растения, исключая попадание химикатов на остальной урожай

Применение аэрофотосъемки с БПЛА в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах обеспечивает решение широкого спектра задач для сельского хозяйства, например:

– уточнение границ сельскохозяйственных земель, контуров полей и посевных площадей позволяет более точно рассчитывать затраты на выполнение агротехнических операций и расходы на агрохимикаты;

– выделение локальных участков угнетенной растительности на поле под влиянием различных неблагоприятных факторов дает возможность увидеть очаги угнетенности, которые невозможно определить с земли. Для точного определения её причин после выделения ареала угнетенности проводят наземные исследования. Раннее определение очагов угнетенности позволяет произвести корректировку агротехнологий с целью сохранения урожая или адресную обработку посевов;

– определение участков полей, подверженных водной эрозии, позволяет скорректировать агротехнологию для предотвращения деградации почвенного слоя. Аэрофотосъемку проводят в ранневесенний период, сразу после схода снега.

Своевременно проведенный контроль выполнения агротехнических операций с помощью аэрофотосъемки позволяет избежать потерь потенциально возможной урожайности, а полученная информация и принятые на её основе оперативные решения – использовать весь потенциал поля и возделываемой культуры.

В настоящее время производители беспилотных систем для аэрофотосъемки и видеонаблюдения в России представлены небольшим числом компаний. Среди них можно выделить «Беспилотные технологии» (г. Новосибирск), «Геоскан» (г. Санкт-Петербург), «Автономные аэрокосмические системы — «ГеоСервис» (г. Красноярск) и «Zala Aero» (г. Ижевск). Спектр услуг, предоставляемых данными компаниями для сельского хозяйства, достаточно широк.

Например, компания «Геоскан» предлагает несколько пакетов услуг по специализированной аэрофотосъемке, которая выполняется с БПЛА Геоскан 201 одновременно двумя фотокамерами в видимом и ближнем ИК диапазонах.

При повышенной влажности почвы, на сложных рельефах поля, горных склонах, в поздние периоды роста и развития высокостебельных культур, при высокой плотности растений картофеля использование наземной техники для осуществления технологии дифференцированного внесения удобрений и химических средств защиты растений в системе точного земледелия затруднительно. В этой связи особую актуальность приобретает использование БПЛА не только для составления карт-заданий, но и дифференцированного внесения удобрений и пестицидов. В этих целях можно

использовать дрон с дистанционными цветными видеозаписями с привязкой к местности для визуального анализа снимков, с навигацией, видеокамерами и устройством, которое поможет распылять пестициды на поля с воздуха по команде оператора, опрыскивать поля микроудобрениями, регуляторами роста и защитными препаратами. Преимущество такой техники заключается в том, что она может применяться не только для распыления защитных препаратов, но и контроля посадок и своевременного определения сроков и участков обработки. Установленная на дроне видеокамера позволяет проводить видеосъемку посадок, проанализировав которую, можно оценить обстановку и определить болезни и их распространённость. Детальный просмотр частей растений, например листьев, позволяет немедленно проанализировать фотографию, принять необходимые меры для подтверждения потенциального заболевания и принятия соответствующих действий по его устранению (Личман, Марченко 2010; Марченко, Личман, 2015; Jacquemoud S., 2001)

Для дифференцированного внесения удобрений и пестицидов наиболее целесообразно использовать БПЛА вертолетного и винтокрылого типов, летающие на малых скоростях (30-40 км/ч) и небольших высотах (0,5-1,5 м) с большой полезной нагрузкой (300-400 кг), поскольку они наиболее полно соответствуют экологическим и природоохранным требованиям. ФГБНУ ФНАЦ ВИМ разработаны основные требования к качеству выполнения технологической операции по дифференцированному внесению удобрений и пестицидов с помощью беспилотных летательных аппаратов (Марченко, Личман, Смирнов, Мочкова, Колесникова, 2017).

Выводы

Использование беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве позволяет решить широкий круг задач и повысить эффективность выращивания сельхозпродукции. При разработке новых технологических приемов ведения сельскохозяйственного производства данные аэрофотосъемки используются для оценки мелиоративного и фитосанитарного состояния посевов, позволяют создавать карты вегетационных индексов PVI, NDVI. Видеомониторинг БПЛА посредством гиперспектральной, инфракрасной, тепловой съёмки, информирует о биофизических параметрах растений: площади листовой поверхности, стрессовом состоянии растений при повреждении вредными объектами, видовом составе и густоте стояния сорной растительности. Происходит своевременное выявление участков с риском возможного повреждения или гибели посевов, а также картографирование зоны поражения. Особую

актуальность приобретает применение БПЛА для дифференцированного внесения удобрений и пестицидов в системе точного земледелия.

Список литературы / References

1. Васильченко А. В. Инновации и цифровизация в защите растений // Плодоводство и виноградарство Юга России. 2020 г. № 61 (1). С. 161-172.
2. Марченко Л.А., Личман Г.И., Смирнов И. Г., Мочкова Т. В., Колесникова В. А. Дифференцированное внесение удобрений и пестицидов с использованием беспилотных летательных аппаратов // С.-х. машины и технологии. 2017. № 3. С. 17-23.
3. Беспилотники в сельском хозяйстве. – https://www.geomir.ru/publikatsii/bespilotniki-v-selskomkhozyaystve/.
4. Личман Г. И., Марченко Н. М. Космический мониторинг в системе точного земледелия // С.-х. машины и технологии. 2010. № 1. С. 27-31.
5. Марченко Н.М., Личман Г.И. Многофункциональный диагностический агрегат // Сел. механизатор. 2015. № 9. С. 14-15.
6. Jacquemoud S. Leaf optical properties: Astate of the art // In: Presented at 8th Int. Symp. Physical Measurements & Signatures in Remote Sensing. Aussois. France. 2001. P. 223-232.

THE USE OF UNMANNED AERIAL VEHICLES IN CROP PRODUCTION

T. A. SHCHEGOLIKHINA
«Rosinformagrotekh», Russia, pos. Pravdinsky, schegolikhina@rosinformagrotech.ru

Abstract. The article presents general information about the use of unmanned aerial vehicles in agriculture. The types of drones and the operations performed by them for determining the relief and the exact area, crop defects and problem areas, analyzing the effectiveness of protective measures, supporting land reclamation work, etc. are considered.

Keywords. crop production, precision agriculture, unmanned aerial vehicles, aerial photography.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ТОЧНОМ ЗЕМЛЕДЕЛИИ И ОПЫТНОМ ДЕЛЕ

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЗОННОЙ ДИНАМИКИ NDVI И LAI СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР ЮГА ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА (НА ПРИМЕРЕ СОИ)

А. С. СТЕПАНОВ[1], К. Н. ДУБРОВИН[2]
[1]ФГБУН «Хабаровский федеральный исследовательский центр ДВО РАН – Дальневосточный научно-исследовательский институт сельского хозяйства» (ХФИЦ ДВО РАН – ДВ НИИСХ), г. Хабаровск, stepanfx@mail.ru;
[2]ФГБУН «Хабаровский федеральный исследовательский центр ДВО РАН – Вычислительный центр ДВО РАН» (ХФИЦ ДВО РАН – ВЦ ДВО РАН), г. Хабаровск, nob_keeper_93@mail.ru.

Аннотация. В настоящее время использование спутниковых данных дистанционного зондирования Земли позволяет существенно повысить качество и доступность информационного обеспечения сельского хозяйства, в том числе при автоматизации процесса картографирования сельскохозяйственных земель, прогнозировании урожайности и планировании посевных площадей отдельных культур. Для решения задач классификации сельскохозяйственных культур и моделирования урожайности применяются модели, где в качестве независимых переменных используются, в том числе, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) и Leaf Area Index (LAI). По данным 2010-2017 гг. была изучена сезонная динамика NDVI и LAI для пахотных земель муниципальных образований субъектов Дальневосточного Федерального округа. Были получены графики сезонного хода индексов, выбраны функции, позволяющие с достаточной точностью аппроксимировать сезонный ход индексов. Для сои, являющейся основной сельскохозяйственной культурой южной части Дальнего Востока, были произведены расчеты максимальных значений NDVI и LAI, а также определена календарная неделя достижения максимума. Полученные результаты были использованы в регрессионных моделях прогнозирования урожайности, где в качестве независимых предикторов, помимо вегетационных индексов, использовались климатические характеристики. Проведенная кросс-валидация показала высокую точность регрессионных моделей, в частности, ошибка модели прогнозирования урожайности сои для разных муниципальных образований юга Дальнего Востока не превышала 15%.

Ключевые слова. Моделирование, индекс вегетации, урожайность

Введение

Моделирование урожайности сельскохозяйственных культур является важным аспектом управления сельским хозяйством на региональном уровне и позволяет оценить основные тенденции производства агропромышленной продукции, осуществить планирование посевных площадей, обеспечить выполнение контрактных обязательств. В последнее время расчет урожайности сельскохозяйственных культур проводится на основе данных дистанционного зондирования Земли, что повышает оперативность и точность прогноза, а также снижает трудоемкость операций оценки (Karthikeyan et al., 2020; Weiss et al., 2020). Ранее исследователями были установлены тесные взаимосвязи между урожайностью различных культур и индексами вегетации, в том числе LAI и NDVI. LAI, определяемый как площадь зеленых листьев с одной стороны на единицу площади земли, является важным параметром мониторинга условий роста сельскохозяйственных культур и часто используется в разных моделях урожайности, в том числе регрессионных (Ma et al., 2013; Peng et al., 2018).

NDVI является еще более распространенным индексом, применяемым в регрессионных моделях прогнозирования урожайности. NDVI обладает потенциально тесной связью с площадью ассимиляционной поверхности растений и содержанием в них хлорофилла, а следовательно, и с продуктивностью сельскохозяйственных культур как функции потенциальной эффективности их фотосинтетического аппарата (Ерошенко, 2014).

В существующих регрессионных моделях наиболее часто применяются максимальные значения композитов LAI и NDVI, достигаемые в ходе сезона вегетации, а также климатические показатели (Breunig et al., 2011; Шабанов и др., 2018). Это обусловлено тем, что максимум является наиболее

устойчивым показателем среди всех значений, и обеспечивает наиболее высокую точность модели (Berger et al., 2018).

Соя является одной из основных культур юга российского Дальнего Востока, при этом, начиная с XXI века, посевные площади сои в Амурской области, Приморском крае, ЕАО, Хабаровском крае превосходят площади всех остальных культур в сумме (Yi et al., 2020; Stepanov et al., 2020). В тоже время модели, включающие LAI, для моделирования и оценки урожайности сои на Дальнем Востоке ранее не рассматривались. Таким образом, в комплексном анализе методов для оценки урожайности сои актуально сравнить модель, использующую максимальные значения LAI в качестве одной из независимых переменных с соответствующей моделью, базирующейся на NDVI. Для получения объективной оценки необходимо определить точность моделей для разных районов юга Дальнего Востока.

Объекты и методы исследования

В работе были рассмотрены пахотные земли четырех муниципальных образований юга Дальнего Востока – Тамбовский и Михайловский районы Амурской области, а также Ленинский и Октябрьский районы ЕАО. Доля сои в выбранных районах в период 2010-2017 гг. составляли от 60 до 96% от общей площади пахотных земель. При построении регрессионной модели в качестве зависимой переменной рассматривалась средняя урожайность сои (y) в четырех исследуемых муниципальных районах в 2010-2017 гг., измеряемая в тоннах с гектара (т/га). В качестве независимых переменных модели рассматривались среднегодовые максимумы LAI (или NDVI) и количество дней (D) со среднесуточной температурой выше 10° С с начала года до даты наступления максимума. Еженедельные композиты LAI и NDVI по маске пахотных земель муниципальных образований были получены с использованием сервиса VEGA-Science (Savorskiy et al., 2016). Для расчета максимальных значений среди еженедельных композитов NDVI использовалась функция Гаусса (Stepanov et al., 2020).

Для оценки качества моделей была проведена кросс-валидация, где прогнозные значения урожайности рассчитывались для каждого удаленного из выборки года в период 2010-2017 гг. Для каждого года определялась относительная ошибка прогноза (%) в сравнении с фактическими значениями среднерайонной урожайности сои.

Результаты и обсуждение

Максимальные значения композитов LAI в 2010-2017 гг. приходились в среднем на 32 календарную неделю для Ленинского и Октябрьского районов, и на 31 неделю для Михайловского и Тамбовского районов. Максимумы NDVI для районов ЕАО достигались в среднем к 32-33 неделе, для Амурской области – к 31 неделе. На рисунке в качестве примера представлены еженедельные композиты и график аппроксимирующей функции Гаусса для Тамбовского района Амурской области в 2017 г (рис. 1).

Общее количество дней вегетации с начала года до 33 календарной недели для всех исследуемых территорий было примерно одинаковым – в среднем от 101,1 в Ленинском районе до 104,6 в Тамбовском районе.

Рассчитанные значения ежегодных максимумов среди еженедельных композитов NDVI и LAI были использованы для построения прогнозных регрессионных моделей для муниципальных образований юга Дальнего Востока. В таблице 1 представлены результаты кросс-валидации метода. Как было установлено, использование разных предикторов в регрессионной модели не оказывает значимого влияния на ошибку прогнозирования. Вместе с тем, медиана ошибки прогноза для Тамбовского района составила 7,2% для LAI и 8,8% для NDVI, для Октябрьского – 7,5% и 6,1%, для Ленинского – 14,2% и 13,7%, для Михайловского – 10,8% и 12,3%.

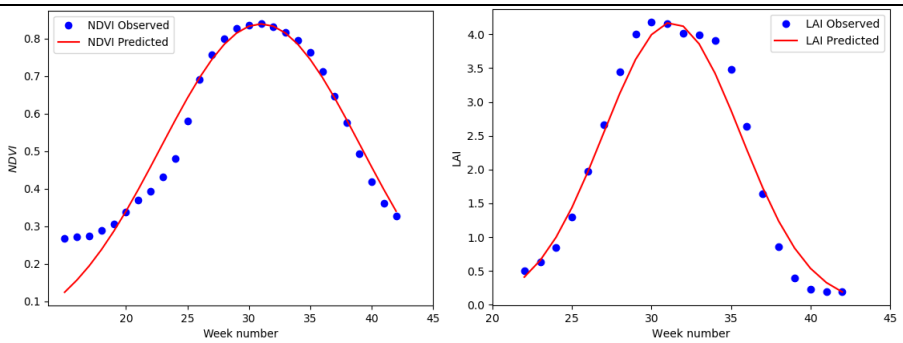


Рис. 1. Фактические и аппроксимированные значения еженедельных композитов NDVI и LAI для пахотных земель в период 15-42 календарная неделя (Тамбовский р-н., Амурская обл., 2017)

Таблица 1. Медиана ошибки прогноза (%) при проведенной кросс-валидации регрессионных моделей с разными предикторами по данным 2010-2017 гг.

Район	Модель с NDVI	Модель с LAI
Ленинский (ЕАО)	13,7	14,2
Октябрьский (ЕАО)	6,1	7,5
Михайловский (Амурская обл.)	12,3	10,8
Тамбовский (Амурская обл.)	8,8	7,2

Выводы

В ходе проведенного исследования было установлено, что для прогнозирования урожайности сои на уровне муниципальных образований может быть использована регрессионная модель, где в качестве предикторов применяются максимальное значение вегетационного индекса и количество дней вегетации с начала сезона до недели наступления вегетационного максимума. Проведенная кросс-валидация показала, что использование в уравнении регрессии максимальных значений как LAI, так и NDVI приводило в целом к хорошим результатам. Медиана ошибки прогноза находилась в диапазоне 6,1-14,2%, что вполне отвечает требованиям практики сельского хозяйства. Использование этого метода агропромышленными предприятиями позволит планировать посевные площади и в целом повысит устойчивость сельского хозяйства в дальневосточном регионе.

Список литературы / References

1. Karthikeyan L., Chawla I., Mishra A. K. A review of remote sensing applications in agriculture for food security: Crop growth and yield, irrigation, and crop losses // Journal of Hydrology. 2020. Vol. 586. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.124905
2. Weiss M., Jacob F., Duveiller G. Remote sensing for agricultural applications: A meta-review // Remote Sensing of Environment. 2020. Vol. 236. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111402
3. Ma G., Huang J., Wu W., Fan J., Zou J., Wu S., Assimilation of MODIS-LAI into the WOFOST model for forecasting regional winter wheat yield // Mathematical and Computer Modelling. 2013. Vol. 58. P. 634-643. DOI: 10.1016/j.mcm.2011.10.038
4. Peng Y., Zhu T., Li Y. [et al.]. Remote prediction of yield based on LAI estimation in oilseed rape under different planting methods and nitrogen fertilizer applications // Agricultural and Forest Meteorology. 2019. Vol. 271. P. 116-125. DOI: 10.1016/j.agrformet.2019.02.032
5. Ерошенко Ф.В. Оптические свойства растений и оценка их физиологического состояния // Бюллетень Ставропольского научно-исследовательского института сельского хозяйства. 2014. № 6. С. 84–90.

6. Breunig F. M., Galvão L. S., Formaggio A. R., Epiphanio J. C. N. Directional effects on NDVI and LAI retrievals from MODIS: A case study in Brazil with soybean // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2011. Vol.13. P. 34-42. DOI: 10.1145/1188913.1188915
7. Шабанов Н.В., Барталев С.А., Ерошенко Ф.В., Плотников Д.Е. Развитие возможностей дистанционной оценки индекса листовой поверхности по данным MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. № 15(4). С. 166-178. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-166-178.
8. Berger A., Ettlin G., Quincke C., Rodríguez-Bocca P. Predicting the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) by training a crop growth model with historical data // Computers and Electronics in Agriculture. 2018. Vol. 161. P. 305-311. DOI: 10.1016/j.compag.2018.04.028
9. Yi F., Gudaj R.T., Arefieva V. [et al]. Sino-Russian Cooperation on Soybean Development in the Russian Far East // American Journal of Economics and Sociology. 2020. Vol. 79. P. 1553-1586. DOI: 10.1111/ajes.12366
10. Stepanov A., Dubrovin K., Sorokin A., Aseeva T. Predicting Soybean Yield at the Regional Scale Using Remote Sensing and Climatic Data // Remote Sensing. 2020. Vol.12. DOI: 10.3390/rs12121936
11. Savorskiy V., Loupian E., Balashov I. [et al.]. VEGA-constellation tools to analize hyperspectral images // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2016. Vol. XLI-B4. P. 235–242. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLI-B4-235-2016

MODELING NDVI AND LAI CROPS SEASONAL DYNAMICS IN THE SOUTH OF THE FAR EAST (ON THE EXAMPLE OF SOYBEAN)

A. S. STEPANOV[1], K. N. DUBROVIN[2]
[1] Far Eastern Agriculture Research Institute, Khabarovsk, Russia, stepanfx@mail.ru;
[2] Computing Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia, nob_keeper_93@mail.ru.

Abstract. Currently, the use of satellite data of remote sensing of the Earth can significantly improve the quality and availability of information support for agriculture, including when automating the process of mapping agricultural land, forecasting yields and planning the acreage of individual crops. To solve the problems of crop classification and yield modeling, models are used, where, among other things, the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and the Leaf Area Index (LAI) are used as independent variables. According to the data of 2010-2017, the seasonal dynamics of NDVI and LAI for arable lands of municipalities of the subjects of the Far Eastern Federal District was studied. Graphs of the seasonal course of the indices were obtained, functions were selected that allow approximating the seasonal course of the indices with sufficient accuracy. For the main agricultural crops of the southern part of the Far East, including soybeans, oats and wheat, the maximum values of NDVI and LAI were calculated, and the calendar week of reaching the maximum was determined. The obtained results were used in regression models of yield forecasting, where climatic characteristics were used as independent predictors, in addition to vegetation indices. The conducted cross-validation showed high accuracy of regression models, in particular, the error of the soybean yield forecasting model for different municipalities of the south of the Far East did not exceed 15%.

Keywords. Modelling, vegetation index, yield.

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ СОВРЕМЕННОГО ПОЛЕВОГО ЭКСПЕРИМЕНТИРОВАНИЯ

А. И. ИВАНОВ, Ж. А. ИВАНОВА
ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт» (ФГБНУ АФИ), Санкт-Петербург, office@agrophys.ru

Аннотация. Построение многоуровневой системы экспериментов и её информационно-аналитического обеспечения под современные и перспективные задачи сельскохозяйственного производства должно в значительной мере опираться на использование ДДЗ и ГИС. В ходе апробации системы экспериментов фундаментально-прикладного и производственного уровней и их информационного обеспечения с применением средств и методов дистанционного зондирования в Меньковском филиале АФИ разработаны новые информационно-технические, агротехнологические средства управления продукционным процессом, позволяющие достигнуть 75–90 %-ой реализации генетического потенциала продуктивности сельскохозяйственных культур и 95 % - регионального биоклиматического потенциала.

Ключевые слова. Дистанционное зондирование, полевой опыт, метод, система экспериментов, информационное обеспечение.

Введение

Прогресс земледельческой науки последнего десятилетия во многом определялся технологическим прорывом в сфере её информационно-аналитического обеспечения. Но не малую роль при этом сыграла и коренная методологическая перестройка всей системы полевой экспериментальной деятельности, инициированная акад. Семёновым В.А. (Семёнов, 2000, 2004). Целостная многоуровневая подсистема информационно-аналитического обеспечения полевой экспериментальной работы стала, по сути, главным инструментом практической реализации новой концепции опытно-исследовательской работы (Полуэктов, Смоляр, Якушев, 1999; Иванов, Иванова, Конашенков, Филиппов, 2017).

Геоинформационные технологии, в т.ч. на базе методологии дистанционного зондирования, приняли ключевую роль в планировании, закладке и реализации полевых экспериментов фундаментально-прикладного и производственного уровней (Иванов, Иванова, Конашенков, Филиппов, 2017). Наибольшие перспективы при этом методология дистанционного зондирования имеет в решении проблем мониторинга и картографирования ландшафтно-экологических условий (Дубенок, Иванов, Янко, Чесноков, 2020; Иванов и др., 2021), агромелиоративного (Дубенок, Янко, Петрушин, Калиниченко, 2019; Янко, Петрушин, 2019; Янко, Петрушин, Митрофанов, Старцев, Кузенек, 2020) и фитосанитарного состояний агроэкосистем (Шпанёв, Лекомцев, Петрушин, Смук, 2017), составляющих фактологическую основу для принятия управленческих решений от стратегического до оперативного уровней.

Объекты и методы исследования

Методической основой многолетних теоретических и экспериментальных исследований служила многоуровневая система полевых экспериментов Меньковского филиала АФИ, а также серия длительных экспериментов и мониторинговых объектов в пределах Псковской и Ленинградской областей. При этом наряду со стандартизированными методами изучения и оценки объектов исследования применялись методы дистанционного зондирования с использованием БПЛА в видимой и ближней инфракрасной части спектра, высокочастотной подповерхностной георадиолокации и др.

Результаты и обсуждение

Фундаментально-прикладные полевые опыты закладываются в реально существующих условиях неоднородности комплекса агроэкологических условий и охватывают территории целых природно-территориальных комплексов (агроландшафтов) в случае с ландшафтными и

прецизионными опытами и всей зоны – в случае с кооперативными опытами. По этой причине занимаемые этими опытами площади исчисляются десятками и более гектаров.

Разработанная и апробированная в АФИ методология ландшафтного полевого опыта представляет собой сплав из исторически сложившихся методических подходов, принятых в ландшафтно-экологических исследованиях, принципиальных требований к постановке полевого опыта, как основного инструмента исследований в агрономической науке, новейших технологий информационного обеспечения и статистической обработки обширной научной информации. Основные методические особенности планирования и практической реализации ландшафтного полевого опыта сводятся: к активному использованию априорного компьютерного моделирования, как инструмента фундаментализации научного познания; сочетанию трансектного и ключевого метода в системе полевого опыта, а также серии методических подходов по изучению миграционных процессов; применению методов дистанционного зондирования компонентов агроландшафта; широкому использованию геоинформационных технологий и систем; методов параметрической и непараметрической статистики и др. Их обоснованное применение позволяет существенно сократить временные затраты на комплексное исследование до одной ротации севооборота.

Апробация метода радиолокационного метода в одном из ландшафтных опытов Меньковского филиала АФИ показала, возможность получения репрезентативных пространственно распределённых баз данных по таким принципиальным аспектам как уровень увлажнения почвы, положение капиллярной каймы, резкие переходы гранулометрического состава, зоны избыточного уплотнения, наличие подпочвенных гидротехнических объектов и др.

В ходе апробации этой методологии были установлены:

– факторы и закономерности пространственного распределения отдельных свойств почвы в типичных агроландшафтах Северо-Запада России. Пространственная неоднородность свойств почвы и продуктивности агроценозов определяется генезисом почвы и дифференциавцией ландшатно-экологических условий. Коэффициенты вариации наиболее важных агрохимических свойств почвы в ландшафтах варьируют от 10-30% в неконтрастных (пятнистости) до 50-120% - в контрастных структурах почвенного покрова (комплексы и мозаики). В последних вариабельность агрофизических свойств (содержание физической глины, влагоемкость, полевая влажность) может достигать 30-40%;

– информационная нормативная база фундаментально-прикладных основ точного земледелия и точных систем удобрения. Применение их информационно-технологических принципов позволило добиться повышения окупаемости затрат на окультуривание дерново-подзолистых почв в 1,6 раза. Полностью нивелировать даже точным окультуриванием действие неоднородности ландшафтно-экологических условий на продукционный процесс агроценозов не удалось. Однако снижение их влияния неоднородность продуктивности агроэкосистемы на фоне точных систем удобрения достигло 2–3 раз.

– в условиях выраженной неоднородности свойств почвы автоморфных озёрно- и водно-ледниковых равнин дифференцированному управлению продукционным процессом за счёт минеральных систем удобрения податливы 67–82% площади агроландшафта, органо-минеральных – 89–96%. Достижение 100 %-ного результата в управлении продукционным процессом в них связано с оптимизацией агрофизических свойств почвы в аккумулятивных полугидроморфных фациях агроландшафта за счёт мелиоративного воздействия;

– дифференцированное применение органических удобрений обосновано, только на фоне высокого уровня неоднородности свойств дерново-подзолистых почв, тогда как мелиорантов и минеральных удобрений – и на среднем уровне, минеральных подкормок – в т.ч. и на слабом уровне неоднородности. На фоне обоснованного дифференцированного применения

органических удобрений необходимость в пространственно распределённом внесении минеральных удобрений возникает весьма редко и приурочена исключительно к регулированию калийного питания культур;

– применение мелиорантов и удобрений в точных системах позволяет повысить окупаемость их действующего вещества в среднем на 18–72 % культурами овощного севооборота и на 12–32% – полевого, добиться 75–90 %-ой реализации генетического потенциала продуктивности сельскохозяйственных культур и до 95% - регионального биоклиматического потенциала.

Экспериментальная база производственного уровня имеет принципиальное значение, как для практического освоения инновационных разработок, так и для формирования целостной системы информационного обеспечения земледелия, а также мониторинга состояния сельскохозяйственных земель отдельной зоны или страны.

Отличительной особенностью современных производственных опытов является информационно-технический базис, опирающийся на программно-аппаратный комплекс точного земледелия. Уже на стадии выбора объекта исследования широко привлекаются материалы дистанционного зондирования. Они позволяют объективно, с необходимым для такого опыта уровнем точности оценить агромелиоративное состояние, пространственную неоднородность почв и спланировать пространственное положение вариантов эксперимента. Объективная оценка экономической эффективности предлагаемых к внедрению разработок (вариантов опыта) осуществляется при точном учете всей совокупности затрат и достигнутых результатов с использованием прецизионного информационно-технического оборудования и геоинформационных технологий. Их использование в производственном эксперименте позволяет существенно улучшить презентационные функции этого полевого опыта.

Заложенный в ООО «София» Тосненского района Ленинградской области с использованием этой методологии производственный эксперимент по проблемам управления воспроизводством плодродия почвы закустаренной залежи, показал, возможность наращивания продуктивности кормовых трав на 26-92% за счёт обоснованного применения местных мелиорантов. При этом дистанционное зондирование имело ключевое значение в определении очередности объектов освоения и выборе отдельных технологических вариантов культуртехнических работ.

В региональном масштабе требуется сочетание методов дистанционного спектроскопического зондирования с динамическим моделированием, формированием геоинформационных систем и баз данных, распространяемых на всю зону. Их методология опирается на принципы системности, севооборотности, технологической гетерогенности, репрезентативности и достоверности. Это требует значительной площади поля севооборота с набором типичных культур и охвата всей территории тестового полигона. Организация системы наблюдений – ключевой вопрос мониторинга. Исходя из сроков и периодичности повторения, требуется проведение четырёх групп наблюдений: базовых (оценка состояния объекта на момент начала наблюдений), ретроспективных (анализ результатов предшествующих наблюдений), периодических (не чаще одного раза в год) и оперативных (наблюдения за наиболее динамичными показателями). Ретроспективные и базовые наблюдения определяют стратегическое планирование комплекса мероприятий по адаптивной интенсификации земледелия на объектах мониторинга, периодические и оперативные – непосредственное пространственно дифференцированное управление продукционным процессом агроценозов.

Результатом базовых и ретроспективных наблюдений является оцифрованный и георефенсированный картографический материал, содержащий крупномасштабные почвенные карты структур почвенного покрова, а так же её тематические разновидности с детальным отражением мелиоративного состояния почв и сельскохозяйственных угодий (плоскостная и вертикальная эрозия, фактическая степень смытости-намытости почв, овражно-

балочная сеть и положение эрозионноопасных земель), дефляция, каменистость, закустаренность, уровень грунтовых вод и склонность почв к перевлажнению, положение систем осушения и орошения и др.). При этом в обработку должен вовлекаться весь имеющийся достоверный фактологический материал, накопленный в предшествующие годы, в том числе, и банк космических многозональных снимков с целью их предварительной верификации, уточнения географического положения и количественной оценки ряда важных характеристик почвенного покрова и посевов тестового полигона. На этом этапе выполняется комплексное почвенное обследование с использованием современного оборудования. Его оцифрованные результаты и картографические материалы представляются в растровом виде и формируют базы данных. Информационной основой для корректировки выступают цифровые модели рельефа и данные дистанционного зондирования. Важными разделами этих баз данных являются электронные агрофизический и агрохимический паспорта. Они представляют собой регулярно обновляемую географически привязанную базу данных.

Все параметры базовых наблюдений (за исключением морфогенетических) в зависимости от их динамических характеристик определяются в системе периодических наблюдений один раз в три-пять лет на территории всего полигона в процессе сплошного обследования. Часть периодических наблюдений, имеющих более динамичный характер свойств, воспроизводится ежегодно (обычно весной). Большая часть наблюдений за состоянием растительного комплекса также относится к оперативным и выполняется в течение полевого сезона неоднократно. Обычно время их проведения обусловливается фазами онтогенеза отдельных культур (например, кущение, выход в трубку, колошение у зерновых), в которые они отзывчивы на агротехническое вмешательство в продукционный процесс.

В число наиболее распространённых методов проведения наблюдений в мониторинге входят картографический, точечный, трансектный, а также методы нерегулярных и регулярных сетей. При этом исключительное значение имеет сплошная съёмка объекта мониторинга. Основными инструментами мониторинга агроэкосистем тестового полигона выступают многозональное дистанционное (авиакосмическое) зондирование, дистанционное спектроскопирование в видимой и ИК-области с использованием РБЛА, георeференсированное агрофизическое и агрохимическое обследование, георадиолокационное исследование и др.

Объективные данные стандартизированных контактных методов исследования почв и агроценозов тестовых агроэкологических полигонов имеют ключевое значение. Здесь они необходимы для дешифрирования результатов многозонального авиакосмического зондирования и обеспечения верификации динамических моделей продукционного процесса. Метрологические характеристики используемого в мониторинге инструментального оборудования должны отвечать особенностям объекта исследования и решаемым в нём задачам.

Знания о связи структуры и состоянии растительности с ее спектрально отражательными способностями, полученные в процессе верификации по наземным исследованиям, позволяют использовать аэрокосмические снимки для картографирования и идентификации почвенных условий, типов растительности и их стрессового состояния. Одним из ключевых методических вопросов при использовании материалов гиперспектральной съёмки остаётся их дешифрирование. Оно невозможно без систематических исследований в рамках сети тестовых агроэклологических полигонов. Полное решение задач калибровки материалов дистанционного зондирования состояния почвенного покрова сельскохозяйственных угодий возможно при обеспечении необходимых параметров пространственного (1–20 м), спектрального (0,1–1 мкм), временного (1–10 дн.) и географического разрешения материалов космической съёмки.

Соответствие многозональных космических снимков этим характеристикам позволяет проводить весьма достоверное картографирование структур почвенного покрова тестового полигона и ряда его важнейших агропроизводственных характеристик. При этом можно определять такие динамические свойства почвы и почвенного покрова в целом, как гумусированность, засолённость, влажность и влагозапас, эродированность и загрязнённость нефтепродуктами. Одним из главных условий высокого качества получаемой информации о составе почв является отсутствие растительного покрова или доля проекционного покрытия последним не более 30%. При монторинге неоднородности посевов, напротив, их проективное покрытие почвы должно превышать 50%.

Для повышения точности калибровки результатов дистанционного зондирования тестовых полигонов, особенно с учётом влияния на них погодных условий, в настоящее время необходимым является использование дополнительных систем дистанционного и контактного зондирования, базирующиеся на мобильных наземных комплексах и беспилотных летательных комплексах.

Выводы

Достижение максимального фундаментального и прикладного результата полевых исследований требует сочетания базовых методических принципов детерминизма, системности и развития с новейшими достижениями в области информационно-технического и математического обеспечения. Обоснованное построение многоуровневой системы экспериментов и её информационно-аналитического обеспечения под современные и перспективные задачи сельскохозяйственного производства должно в значительной мере опираться на использование ДДЗ и ГИС. В ходе апробации многоуровневой системы экспериментов и их информационного обеспечения с применением средств и методов дистанционного зондирования в Меньковском филиале АФИ разработаны новые информационно-технические, агротехнологические средства управления продукционным процессом, позволяющие достигнуть 75–90 %-ой реализации генетического потенциала продуктивности сельскохозяйственных культур и 95% - регионального биоклиматического потенциала.

Список литературы / References

1. Дубенок Н. Н., Иванов А. И., Чесноков Ю. В., Янко Ю. Г. Актуальные вопросы научного и кадрового обеспечения развития мелиорации в Нечерноземье // Вестник Российской сельскохозяйственной науки. 2020. № 6. С. 14-19.
2. Дубенок Н. Н., Янко Ю. Г., Петрушин А. Ф., Калиниченко Р. В. Перспективы использования данных дистанционного зондирования в оценке состояния мелиоративных систем и эффективности использования мелиорированных земель // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т.16. № 3. С. 96-104.
3. Иванов А. И., Иванова Ж. А., Конашенков А. А., Филиппов П. А. Особенности методологии полевых исследований на современном этапе // Агрофизика. 2017. № 2. С. 9-19.
4. Иванов А. Л. и др. Рекомендации по развитию агропромышленного комплекса и сельских территорий Нечернозёмной зоны Российской Федерации до 2030 года. М.: Почвенный институт имени В.В. Докучаева, 2021. 400 с.
5. Полуэктов Р. А., Смоляр Э. И., Якушев В. П. Концепция опытного дела и развитие современных методов исследований в агрономии и агрофизике // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 1999. № 2. С. 15– 17.

6. Семенов В. А. О необходимости и возможностях интенсификации экспериментальной работы / Современные проблемы опытного дела. С-Пб., 2000. Т. 1. С. 35–43.
7. Семенов В. А. Полевой опыт в аграрной науке (новая концепция). М.: РАСХН, 2004. 32 с.
8. Шпанев А. М., Лекомцев П. В., Перушин А. Ф., Смук В. В. Методика фитосантарного мониторинга агроландшафтов с использованием физико-технической базы точного земледелия. СПб.: ФГБНУ АФИ, 2017. 32 с.
9. Янко Ю. Г., Петрушин А. Ф. Методические рекомендации по обследованию, осушительных мелиоративных систем дистанционными методами. СПб.: ФГБНУ АФИ, 2019. 32 с.
10. Янко Ю. Г., Петрушин А. Ф., Митрофанов Е. П., Старцев А. С., Кузенек Е. Г. Проблемы диагностики неисправностей и ремонта осушительного трубчатого дренажа // Агрофизика. 2020. № 4. С. 55–59.

REMOTE SENSING IN THE PROBLEMS OF MODERN FIELD EXPERIMENTATION

A. I. IVANOV, ZH. A. IVANOVA
Agrophysical Research Institute, St. Petersburg, Russia, agrophys.inst@yandex.ru;

Abstract. The construction of a multi-level system of experiments and its information and analytical support for modern and promising tasks of agricultural production should be largely based on the use of DDZ and GIS. During the testing of the system of experiments at the fundamental-applied and production levels and their information support using remote sensing tools and methods, the Menkov branch of the API developed new information-technical, agrotechnological means of controlling the production process, allowing to achieve 75-90% realization of the genetic potential of agricultural productivity and 95% of the regional bioclimatic potential.

Keywords. Remote sensing, field experience, method, experimental system, information support

ИНФОРМАТИВНОСТЬ ВЕГЕТАЦИОННОГО ИНДЕКСА (NDVI) ПРИ ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЯ АГРОЦЕНОЗА И ПРОГНОЗА УРОЖАЙНОСТИ ЯРОВОГО ЯЧМЕНЯ С ПОДСЕВОМ МНОГОЛЕТНИХ ТРАВ

М. А. ФЕСЕНКО[1], А. М. ШПАНЕВ[2]
[1] ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт» (ФГБНУ АФИ), Санкт-Петербург, ramylek@yandex.ru;
[2] ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт» (ФГБНУ АФИ), Санкт-Петербург, ashpanev@mail.ru

Аннотация. Влияние суммарной фитомассы растительности посева ярового ячменя с подсевом многолетних трав на отражательные свойства, измеряемые вегетационным индексом NDVI, характеризуется высокими коэффициентами корреляции (0,79…0,88, p≤0,05). Наиболее тесная и устойчивая связь просматривается между максимальным значением данного индекса и надземной массой культуры (0,76…0,88, p≤0,05).

Достоверный прогноз зерновой продуктивности ярового ячменя с подсевом многолетними травами возможен по величине индекса NDVI, полученной с 5 по 7 неделю от появления всходов ярового ячменя. Применение средств защиты растений увеличивает точность прогноза.

Значения индекса NDVI во вторую половину вегетации могут отражать не только состояние культурных растений, засоренность посева, но и уровень развития подпокровной культуры. В первую очередь это касается слабо окультуренных почв и экстенсивных (без применения удобрений и средств защиты растений) способов ведения растениеводства, где воздействие на величину вегетационного индекса подпокровной культуры становится более значимым, чем влияние сорных растений.

Максимальные значения NDVI значительно варьируют по годам, зависят от уровня минерального питания и степени засоренности посевов, и не зависят от сроков посева и появления всходов.

Ключевые слова. яровой ячмень, многолетние травы, сорные растения, вегетационный индекс NDVI, применение минеральных удобрений, интегрированная система защиты растений.

Введение

Посев многолетних трав под покров ячменя модифицирует и усложняет взаимоотношения культуры и сорных растений, накладывает значительные ограничения на использование гербицидов. Однако данные о действии средств химизации на развитие ярового ячменя в качестве покровной культуры для смеси многолетних трав из клевера красного и тимофеевки луговой практически отсутствуют.

Цель исследования – установление возможности использования нормализованного разностного вегетационного индекса (NDVI) для контроля состояния посева и прогноза урожайности ярового ячменя с подсевом многолетних трав при разных уровнях агротехнологий в условиях Северо-Запада России.

Объекты и методы исследования

Исследования проводились в период 2015–2017 гг. в агроэкологическом стационаре Меньковского филиала Агрофизического НИИ (Ленинградская область, Гатчинский район) на легкосуглинистой дерново-слабоподзолистой почве, развитой на легком моренном суглинке.

Схема опыта двухфакторная: варианты с тремя длительно поддерживаемыми уровнями минерального питания (низкий – $N_0P_0K_0$, средний – $N_{65}P_{50}K_{50}$, высокий – $N_{100}P_{75}K_{75}$) и наложенными на них вариантами с интегрированной системой защиты растений (ИСЗР) и без защитных мероприятий (БО). Защитные мероприятия против вредных организмов проводились при условии превышения экономического порога вредоносности: предпосевное протравливание семян (Ламадор, КС; Систива, КС), обработка посевов гербицидами (Агритокс, ВК; Базагран, ВР) и фунгицидами (Прозаро, КЭ; Солигор, КЭ), в 2016 году – баковой смесью из гербицида и инсектицида (Базагран, ВР + Каратэ Зеон, МКС).

Изучение проводилось на сорте ярового ячменя Ленинградский, многолетние травы: клевер луговой Орфей и тимофеевка луговая Ленинградская 204.

Погодные условия в период вегетации близкие к среднемноголетней норме суточных температур, но различающиеся по количеству осадков и их распределению в течение сезона. Меньше нормы осадков выпадало в 2015 г. и 2017 г., близкое к среднемноголетней норме – в 2016 г. Сумма осадков в критический период для роста и развития ярового ячменя (появление всходов–кущение) в 2015 и 2017 гг. составляла около 80%, в 2016 г. - 43% от среднемноголетней нормы.

Визуальные учеты численности, проективного покрытия сорных, состояния культурных растений и еженедельные измерения NDVI портативным прибором GreenSeeker проводили на постоянных учетных площадках. Были получены вегетационные индексы и данные по урожайности и надземной сырой фитомассе ярового ячменя, сорных растений и многолетних трав в отдельности для каждой из 72 постоянных площадок на протяжении всех лет изучения.

Результаты и обсуждение

Установлено, что основной вклад в фитомассу изучаемого агрофитоценоза составляют растения ярового ячменя (52,2…84,9%). Долевое участие многолетних трав (8,5…45,2%) выше, чем сорных растений (2,6…8,2%).

Выявлены высокие коэффициенты корреляции (0,79…0,88, $p \leq 0,05$) между фитомассой агроценоза ярового ячменя с подсевом многолетних трав и вегетационным индексом NDVI. Наиболее тесная и устойчивая связь просматривается между максимальным значением данного индекса и надземной массой культуры (0,76, 0,82 и 0,88, $p \leq 0,05$). Слабее выражена линейная связь индекса с фитомассой сорных растений (0,36…0,39, $p \leq 0,05$).

Стартовые замеры вегетационного индекса NDVI, проводимые в фазу кущения ярового ячменя, указывают на наличие достоверных различий между неудобренным и удобренными вариантами только в 2017 году. В этот период действие удобрений только начинает сказываться на развитии культурных и сорных растений и не всегда находит отражение в изменении спектральных свойств посевов.

Максимальные значения NDVI значительно варьировали по годам, зависели от уровня минерального питания и степени засоренности посевов, и не зависели от сроков посева и появления всходов, определявшихся метеорологическими условиями. Под влиянием средних доз удобрений происходило увеличение индекса NDVI в среднем на 0,13, высоких доз - на 0,18. Проведение всего комплекса защитных мероприятий приводило к уменьшению значений индекса на 0,01…0,06. Более заметные изменения NDVI под действием ИСЗР отмечались на неудобренном варианте, наименьшие - в условиях слабой засоренности агроценоза.

Сезонная динамика индекса NDVI различалась на неудобренном и высокоудобренном вариантах опыта (рис.). Динамика NDVI для вариантов со средней дозой удобрений (N65P50K50) была аналогична и частично накладывалась на линии варианта с высокой дозой, поэтому на данных графиках не представлена. На вариантах без удобрений сезонный ход NDVI имел форму с двумя вершинами разной степени выраженности. Максимальные значения вегетационного индекса приходились на вторую вершину и смещались к концу вегетации. Пик максимума NDVI на данном варианте наступал позже на две недели как календарно, так и относительно сроков появления всходов. Графики дают основание предполагать, что в вариантах без внесения удобрений мы фиксируем в подавляющей степени не значения максимума NDVI ярового ячменя, а замеры показателя других компонентов посева – сорных растений и трав, в основном клевера, основной рост и развитие которого приходится на вторую половину вегетации ярового ячменя. В вариантах с удобрениями сезонный ход кривых NDVI имеет более сглаженную форму с плато

в районе максимальных значений. Здесь динамика индекса определяется накоплением фитомассы растениями ярового ячменя, которые в условиях густого стеблестоя подавляют рост многолетних трав и сорных растений. На это же указывают отрицательные коэффициенты корреляции между значениями вегетативной массы ярового ячменя и многолетних трав (r= -0,14…-0,30), культурных и сорных растений (r= -0,01…-0,09).

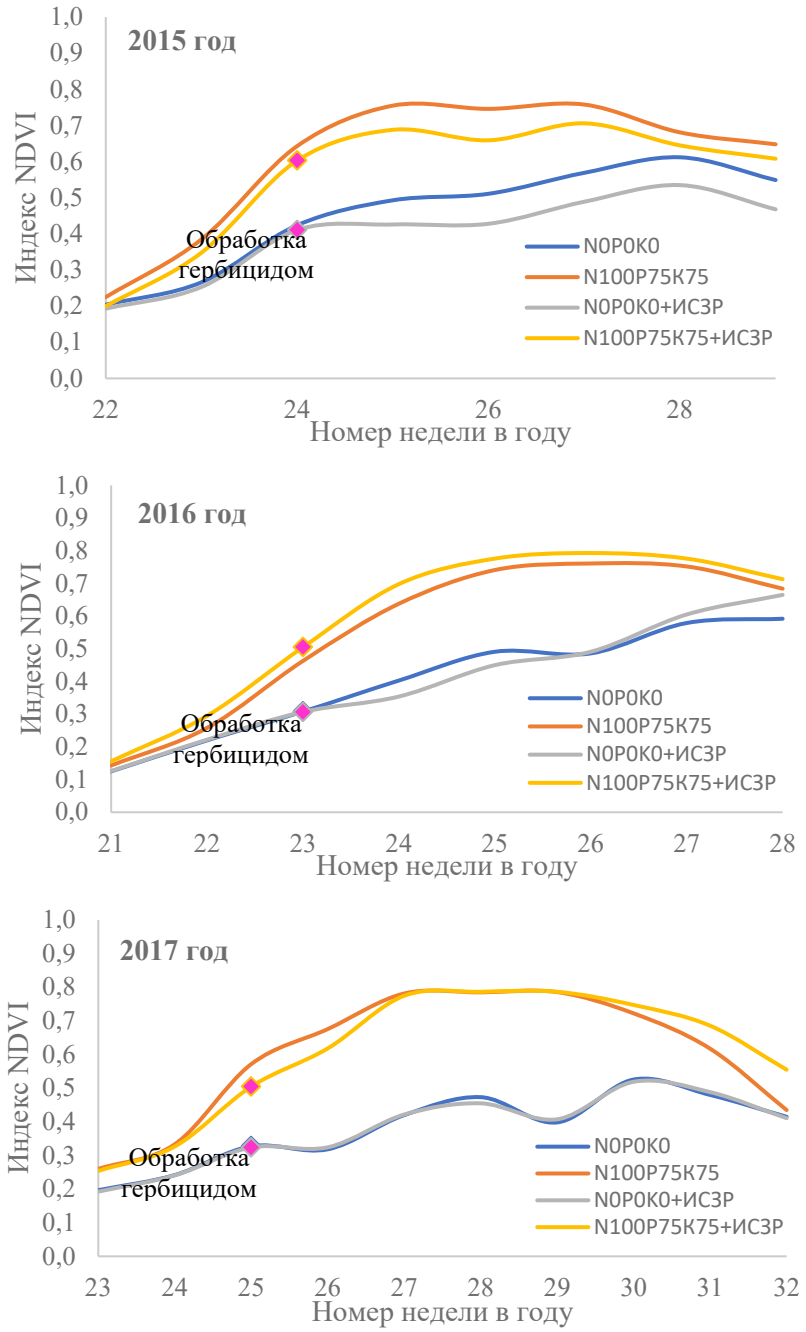


Рис. Сезонная динамика индекса NDVI в агроценозах ярового ячменя с подсевом многолетних трав

Проведение гербицидной обработки приводило к расхождению кривых индекса независимо от фона минерального питания. Особенно заметным оно было в 2015 г. при начальной более высокой засоренности посева. Это расхождение могло сохраняться на протяжении всего

дальнейшего периода вегетации компонентов агроценоза, как в 2015 и 2016 гг., или нивелироваться через две недели, как в 2017 г.

Корреляционный анализ показал наличие тесных и статистически значимых прямых зависимостей урожая зерна от величины индекса NDVI в период замеров, произведенных с 5 по 7 неделю считая от появления всходов ярового ячменя. Согласно полученным за годы исследований коэффициентам корреляции (0,86, 0,86 и 0,93, при p≤0,95) достоверный прогноз урожайности осуществим в фазы колошение и цветение ярового ячменя, особенно на фоне применения интегрированной системы защиты растений, где на протяжении всех лет исследований фиксировались более высокие коэффициенты корреляции индекса NDVI с урожайностью ярового ячменя.

Выводы

Вегетационный индекс NDVI, полученный с 5 по 7 неделю от появления всходов ярового ячменя информативен для достоверного прогноза урожайности ярового ячменя с подсевом многолетних трав. Применение средств защиты растений увеличивает точность прогноза.

Значения NDVI во вторую половину вегетации ярового ячменя с подсевом многолетних трав могут отражать не только состояние культуры, засоренность посева, но уровень развития подпокровной культуры. В первую очередь это касается случаев исходного низкого плодородия почвы и экстенсивных (без удобрений и средств защиты растений) способов ведения растениеводства. Поэтому использование подобных данных при прогнозировании может служить причиной низкого качества прогнозных моделей на Северо-Западе РФ, где в значительной мере присутствуют оба фактора.

INFLUENCE OF CHEMICALS ON THE OPTICAL PROPERTIES OF AGROCENOSIS OF SPRING BARLEY WITH PERENNIAL GRASSES

M. A. FESENKO[1], A. M. SHPANEV[2]

[1] *Agrophysical Research Institute, St. Petersburg, Russia, ramylek@yandex.ru;*

[2] *Agrophysical Research Institute, St. Petersburg, Russia, ashpanev@mail.ru*

Abstract. The total phytomass of sowing spring barley and perennial grasses correlates with the vegetation index NDVI (r=0.79...0.88, p≤0.05). The closest and most stable relationship is seen between the maximum value of this index and the aboveground mass of the crop (r=0.76...0.88, p≤0.05).

For a reliable forecast of the grain productivity of spring barley, NDVI data are needed from 5 to 7 weeks from the appearance of spring barley seedlings. The use of plant protection products increases the accuracy of the forecast.

The values of the NDVI index in the second half of the growing season can reflect not only the state of cultivated plants, the contamination of crops, but also the level of development of the subcrop culture. First of all, this applies to poorly cultivated soils and extensive methods of crop production. In these cases, the influence of grasses on the value of the vegetation index becomes more significant than the influence of weeds.

The maximum NDVI values vary significantly over the years. They depend on the level of mineral nutrition and the degree of contamination of crops, and do not depend on the timing of sowing and the appearance of seedlings.

Keywords. spring barley, perennial grasses, weeds, vegetation index NDVI, application of mineral fertilizers, integrated plant protection system

ОРГАНИЗАЦИЯ ПОЛЕВЫХ ОПЫТОВ ПО ФОРМИРОВАНИЮ ОПОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ИНТЕРПРЕТАЦИИ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ

Д. А. МАТВЕЕНКО, В. В. ВОРОПАЕВ
ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт» (ФГБНУ АФИ), dmatveenko@inbox.ru

Аннотация. По результатам проведенного прецизионного полевого эксперимента при контроле уровня минерального питания и с учетом погодных условий вегетации измерены оптические характеристики трех зерновых культур (озимая яровая пшеница, ячмень). Сформированная на основе проведенных измерений база данных будет использована для интерпретации данных дистанционного зондирования в оценке физиологического состояния посевов при оптимальных условиях и в условиях дефицита азотного питания. Проведен анализ зависимости значений индекса NDVI и урожайности изучаемых культур от внесенной дозы азота. Полученные результаты свидетельствуют, что вегетационный индекс NDVI позволяет диагностировать степень обеспеченности растений азотом лишь на ранних этапах развития, в то время как характеризующие активность фотосинтетического аппарата индексы отражения ChlRI, PRI, FRI и WRI могут быть успешно использованы для дистанционной оценки посевов и выделения зон неоднородности в течение всего вегетационного периода.

Ключевые слова: точное земледелие, внутриполевая пространственная неоднородность, зоны управления, дистанционное гиперспектральное зондирование, тестовые площадки, оптические характеристики растений, вегетационные индексы

Введение

С 2019 года на опытных полях АФИ проводятся полевые исследования, целью которых является разработка новых методов определения однородных зон управления в системе точного земледелия (ТЗ). В статье (Матвеенко и др., 2020) был выполнен детальный обзор и анализ используемых нами в исследованиях по ТЗ количественных подходов в оценке внутриполевой неоднородности на конкретных сельскохозяйственных полях с использованием мобильных наземных информационно-измерительных систем. Весьма перспективной стратегией для определения зон управления в ТЗ является использование аэрокосмической съемки сельскохозяйственных полей, позволяющее выполнять сплошной непрерывный мониторинг состояния посевов с одновременным охватом значительных площадей, что практически невозможно осуществить при наземных исследованиях. Особый интерес для решения указанной задачи представляют возможности гиперспектральной съемки, позволяющей генерировать огромные объемы данных, представляющие наборы спектров, состоящие из сотен полос в изображениях со значительным пространственным разрешением. В то же время объективно непростая задача интерпретации полученных данных ДЗЗ не позволяет использовать их непосредственно при управлении продукционным процессом сельскохозяйственных культур (Якушев и др., 2018). Отсутствие проблемно-ориентированных баз данных наряду с высокими ценами на спектроскопию высокого разрешения является причиной недостаточного количества исследований, связанных с использованием гиперспектральных сенсоров в сельском хозяйстве. Сотрудниками нашего отдела разработана структура и спроектирована база данных, ориентированная на решение задач точного земледелия (Митрофанов и др., 2021). Созданная БД позволяет наполнять ее аэрокосмическими снимками, формулами расчета индексов отражения и их систематизированными значениями, информацией об особенностях роста и развития различных сельскохозяйственных культур с учетом погодных условий вегетационного сезона, обеспеченности растений питательными элементами, водой, а также связи состояния посевов с их оптическими характеристиками.

Цель данной работы – формирование опорной информации для наполнения базы данных (БД) оптических характеристик сельскохозяйственных посевов в различных спектральных диапазонах и расчета индексов отражения, характеризующих физиологическое состояние посевов при

оптимальных условиях и в условиях дефицита азотного питания. В дальнейшем на основе сформированной БД будет разработано соответствующее программное обеспечение, которое позволит на основе анализа гиперспектральных снимков посевов, оперативного измерения спектров отражения от поверхности листьев в ходе вегетации и их сравнительной оценки определять зоны управления с различным уровнем азотного обеспечения растений и генерировать технологические карты для выполнения дифференцированных азотных подкормок.

Объекты и методы исследования

Для получения оперативных значений оптических характеристик сельскохозяйственных посевов в различных спектральных диапазонах и расчета индексов отражения на полях №№ 4, 9 и 6 опытного полигона Агрофизического института в осенне-весенний период 2019-2020 годов в посевах трех зерновых культур (озимая пшеница, яровая пшеница и ячмень) закладывались прецизионные эксперименты с тестовыми площадками, на которых вносились различные дозы удобрений, обеспечивающие заданную внутриполевую изменчивость по азотному питанию сельскохозяйственных культур.

Почва опытных полей дерново-подзолистая, супесчаная с содержанием в пахотном слое аммонийного азота - 10,91–15,59 мг/кг, нитратного азота – от 3,91–8,21 мг/кг, подвижного калия – 95–140 мг/кг, подвижного фосфора – 323-565 мг/кг, $pH_{сол.}$ – 5,0–5,7. Содержание подвижных соединений фосфора и калия определяли по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО. Почва на всех полях относится к группе с очень высоким содержанием фосфора (по Кирсанову), в то же время для нее характерен дефицит подвижного калия. В программе SAGA GIS, используя метод ординарного кригинга пространственной интерполяции, были построены пространственно-ориентированные карты распределения исследуемых характеристик почвы. Поле № 9 осенью 2019 г. было засеяно озимой пшеницей, на полях № 26 и № 4 весной 2020 г. были посеяны яровая пшеница и ячмень.

Агрометеорологические условия для зимующих растений сложились неблагоприятные. Кратковременный снежный покров или полное его отсутствие, колебания температуры, приводящие к интенсивному оттаиванию или промерзанию почвы – факторы, не позволяющие посевам озимых культур перейти в состояние покоя. Весенне-летний период вегетации 2020 г. можно отметить неравномерным выпадением осадков и в целом характерной для своего времени года температурой воздуха. Исключение составили погодные условия в мае, когда температурный фон был существенно ниже климатической нормы (аномалия среднемесячной температуры воздуха, по данным метеостанции Меньковского филиала, составила -3°С) с ночными заморозками вплоть до третьей декады, ГТК за период посев-кущение яровой пшеницы составил 4,44, ячменя − 2,54. Последняя декада августа была отмечена затяжными дождями, месячная сумма осадков в 1,7 раза превысила климатическую норму. В результате ГТК за период цветение-уборка для ячменя составил 3,16.

Поле № 9 осенью 2019 г. перед посевом было разделено на два участка: на участке № 1 были по результатам агрохимического обследования были внесены калийные удобрения (в форме хлористого калия), на участке № 2 калийные удобрения не вносили, то есть был искусственно сохранен дефицит содержания калия в почве. Внесение азотных удобрений в основном посеве озимой пшеницы было выполнено весной 2020 г.

На каждой культуре сразу после посева закладывали тестовые площадки (квадратные участки площадью по 100 м^2) с различным уровнем обеспеченности почвы подвижным азотом путем внесения возрастающих доз азотных удобрений. Тестовые площадки предназначены для формирования опорной информации и получения эталонных изображений посева с растениями,

испытывающими стресс, связанный с недостатком азотного питания на фоне оптимального обеспечения макроэлементами (фосфор и калий) и на фоне дефицита калия. Азотные удобрения на площадках вносили вручную (с использованием ранцевого опрыскивателя «Solo 473P» в виде водного раствора азофоски и аммиачной селитры) в диапазоне от 0 до 200 кг д. в./га с шагом 40 кг для озимой и яровой пшеницы, и от 0 до 150 кг д. в./га с шагом 30 кг для ячменя (от дефицита до оптимального количества азота для формирования урожайности культур на уровне 4,5-5,5 т/га).

В посеве озимой пшеницы на каждом из участков (№№ 1, 2) было заложено по шесть площадок, азотные удобрения в почву которых было решено вносить в два этапа − сразу после посева и после возобновления весенней вегетации. Такое решение было обосновано тем, что избыточное азотное питание с осени приводит к значительному снижению зимостойкости и перерастанию растений пшеницы. Сразу после посева в почву тестовых площадок была внесена аммиачная селитра из расчета 40 кг д.в./га (за исключением площадок с нулевым содержанием). Остальное количество азота на тестовых площадках было внесено равными дозами в виде подкормок в весенне-летний период 2020 года в фенофазы кущение – трубкования (по системе классификации BBCH - BBCH 25-27 и BBCH 30) и появление флагового листа (BBCH 37).

В посевах яровой пшеницы и ячменя закладывали по две полоски из шести тестовых площадок. Растения не способны усвоить внесенные однократно высокие дозы азота, значительная его часть будет промываться в нижние слои почвы, уменьшая эффективность удобрений и приводя к их незапланированным потерям. Кроме того, как известно, пшеница испытывает наибольшую потребность в азоте в период от фазы кущения до начала фазы выхода в трубку (28 % и 36 % общего потребления азота растением), что связано с увеличением прироста сухого вещества и площади листовой поверхности. Поэтому для эффективного обеспечения растений азотом в течении вегетации и полноценного развития посева на тестовых площадках было решено вносить удобрения раздельно в два этапа: две трети азота при посеве и треть – на заключительной стадии фазы кущения (BBCH 27-29). На первых полосках (обозначены далее Вариант 1) обеих культур при посеве вносили азофоску (2/3 дозы азота), при подкормке - аммиачную селитру (1/3 дозы азота). На вторых полосках (далее – Вариант 2) азотные удобрения вносили два раза в виде аммиачной селитры. В результате в Варианте 1 обеих культур растения были обеспечены комплексным сочетанием элементов (азот-калий-фосфор), а в Варианте 2 – в различной степени только азотом. Всего в итоге было заложено 36 тестовых площадок, по 12 на каждой из трех зерновых культур. На тестовых площадках в посеве ячменя растения в течении вегетационного сезона не обрабатывали гербицидами с целью выявления влияния засоренности посевов на искажение значений данных ДДЗ, в посевах озимой и яровой пшеницы обработка гербицидами проводилась.

Результаты и обсуждение

После полного внесения азотных удобрений в почву тестовых площадок в основные фенологические фазы развития зерновых культур осуществляли аэрофотосъемку посевов с использованием квадракоптера Геоскан 401, оснащенного мультиспектральной камерой RedEdge-MX компании Micasense (США), позволяющей получать изображения посевов одновременно в пяти каналах: синий (475/20 нм), зеленый (560/20 нм), красный (668/10 нм), красный край (717/10 нм) и ближний ИК (840/40 нм) (центральная длина волны/полная ширина на половине высоты) с последующим анализом полученных данных.

Параллельно с аэрофотосъемкой в те же даты на тестовых площадках проводили отбор образцов растений (не менее 12 штук с каждой тестовой площадки) для последующего измерения индексов отражения от поверхности растений с использованием миниатюрного

оптоволоконного спектрометра HR 2000 фирмы Ocean Optics (США). Измерения позволили получать оперативные значения оптических характеристик в различных спектральных диапазонах, соответствующие заданным условиям обеспеченности растений азотом на тестовых площадках, а также определять меру рассеяния света листом R_{800} и рассчитывать индексы отражения (содержание хлорофилла ChlRI, фотохимическая активность фотосинтетического аппарата PRI, содержание воды WRI, антоцианов ARI и флавоноидов FRI), характеризующие активность фотосинтетического аппарата. На рис. 1-2 приведены графики регрессионной зависимости, демонстрирующие тесную корреляционную зависимость между значениями индексов ChlRI и PRI и внесенной дозой азота для растений озимой пшеницы в варианте 1 на стадии «выход в трубку».

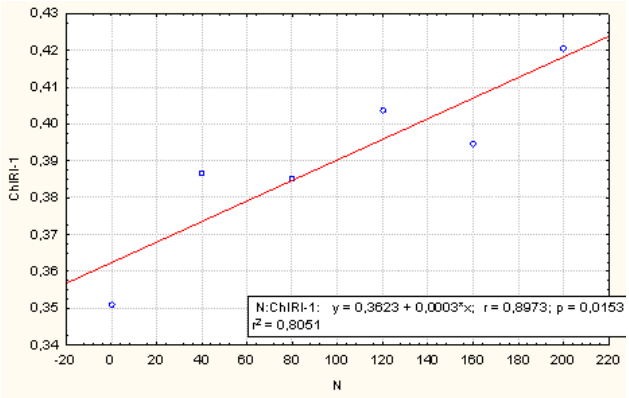


Рис. 1. Регрессионная зависимость индекса ChlRI от внесенной дозы азота

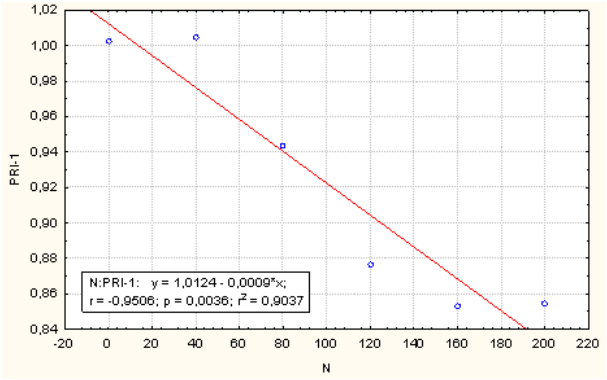


Рис. 2. Регрессионная зависимость индекса PRI от внесенной дозы азота

Подробный анализ полученных данных для яровой пшеницы по указанным выше индексам, свидетельствует о том, что совокупность индексов ChlRI, PRI, FRI и WRI, значения которых позволяет рассчитать база данных, может быть в течение всего вегетационного периода успешно использована для дистанционной оценки посевов и выделения зон неоднородности, в которых сложился дефицит азотного питания.

В исследованиях, связанных с дистанционной оценкой степени развития и состояния сельскохозяйственных посевов, широко используется вегетационный индекс NDVI, который является надежным показателем сформированной массы фотосинтезирующей растительности (Verhulst et al., 2010). Авторами был проведен анализ зависимости значений индекса NDVI и урожайности изучаемых культур от внесенной дозы азота. Аэрофотоснимки посевов, полученные в ключевые для анализа фазы вегетации, обрабатывались в программе QGIS Desktop, в результате были построены карты распределения индекса NDVI, затем с использованием встроенного инструмента анализа (SAGA -> Vector-Raster -> Raster statistics for polygons) были вычислены средние значения NDVI по пикселям снимка на тестовых площадках. Результаты проведенного анализа свидетельствуют о том, что вегетационный индекс NDVI позволяет диагностировать степень обеспеченности растений изучаемых культур азотом лишь на ранних этапах развития (фаза кущения), при этом оптимально на этой стадии растения озимой пшеницы развивались при внесенной дозе азота 120 кг/га, яровой пшеницы – при дозе 80 кг/га. Далее по мере развития растений и формирования сомкнутого растительного покрова данный индекс не гарантирует надежных результатов по оценке азотного обеспечения растений.

Выводы

По результатам проведенного прецизионного полевого эксперимента разработана и формируется база данных оптических характеристик сельскохозяйственных посевов в различных спектральных диапазонах и индексов отражения, характеризующих физиологическое состояние посевов при оптимальных условиях и в условиях дефицита азотного питания. Проведенный анализ зависимости значений индекса NDVI и урожайности изучаемых культур от внесенной дозы азота показал, что вегетационный индекс NDVI позволяет диагностировать степень обеспеченности растений азотом лишь на ранних этапах развития. Индексы отражения ChlRI, PRI, FRI и WRI, характеризующие активность фотосинтетического аппарата, могут быть успешно использованы для дистанционной оценки посевов и выделения зон неоднородности в течение всего вегетационного периода.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-29-05184 мк.

Список литературы / References

1. Состояние и перспективы создания новых методов количественной оценки внутриполевой изменчивости в точном земледелии / Д. А. Матвеенко, В. В. Воропаев, В. В. Якушев и др. // Агрофизика. 2020. № 1. С. 59–70. DOI: 10.25695/AGRPH.2020.01.09
2. Якушев В. П., Блохина С. Ю. Состояние и перспективы использования дистанционного зондирования Земли в интересах сельского хозяйства // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. № 5. С. 257–262. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-257-262
3. Митрофанов Е.П., Митрофанова О.А., Петрушин А.Ф. Экспериментальные данные для решения задач точного земледелия // Свидетельство о государственной регистрации базы данных. 2021. № 2021620305
4. Verhulst, N., Govaerts B. The normalized difference vegetation index (NDVI) GreenSeeker TM handheld sensor // Toward the integrated evaluation of crop management. Part A: Concepts and case studies. – Mexico: D.F.; CIMMYT, 2010. – 14 p.

ORGANIZATION OF FIELD EXPERIENCES ON FORMATION OF REFERENCE INFORMATION FOR AEROSPACE IMAGES INTERPRETATION

D. A. MATVEENKO, V. V. VOROPAEV
Agrophysical Research Institute

Abstract. The optical characteristics of three grain crops (winter spring wheat, barley) were measured according to the results of a precision field experiment with monitoring the level of mineral nutrition and taking into account the weather conditions of the growing season. The formed database allows, on the basis of remote sensing data, to assess the physiological state of crops under optimal conditions and under conditions of nitrogen nutrition deficiency. The dependence of the NDVI values and the crop yield on applied nitrogen fertilizer rates was analyzed. The obtained results indicate that the NDVI characterizes the degree of nitrogen supply of plants only at the early stages of the development, while the reflection indices ChlRI, PRI, FRI, and WRI characterizing the activity of the photosynthetic apparatus can be successfully used for remote assessment of crops and identifying homogeneous management zones in throughout the growing season.

Keywords: precision agriculture, within-field variability, management zones, remote sensing, test sites, optical characteristics of plants, vegetation indices

АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ СОВРЕМЕННОГО ТОЧНОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ

Л. Б. МЕТЕЧКО, А. Е. СОРОКИН, И. С. ПРОХОРОВ
Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), Москва, prokhorovis@mai.ru

Аннотация. Представлена краткая история развития аэрокосмического мониторинга. Описаны возможности получения информации для рационального природопользования и ведения сельского хозяйства. Даны технические характеристики средств дистанционного зондирования Земли. Представлен широкий спектр задач практического применения аэрокосмического мониторинга в сельском и лесном хозяйстве.

Ключевые слова. Авиация и космонавтика, летательные аппараты, мониторинг поверхности Земли, сельскохозяйственное производство, рациональное природопользование, точное земледелие.

Введение

Площадь сельскохозяйственных территорий в нашей стране (согласно данным ежегодного статистического справочника России) – 2 200 км^2, что составляет около 10% от пахотных угодий во всем мире. Если учесть, что около 60% территорий находятся в области рискованного земледелия, то становится очевидной высокая значимость повышения эффективности современного отечественного земледелия.

Активно развивающееся сельское хозяйство как любая современная отрасль опирается на необходимое информационное обеспечение, так как результаты вложенного труда зависят от климатических, географических, ландшафтных, биологических и других факторов. Любое современное производство требует комплексного высокотехнологичного менеджмента.

Точное земледелие – новый термин в определении высокотехнологичного ведения сельскохозяйственных работ с применением технологий глобального позиционирования (GPS), географических и информационных систем (GIS) [1]. Поэтому современный агропромышленный комплекс уже не способен существовать без аэрокосмического мониторинга (рис. 1) [1-4].

Только точное (координатное) земледелие, владея инновационными средствами высокотехнологического агроменеджмента, способно обеспечить значительное улучшение состояния полей и результатов всех видов сельскохозяйственных работ по нескольким основным направлениям:

– агрономическое: с учетом реальных потребностей культуры в удобрениях;
техническое: совершеннее тайм-менеджмент на уровне хозяйства (в т.ч. улучшается планирование сельскохозяйственных операций);
– экологическое: сокращается негативное воздействие сельхозпроизводства на окружающую среду (более точная оценка потребностей культуры в азотных удобрениях приводит к ограничению химического загрязнения почв);
– экономическое: рост производительности и/или сокращение затрат повышают эффективность агробизнеса (в т.ч. сокращаются затраты на получение конечного продукта).

Электронная запись и хранение истории полевых работ и урожаев может помочь как при последующем принятии решений, так и при составлении специальной отчетности о производственном цикле, которая все чаще требуется законодательством развитых стран.

В наш информационный век большую роль играет информационная обеспеченность любых процессов, для оптимального принятия решений эффективности менеджмента. Не избежало этой участи и сельское хозяйство, поскольку информационное обеспечение этой отрасли играет основополагающую роль для получения положительного итогового результата.

Рис. 1. Так выглядит современное точное земледелие

Процесс управления большим фермерским хозяйством, обладающим значительным парком различной сельскохозяйственной техники, всегда считался непростым видом деятельности. Имея в своем распоряжении необъятные поля, фермеры зачастую просто физически не могут отследить все изменения, которые происходят с их сельхозугодиями, рационально разместить технику, осуществить срочные и необходимые агротехнические мероприятия. В этом смысле информационная система мониторинга и получение точных данных о состоянии территорий позволит прогнозировать результат и становится основополагающей в успешном развитии современного сельского хозяйства. Ведь своевременные управленческие решения – это прежде всего точная информация о времени осуществления посева, полива или подкормки. В сельском хозяйстве эта информация критически важна и зачастую определяет результат всей деятельности агросистемы [5].

Оперативный мониторинг ситуации с фазами вегетации посевных культур – одна из постоянных задач главного агронома. Вегетация проходит через несколько критических для роста периодов. Первый такой период приходится на посев. Например, всходы в случае недостатка влаги могут быть изреженными, поэтому обследование посевов необходимо для объективной оценки их состояния (рис. 2) [6].

Основная цель наблюдений с помощью аэрокосмического мониторинга – своевременное определение необходимости проведения любых мероприятий на каждом поле вплоть до подсева, пересева и внесения удобрений. Важный аспект – периодичность. Все поля должны обследоваться не менее двух раз в неделю и после каждого случая экстремальных погодных явлений – сильных дождей, града, шквалистого ветра. Исследования, проводимые на земле, не всегда способны в полном объеме провести анализ и оценить состояние сельскохозяйственных угодий, оперативно вмешаться в процессы и осуществить необходимый контроль за посевом, уборкой, подкормкой, поливом и пр.

Аэрокосмический мониторинг – система наблюдения и контроля при помощи самолетных, вертолетных, беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) аэростатных средств, спутников и спутниковых систем [7].

Рис. 2. Условная схема мониторинга

Аэрокосмический мониторинг подразделяется на:

– Дистанционный мониторинг – совокупность авиационного и космического мониторингов. Иногда в это понятие включают слежение за средой с помощью приборов, установленных в труднодоступных местах Земли (в горах, на Крайнем Севере), показания которых передаются в центры наблюдения с помощью методов дальней передачи информации (по радио, проводам, через спутники и т.п.);

– Авиационный мониторинг осуществляется с самолетов, вертолетов и других летательных аппаратов (включая парящие воздушные шары и т.п.), не поднимающихся на космические высоты (в основном из пределов тропосферы);

Космический мониторинг – мониторинг с помощью космических средств наблюдения.

Перечислим примерный перечень необходимой информации, которую может предоставить аэрокосмический мониторинг для современного агроменеджмента:

- инвентаризация сельхозугодий, создание электронных карт полей и кадастр;
- мониторинг техники;
- данные для расчета эффективной логистики;

- состояния посевов и полей под парами;
- сопровождение и контроль агротехнических мероприятий;
- качественная оценка состояния сельскохозяйственных культур на различных стадиях вегетации;
- оценка всхожести посевов;
- оценка текущего состояния посевов;
- оценка созревания посевов;
- мониторинг темпов уборки сельскохозяйственных культур;
- выявление факторов негативного природного, техногенного и антропогенного воздействия на растительность (засуха, переувлажнение, заморозки, вредители и пр.);
- выявление полей, имеющих отклонения от норм развития, их оценка и систематизация, в т.ч. выявление фактов заболеваемости сельскохозяйственных культур.

Аэрокосмический мониторинг включает в себя различные средства дистанционного зондирования территорий и с течением времени как он сам, так и средства зондирования совершенствуются вместе с достижениями техники и технологий.

Как изменились задачи и технологии приборов зондирования в наши дни и какими преимуществами и недостатками обладают современные средства аэрокосмического мониторинга, рассмотрим в предложенной статье.

Авиамониторинг в сельском хозяйстве

Впервые в нашей стране авиацию в сельском хозяйстве начали применять в 1925 г. Следует отметить, что это было время, когда земля еще не остыла от 10 лет революции и гражданской войны. Именно в том году правление общества «Авиахим» приняло решение использовать авиацию против итальянской саранчи, распространение которой приняло угрожающие размеры на плодородных землях Украинской республики. «…Изюмский округ в конце июня во многих местах имел вид поля сражения, – саранча заняла 20-25 тыс. десятин: ее плотность достигала 250 штук на 1 квадратный метр» [8].

Итак, 25 (по другим данным – 29) июня 1925 г. самолет «Красный Финработник Одессщины», пилотируемый известным летчиком, участником двух войн, героем гражданской войны Александром Тихоновичем Бербеко вылетел из Харькова в село Савинцы Изюмского округа. Полеты производили с 5 до 8 часов утра и с 17 до 20 часов вечера. В первый же день удалось запылить более 500 га. Технические характеристики самолета примерно соответствовали техническим характеристикам современных сверхлегких летательных аппаратов: двигатель мощностью 110 л.с.; скорость полета – 80-130 км/ч, грузоподъемность 150 кг, максимальное время пребывания в воздухе – 3,5 часа. Пришлось работать 8 дней (2 000 десятин – план). Обработано 1 500 тыс. десятин. Около 70% охваченной площади уже очищено от саранчи. Полеты А. Т. Бербеко были на высоте 3-5 м.

С этой первой операции сельскохозяйственная авиация применяется для распыления пестицидов и удобрений, несколько реже — для авиасева (гидросеяния (гидропосева) — посева семян с потоками воды под давлением).

В качестве базового самолета, адаптируемого для сельскохозяйственных задач, чаще всего использовали спроектированные для внеаэродромной эксплуатации массовые самолеты-бипланы, для которых в русской культуре для обозначения сельскохозяйственной авиации распространилось понятие «кукурузник». В советское время в таком качестве в подавляющем большинстве случаев использовали «У-2» или «Ан-2» (рис. 3) [9].

Примером специально спроектированного сельскохозяйственного самолета может служить входящий в Полевой авиационный комплекс сельского хозяйства (ПАК СХ) самолет Т-500 [10-12].

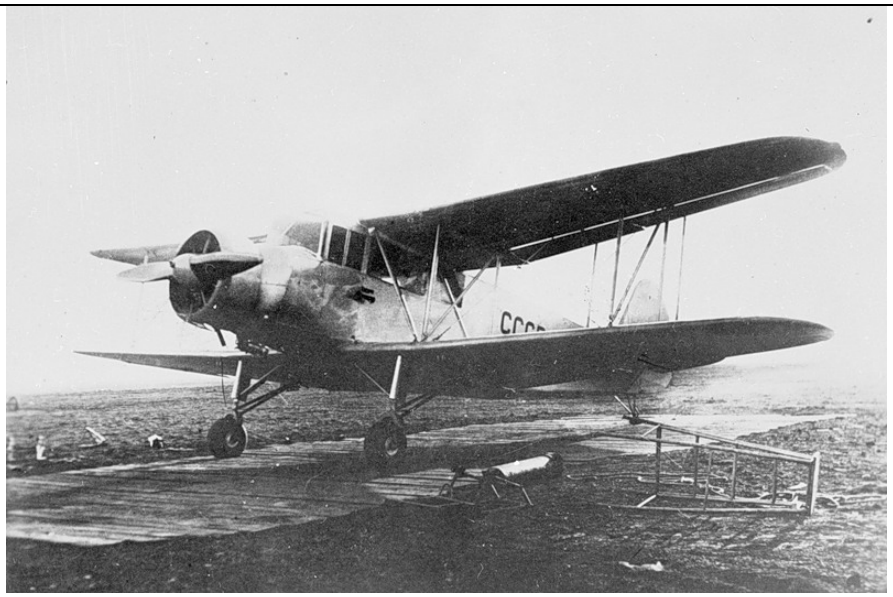


Рис. 3. Легкие самолеты, применяемые в сельском хозяйстве «Ан-2»

Таким образом, начиная с 1925 г., пилоты сельхозавиации на «аннушках», как любовно и поныне называют «Ан-2», анализируют состояние полей, ведут подкормку посевов, борются с сорняками, обеспечивают дефолиацию хлопчатника перед машинной уборкой. Сравнительно высокая полезная нагрузка — 1 250 кг химикатов — в сочетании с простотой конструкции и неприхотливостью к аэродромам сделали «аннушку» популярной не только в нашей стране, но и за рубежом. Недаром и американцы даже в конце 1970-х гг. считали «Ан-2» лучшим в мире сельскохозяйственным самолетом.

Однако время шло и «Ан-2» практически исчерпал свои возможности. Малый вес груза химикатов. Условия труда летчиков далеки от комфортных. Зимой в его кабине холодновато, летом жарко. Она должным образом не герметизирована – в нее проникают взвеси ядохимикатов и удобрений и работать пилотам приходится в респираторах. Управлять самолетом можно только вдвоем, а летчики – это очень дорогие специалисты.

Нельзя обойти стороной тему о том, что именно в Московском авиационном институте отдано немало лет и сил созданию специализированного сельхозсамолета. Этому новому самолету посвящались и дипломные работы выпускников МАИ, и разработки, которые велись молодыми специалистами – нашими выпускниками и аспирантами. Эта тема подробно рассмотрена в монографии «Проектирование легких самолетов» [13]. Наконец, в 1985 г. выкристаллизовался и был готов к производству лучший агросамолет – «Грач-4». Это был многоцелевой самолет, способный садиться и взлетать с неподготовленных грунтовых площадок, удобный и комфортный для летчика, и безопасный для экипажа при применении ядохимикатов. «Грач-4» обладал непревзойденной устойчивостью к «сваливанию» при разворотах на низкой скорости (рис. 4).

Интересен самолет был и тем, что впервые вместо второго пилота был компьютер, выполняющий функции второго пилота и позволяющий пилоту полностью направить свое внимание на точное выполнение поставленной задачи. Фюзеляж этого самолета предполагался из композитного материала, устойчивого к ядохимикатам, и только крылья оставались алюминиевыми, как у большинства воздушных судов. Самолет прошел все необходимые испытания (рис. 5).

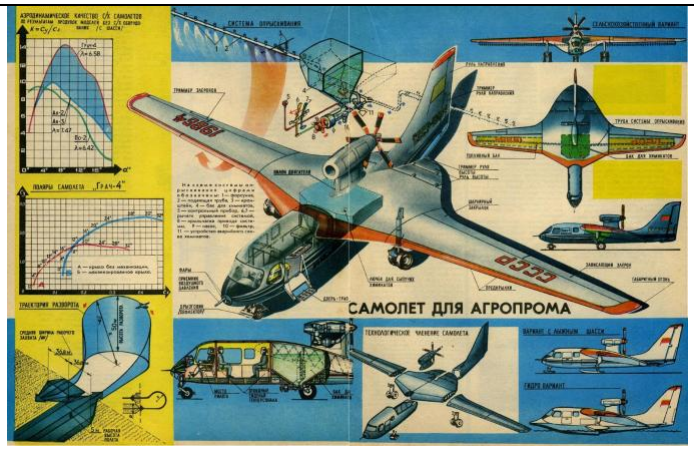


Рис. 4. Самолет для Агропрома, разработанный в МАИ, «Грач-4»

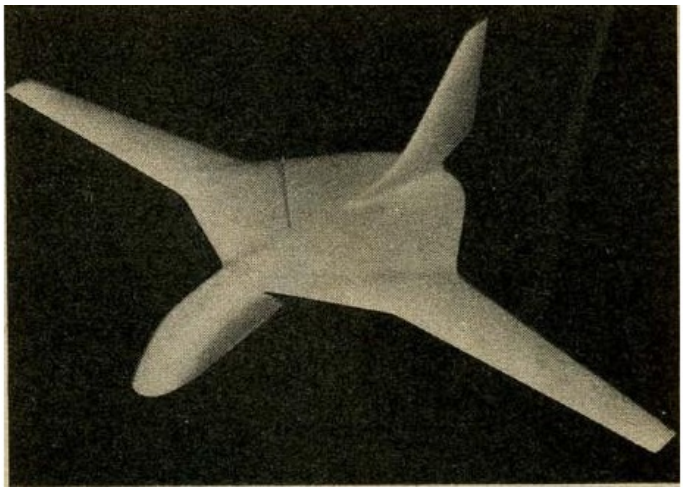


Рис. 5. Изящная модель «Грача» для испытаний в аэродинамической трубе

Нельзя сбрасывать со счетов, что, начиная с 1970-х гг., наряду с самолетами для решения сельскохозяйственных задач использовались и винтокрылые воздушные суда (вертолеты). Несмотря на то, что в количественном соотношении «кукурузники» явно лидировали, но все же у винтокрылых машин были преимущества. Для качественного опрыскивания растений от вредителей воздушное судно должно лететь низко – на расстоянии 3-6 м от земли. В противном случае распределение раствора будет неравномерным. Такая высота полета немыслима для самолета, а для вертолета – пожалуйста! (рис. 6) [14]. Еще одно преимущество вертолетов хорошо заметно во время искусственного осеменения полей, которое позволяет повысить урожайность. Сначала для этой цели использовали самолеты в паре: между ними натягивали веревку, которая провисала, доставая до колосьев, и стряхивала с них семена. Но у этого способа есть серьезные недостатки: если пилот первого самолета чуть превысит скорость, веревка натянется и не затронет растения. Если же другой пилот скорость сбавит, веревка провиснет слишком сильно, вырывая растения с корнем. Вертолету же веревка не нужна. Завихрений воздуха от вращения винтов на расстоянии 3-6 м от земли достаточно, чтобы стрясти все семена с культур [15]. С 1970-х гг. в сельскохозяйственных работах задействовали «Ми-1», «Ми-2», «Ка-26» и «Ка-15». На машину устанавливали специальный комплекс для разбрызгивания растворов и разбрасывания удобрений, а пилот из своей кабины контролировал ход работ (рис. 7). Использование вертолета позволяет засеять поле, например, ячменем или горохом, когда почва еще слишком влажная. Для этих растений повышенная влажность не страшна, но вот традиционная сеялка изрыла бы всю поверхность, постоянно увязая в грязи [15].

Рис. 6. Преимущества вертолета в решении сельскохозяйственных задач

В СССР на службе у сельского хозяйства были сотни единиц легкой воздушной техники. И сегодня над полями можно увидеть в буквальном смысле все те же вертолеты. Правда, количество их сильно сократилось: машины изнашиваются, а денег на новые нет. Многие агропромышленные комплексы, не говоря уже о небольших фермерских хозяйствах, не могут позволить купить себе дорогостоящее оборудование при всей его эффективности.

Рис. 7. Оборудование вертолета в сельском хозяйстве

Самый доступный вариант на сегодня – вертолет «Robinson R44» (стоит около 45-50 млн. руб.) в зависимости от модификации и курса доллара. Современная система опрыскивания для такого вертолета обойдется примерно в 3 млн., но окупит себя достаточно быстро [15].

Основные недостатки вертолетов: стоимость летного часа, куда входит стоимость топлива и обслуживания (в сравнении с «кукурузниками» значительно выше), а также зависимость от метеоусловий. Так, в ветреную погоду запрещается обрабатывать растения с вертолета. Ветер, усиленный винтокрылой машиной, может перекинуть ядохимикаты, предназначенные для одной культуры, на соседние посевы и территории и нанести существенный вред.

По этим причинам в сельскохозяйственных работах все же лидировали самолеты. И на разработку нового самолета для сельского хозяйства возлагались большие надежды и ожидания.

Однако, то ли разработка самолета для АПК была проведена слишком рано, раньше, чем его инновационный потенциал был востребован и оценен, либо слишком поздно, так как на околоземной орбите уже находились многофункциональные спутники слежения, которые формировали точное картографирование обширных территорий.

Статья «Полетит ли «Грач» над полем», опубликованная в журнале «Техника молодежи» за 1985 г. поставила вопрос, который требовал разрешения. В итоге «Грач» так и не взлетел над полем.

Перед современным сельским хозяйством поставлены уже иные задачи, начала набирать силу экологическая компонента, которая резко снижала применение ядов и дефолиантов. Такие перемены значительно изменили подходы к технологиям выращивания сельскохозяйственной продукции и все больше ориентировались на точные прогнозы сезонных изменений температур, состава почв, ее влажности, точных сроков посева, контроля за всхожестью и потребностью азотной подкормки.

Появились тенденции применения современной авиация на службе народного хозяйства в качестве мониторинга источников чрезвычайных ситуаций. В 1980-е гг. космическая составляющая не всегда обеспечивала оперативное воздействие при обнаружении на исследуемой территории очагов природных пожаров. Поэтому для раннего обнаружения пожаров потребовалось привлечение авиационных средств авиапатрулирования (аэровизуальных наблюдений). Авиационный мониторинг лесных пожаров имеет более широкие возможности по сравнению с космическими средствами, как по составу объектов наблюдения, так и по оперативности.

Космический мониторинг в современном агроменеджменте

Наступила новая эпоха, когда космические технологии стали неотъемлемой частью повседневной жизни современного общества. Все чаще стали появляться публикации о том, что именно космический мониторинг может коренным образом изменить показатели современной сельскохозяйственной отрасли [16-18].

Космический мониторинг. Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) – это метод изучения земной поверхности, основанный на неконтактной регистрации электромагнитного излучения земной поверхности в различных диапазонах спектра. Конечной целью обработки данных дистанционного зондирования является распознавание объектов или ситуаций, попадающих в поле обзора, и определение их положения в пространстве. Космосъемка занимает одно из ведущих мест среди различных методов дистанционного зондирования. Космические системы мониторинга включают в себя [7]:

– Спутниковые системы на орбите (центр управления полетами и съемкой);

– Прием информации наземными пунктами приема, спутниками-ретрансляторами.

Хранение и распространение материалов (центры первичной обработки, архивы снимков). По детальности снимки условно разделяют на следующие классы:

- Снимки низкого разрешения (километры);
- Снимки среднего разрешения (сотни метров);
- Снимки высокого разрешения, которые в свою очередь делятся на:
  - ✓ снимки очень высокого разрешения (10-20 м);
  - ✓ снимки сверхвысокого разрешения (1 м и менее).

В самом деле, возможности космической съемки и космического мониторинга с растущей мощью современных технологий стали практически безграничны.

Рождением космического мониторинга можно назвать 1955 г., именно в этот год в СССР и США начали активно разрабатывать спутники-шпионы. В США это была серия космических аппаратов (КА) «Corona» и «Landsat», а в СССР – серия аппаратов «Зенит» и «Алмаз» (рис. 8) [19, 20].

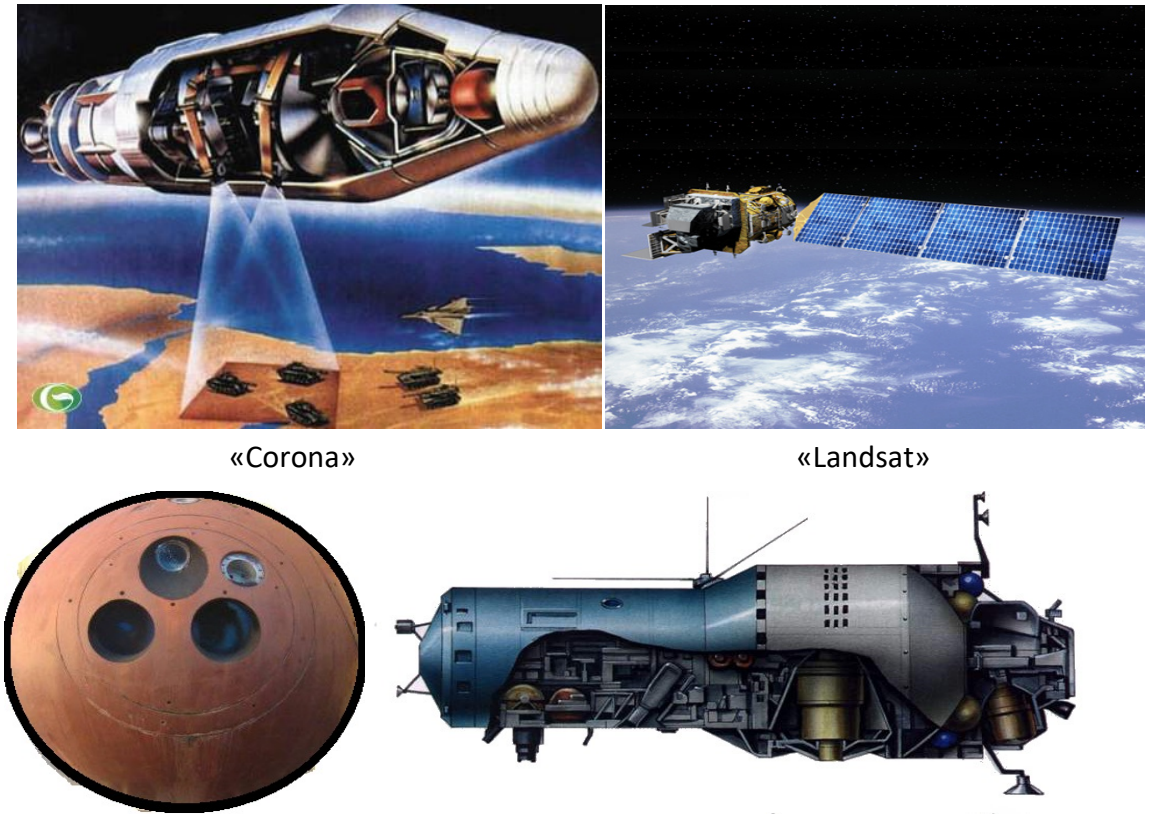


Рис. 8. Первые спутники-«шпионы»

Космические аппараты (КА) – разведчики первого поколения (американская «Corona» и советский «Зенит») проводили фотосъемку, а потом выпускали контейнеры с отснятой фотопленкой, которые спускались на Землю. Капсулы «Corona» подбирались в воздухе во время спуска на парашюте. Более поздние космические аппараты оснащались фототелевизионными системами и передавали изображения с помощью зашифрованных радиосигналов [19, 20].

Комплексные космические эксперименты космического мониторинга, решавшие различные экологические задачи путем съемки с самолетов и спутников, начали проводиться в СССР с конца 1960 гг.

Дистанционное зондирование Земли из космоса (ДЗЗ) предоставляет уникальную возможность получать ценную информацию о земных объектах и явлениях в глобальном масштабе с высоким пространственным и временным разрешением. Космическая съемка поверхности Земли определяет физические, химические, биологические и геометрические параметры объектов наблюдения в различных средах Земли, как правило, используя функциональную зависимость между инструментальной способностью космической техники и искомыми параметрами [19].

Рабочий диапазон длин волн, принимаемых съемочной аппаратурой, составляет от долей микрометра (видимое оптическое излучение) до метров (радиоволны).

Методы зондирования могут быть *пассивные*, то есть использовать естественное отраженное или вторичное тепловое излучение объектов на поверхности Земли, обусловленное солнечной активностью и *активные* – использующие вынужденное излучение объектов, инициированное искусственным источником направленного действия [20].

Данные ДЗЗ, полученные с КА, характеризуются большой степенью зависимости от прозрачности атмосферы. Поэтому на КА используется многоканальное оборудование пассивного и активного типов, регистрирующие электромагнитное излучение в различных диапазонах (рис. 9).

Аппаратура ДЗЗ первых КА, запущенных в 1960-1970-х гг. была трассового типа – проекция области измерений на поверхность Земли представляла собой линию. Позднее появилась и широко распространилась аппаратура ДЗЗ панорамного типа – сканеры, проекция области измерений на поверхность Земли которых представляет собой полосу.

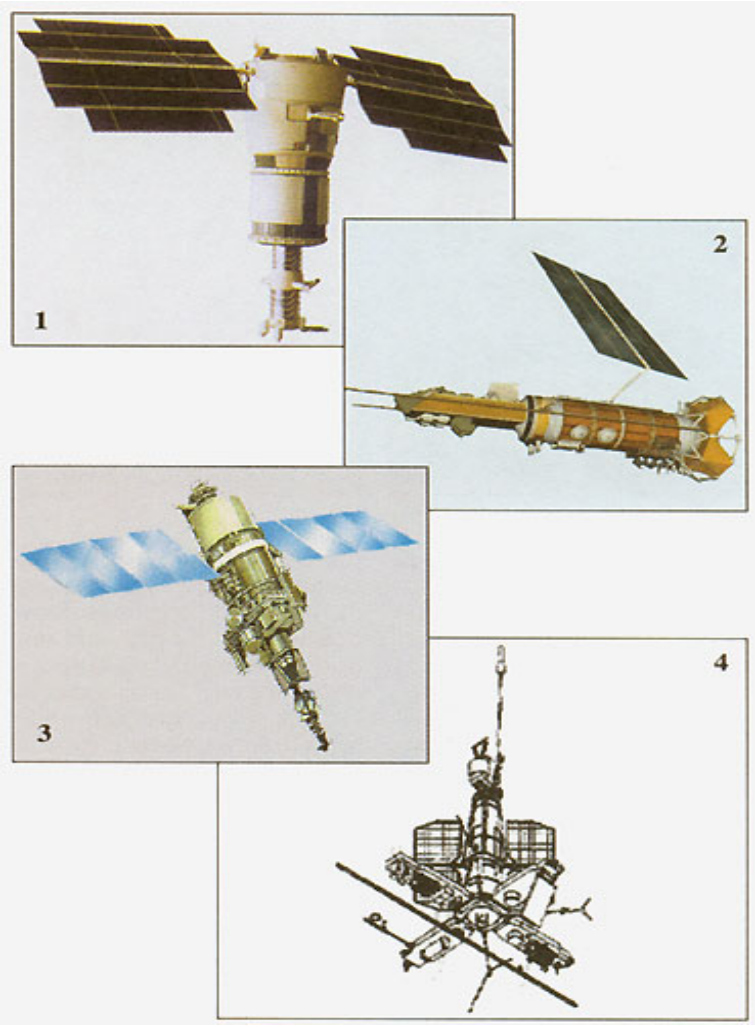


Рис. 9. Первые российские спутники дистанционного зондирования Земли и метеорологических наблюдений:
1 – «Ресурс-О1», 2 – «Океан-О1», 3 – «Метеор-3М», 4 – «Сич-1М»

Космические аппараты дистанционного зондирования Земли используются для изучения природных ресурсов Земли и решения задач метеорологии. КА для исследования природных ресурсов оснащаются в основном оптической или радиолокационной аппаратурой. Преимущества последней заключаются в том, что она позволяет наблюдать поверхность Земли в любое время суток, независимо от состояния атмосферы.

Качество данных, получаемых в результате дистанционного зондирования, зависит от их пространственного, спектрального, радиометрического и временного разрешения [6, 7]:

- *Пространственное разрешение.* Характеризуется размером пикселя (на поверхности Земли), записываемого в растровую картинку – может варьировать от 1 до 1 000 м.

- *Спектральное разрешение.* Данные «Landsat» включают семь полос, в том числе инфракрасного спектра, в пределах от 0,07 до 2,1 мкм. Сенсор Hyperion аппарата «Earth Observing-1» способен регистрировать 220 спектральных полос от 0,4 до 2,5 мкм, со спектральным разрешением от 0,1 до 0,11 мкм.
- *Радиометрическое разрешение.* Число уровней сигнала, которые сенсор может регистрировать. Обычно варьируется от 8 до 14 бит, что дает от 256 до 16 384 уровней. Эта характеристика также зависит от уровня шума в инструменте.
- *Временное разрешение.* Частота пролета спутника над интересующей областью поверхности. Имеет значение при исследовании серий изображений, например при изучении динамики лесов. Первоначально анализ серий проводился для нужд военной разведки, в частности для отслеживания изменений в инфраструктуре, передвижений противника.

Для создания точных карт на основе данных дистанционного зондирования, необходима трансформация, устраняющая геометрические искажения. Снимок поверхности Земли аппаратом, направленным точно вниз, содержит неискаженную картинку только в центре снимка. При смещении к краям расстояния между точками на снимке и соответствующие расстояния на Земле все более различаются. Коррекция таких искажений производится в процессе фотограмметрии. С начала 1990-х гг. большинство коммерческих спутниковых изображений продается уже скорректированными.

Кроме того, может требоваться радиометрическая или атмосферная коррекция. Радиометрическая коррекция преобразует дискретные уровни сигнала, например от 0 до 255, в их истинные физические значения. Атмосферная коррекция устраняет спектральные искажения, внесенные наличием атмосферы.

Спектральный диапазон бортовых измерителей выбирается при их разработке в зависимости от излучательной способности объектов наблюдения (рис. 10) [20].

Для задач экологического мониторинга наиболее целесообразны спутники «Метеор», «Океан», «Ресурс» полярно-орбитальных орбит, а также американские спутники серий «Landsat». Эти спутники обладают радиометрами высокого разрешения и функционируют на полярных орбитах высотой порядка 700 км с наклоном 98,89 градусов.

Радиометр высокого разрешения ведет съемки поверхности Земли в пяти спектральных диапазонах (рис. 11) [21].

Космические съемки проводятся с пространственным разрешением 1 100 м и шириной обзора 2 700 км. Российские спутники обеспечивают получение многозональной космической информации высокого и среднего разрешения с помощью двух сканеров видимого и ближнего инфракрасного диапазонов.

Космическая система «Метеор», принадлежащая Росгидромету, обеспечивает глобальный экологический мониторинг территории России. Параметры орбиты спутника «Метеор»: приполярная круговая орбита высотой около 1 200 км. Комплекс научной аппаратуры позволяет оперативно 2 раза в сутки получать изображения в видимом и инфракрасном диапазонах плотности облачного и подстилающего покровов, данные о температуре, влажности воздуха и поверхности. Осуществляются также мониторинг озона сферы и геофизический мониторинг. В состав бортового комплекса спутника входят несколько сканирующих ИК-радиометров и сканирующая ТВ-аппаратура с системой запоминания данных на борту для глобального обзора и передачи данных. Поток информации в условиях облачности и в любое время суток обеспечивается радиолокатором РЛС БО.

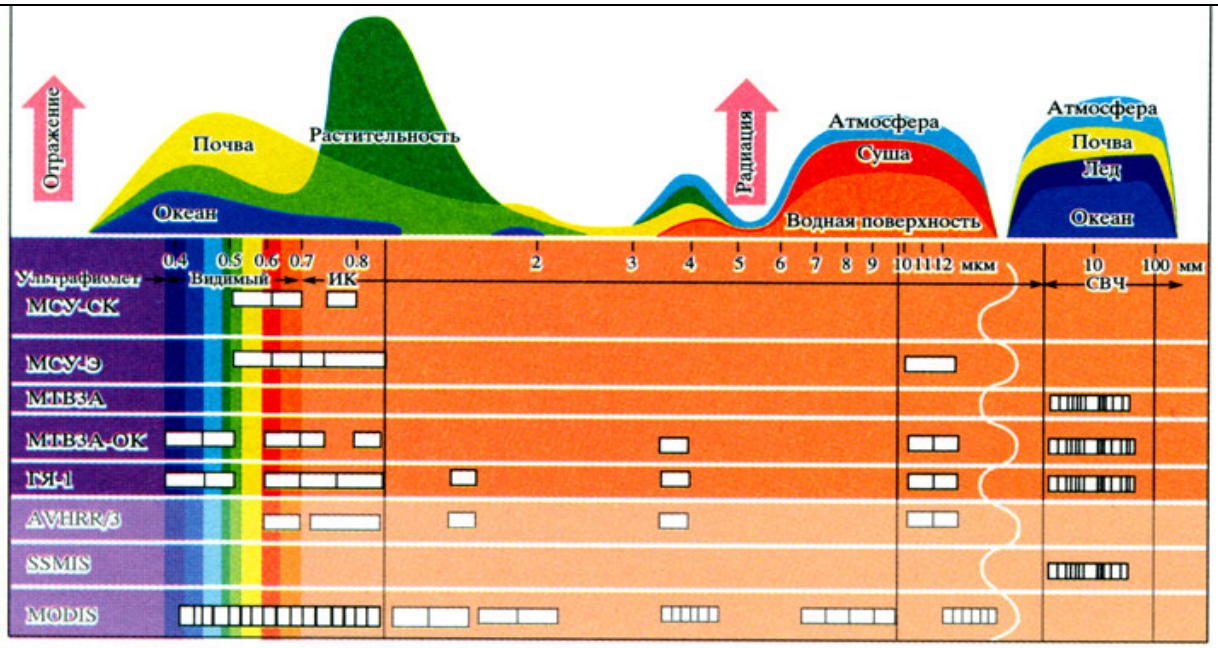


Рис. 10. Диаграмма спектральных характеристик потенциальных объектов наблюдения на Земле и некоторых приборов, установленных на космических аппаратах ДЗЗ

Рис. 11. Тематический анализ территории с помощью космосъемки

В состав комплекса бортовой аппаратуры многофункциональных спутников дистанционного зондирования земли входит входят СВЧ-радиометры Р-600 и Р-255, сканирующий СВЧ-радиометр «Дельта-2», трассовый поляризационный спектрорадиометр «Трассер», а также комплекс оптической сканирующей аппаратуры и пр.

Одним из важнейших приборов слежения современных многоцелевых спутников космического мониторинга является панхроматическая оптико-электронная система, позволяющая получать изображения с пространственным разрешением 1 м, спутники с ее помощью имеют возможность осуществлять высоко детальную съемку одного и того же участка местности каждые три дня, получая несколько снимков одного и того же объекта с дополнительной информацией о нем (рис. 12) [22].

С помощью спутниковых данных дистанционного зондирования можно решать широкий круг задач контроля состояния окружающей среды [7]:

- определение необходимых метеорологических характеристик;
- вертикальные профили температуры;
- интегральные характеристики влажности, характер облачности и т.д.);
- контроль динамики атмосферных фронтов, ураганов;
- получение карт крупных стихийных бедствий;
- определение температуры подстилающей поверхности;
- оперативный контроль и классификация загрязнений почвы и водной поверхности;
- обнаружения крупных или постоянных выбросов промышленных предприятий;
- контроль техногенного влияния на состояние лесопарковых зон;
- обнаружение крупных пожаров и выделение пожароопасных зон в лесах;
- выявление тепловых аномалий и тепловых выбросов крупных производств и ТЭЦ в мегаполисах;
- регистрация дымных шлейфов от труб;
- мониторинг и прогноз сезонных паводков и разливов рек;
- обнаружение и оценка масштабов зон крупных наводнений;
- контроль динамики снежных покровов и загрязнений снежного покрова в зонах влияния промышленных предприятий и многие другие задачи.

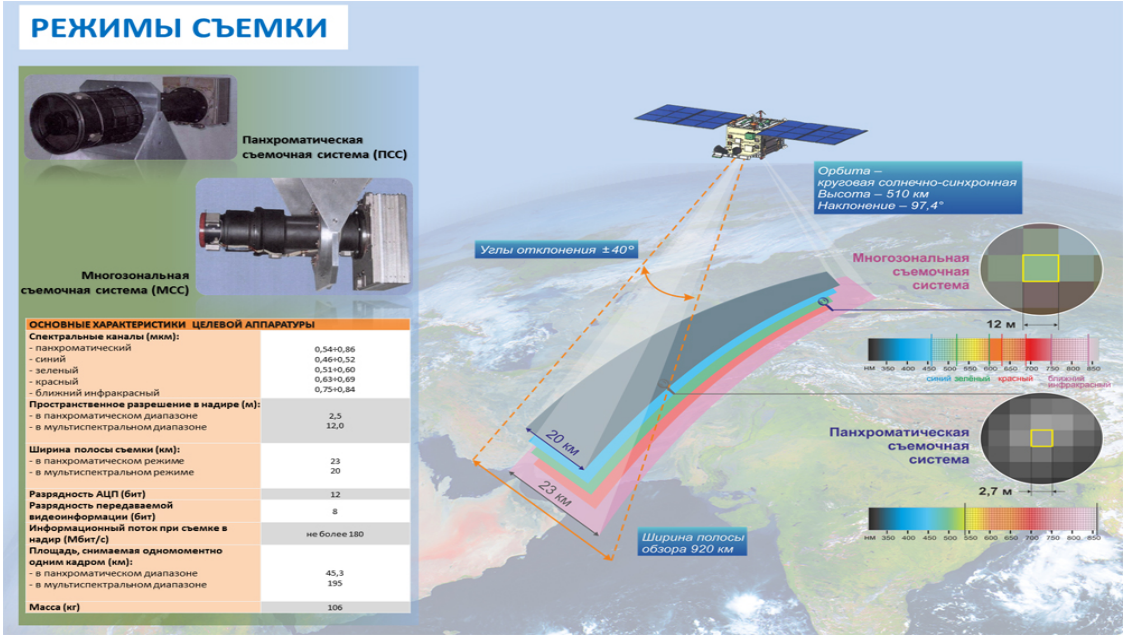


Рис. 12. Режим съемки спутника «Ресурс-ДК» с помощью панхроматической аппаратуры

Рассмотрим распределение спектральных каналов [19, 20] и области применения этих каналов:

- 1 канал (голубой): наиболее чувствителен к атмосферным газам, и, следовательно, изображение может быть малоконтрастным; имеет наибольшую

водопроницаемость (длинные волны больше поглощаются), то есть оптимален для выявления подводной растительности, факелов выбросов, мутности воды и водных осадков; полезен для выявления дымовых факелов (так как короткие волны легче рассеиваются маленькими частицами);хорошо отличает облака от снега и горных пород, а также голые почвы от участков с растительностью.

- 2 канал (зеленый): чувствителен к различиям в мутности воды, осадочным шлейфам и факелам выбросов; охватывает пик отражательной способности поверхностей листьев, может быть полезен для различения обширных классов растительности; также полезен для выявления подводной растительности.
- 3 канал (красный): чувствителен в зоне сильного поглощения хлорофилла, то есть хорошо распознает почвы и растительность; чувствителен в зоне высокой отражательной способности для большинства почв; полезен для оконтуривания снежного покрова.
- 4 канал (ближний инфракрасный): различает растительное многообразие; может быть использован для оконтуривания водных объектов и разделения сухих и влажных почв, так как вода сильно поглощает ближние инфракрасные волны.
- 5 канал (средний или коротковолновый инфракрасный): чувствителен к изменению содержания воды в тканях листьев (набухаемости); чувствителен к варьированию влаги в растительности и почвах (отражательная способность уменьшается при возрастании содержания воды); полезен для определения энергии растений и отделения суккулентов от древесной растительности; особенно чувствителен к наличию/отсутствию трехвалентного железа в горных породах (отражательная способность возрастает при увеличении количества трехвалентного железа); отличает лед и снег (светлый тон) от облаков (темный тон).
- 6 канал (длинноволновый инфракрасный или тепловой):датчики предназначены для измерения температуры излучающей поверхности от -100°C до 150°C; подходит для дневного и ночного использования; применение тепловой съемки: анализ влажности почв, типов горных пород, выявление теплового загрязнения воды, бытового скопления тепла, источников городского производства тепла, инвентаризация живой природы, выявление геотермальных зон.
- 7 канал (средний, или коротковолновый инфракрасный): совпадает с полосой поглощения излучения гидр минералами (глинистые сланцы, некоторые оксиды и сульфаты), благодаря чему они выглядят темными; полезен для литологической съемки; как и 5-й канал, чувствителен к варьированию влаги в растительности и почвах.
- 8 канал (панхроматический – 4, 3, 2): наиболее типичная комбинация каналов, используемая в дистанционном зондировании для анализа растительности, зерновых культур, землепользования и водно-болотных угодий (wetlands).

Становится очевидным, что, обладая всем обширным спектром информации, которую может предоставить современный космический мониторинг для решения сельскохозяйственных задач, обеспечение оптимального точного земледелия становится вполне доступной и легко решаемой задачей.

Достоинства многофункционального спутникового космического мониторинга поражают своими возможностями и являются порой даже избыточными для решения агротехнических задач точного земледелия (рис. 13) [1-4, 7, 23].

Задачи космического мониторинга группируются по отраслям [1, 7] и направлениям деятельности агропромышленного комплекса:

Учет и использование сельскохозяйственных земель:

- определения точных границ полей и рабочих участков с расчетом площадей;
- инвентаризация и экспликация сельскохозяйственных земель;
- картографирование реальной структуры земельных угодий на землях сельскохозяйственного назначения (пашня, луга, сады, многолетние насаждения, залежи и неиспользуемые земли);
- картографирование севооборотов, определение реальной структуры посевных площадей;
- выявление неиспользуемых земель, контроль рационального использования сельскохозяйственных угодий;
- определение участков зарастания сельскохозяйственных земель древесно-кустарниковой растительностью, оценка зарастания сельскохозяйственных угодий;
- выделение участков эрозии, переувлажнения, заболачивания, иных проявлений деградации земель;
- обновление почвенных карт, дистанционное картографирование свойств почвенного покрова (содержание органического вещества, развитие эрозионных процессов, степень увлажнения (рис. 14)):
- выявление фактов несанкционированного использования сельскохозяйственных земель.

Растениеводство:

- мониторинг состояния посевов сельскохозяйственных культур на различных стадиях вегетации (прирост биомассы, степень увлажнения), в т.ч. оценка всхожести;
- планирование и контроль выполнения агротехнических работ (вспашка, уборка урожая);
- выявление и прогнозирование неблагоприятных процессов и явлений (наводнения, вредители) в целях их учета при планировании сельскохозяйственного природопользования.

Рис. 13. Российский многоцелевой спутник космического мониторинга «Ресурс-П» ориентированный на нужды сельского хозяйства, экологии, лесопользования

Орошение и мелиорация земель:

- информационное сопровождение проектно-изыскательских работ в сфере мелиорации земель и сельскохозяйственного водоснабжения;
- контроль и мониторинг состояния мелиоративных и гидротехнических объектов.

Охотничье хозяйство:

- картографирование, оценка и мониторинг среды обитания объектов животного мира (охотничьих ресурсов).

Землеустроительное проектирование:

- информационное сопровождение землеустроительного проектирования в части подготовки планово-картографической основы.

Правовые аспекты:

- выявление неучтенных посевных площадей;
- получение реальной информации о состоянии посевов и земельных угодий для задач агрострахования;
- разрешение судебных споров, связанных с землепользованием;
- определение зон несанкционированных строительных работ и самовольного занятия участков на землях сельскохозяйственного назначения.

Основные преимущества данных ДЗЗ для решения задач сельского хозяйства [1, 7]:

- *Оперативность.* Актуальные космические снимки могут быть получены в течение суток после размещения заказа на осуществление съемки.
- *Объективность.* Информация, получаемая по космическим снимкам, является априори достоверной и отображает действительную картину состояния сельскохозяйственных земель и растительности.
- *Единовременность и периодичность.* Современные спутниковые системы дистанционного зондирования Земли позволяют осуществлять съемку высокого разрешения с очень высокой периодичностью (до 1 суток).
- *Единообразие.* Данные космической съемки поставляются с откалиброванных сенсоров, устанавливаемых на спутниках, и не нуждаются в каких-либо дополнительных преобразованиях, направленных на улучшение их взаимной совместимости.
- *Обзорность.* Современные спутниковые системы дистанционного зондирования Земли позволяют получать единовременную съемку на огромных площадях, что обеспечивает единовременность наблюдений на производственных участках, расположенных на значительном отдалении друг от друга.

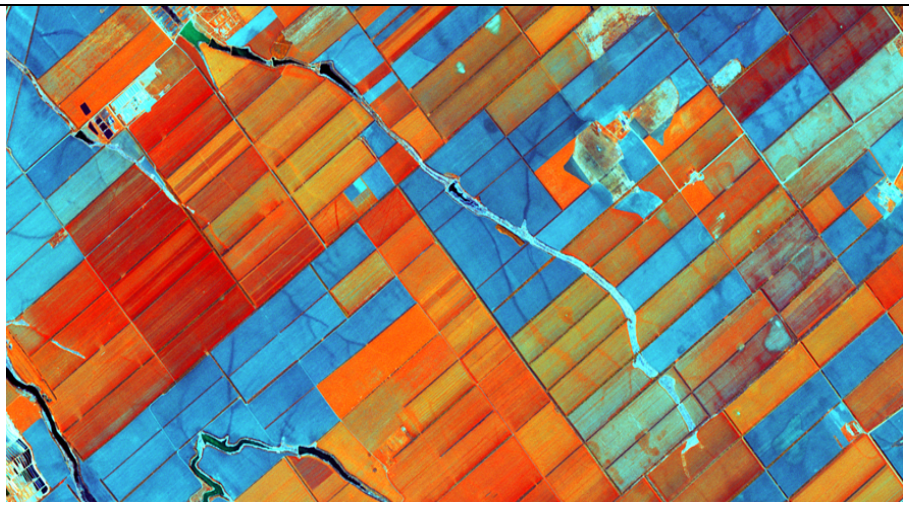


Рис. 14. Краснодарский край, космический снимок RapidEye (синтез: ближний инфракрасный – крайний красный – красный), пространственное разрешение 5 м [24]

Данные космического мониторинга обеспечивают решение широкого круга прикладных задач сельского хозяйства. Например, управление парком агротехники и организация рациональной логистики. Современное агропредприятие, как правило, владеет крупным автопарком, включая уборочную технику, вспомогательную технику, грузовой транспорт, топливозаправщики и т.д. Именно здесь зачастую имеют место хищение, нерациональное использование средств производства и нарушение технических циклов и требований к выполнению той или иной работы, а затраты на топливо, транспортные перевозки и обслуживание техники составляют значительную часть общих расходов агропредприятия.

Несмотря на то, что мониторинг в сельском хозяйстве несколько отличается от традиционного мониторинга транспорта – возможности Wialon существенно расширились и уже около пяти лет наша система успешно используется в направлении агротелематики и становится необходимым помощником для крупных агрохолдингов (рис. 15) [25].

Несомненно, что космический мониторинг в области сельского хозяйства позволяет приблизить отечественный агропромышленный комплекс к рамкам точного земледелия. С отраслевой точки зрения космический мониторинг в агропромышленном комплексе практически незаменим. Он позволяет получить весь комплекс информации о сельскохозяйственных ресурсах страны, анализировать изменения и регулировать стратегию отрасли.

Единственным недостатком космического мониторинга для отдельных фермерских хозяйств является стоимость получаемой информации. Нельзя забывать о том, что целесообразность получения этой информации становится все менее реалистичной, учитывая стоимость получаемой информации, сложной системы ее дешифровки, выборки необходимых участков, организации специальных станций с дорогостоящим оборудованием и персоналом, даже если мы рассматриваем фермерские хозяйства достаточно обширной площади (рис. 16) [26].

Обеспечение сельского хозяйства высококвалифицированными специалистами вопрос также непростой. Для владения современными навыками управления и эффективным использованием результатами любого вида аэрокосмического мониторинга необходимо быть активным пользователем и специалистом в области it-технологий (рис. 17).

Рис. 15. Космический мониторинг агротранспорта

Рис. 16. Панхромотический снимок высокого разрешения (Центр агрохимической службы «Ставропольский»)

Задача получения оперативной мониторинговой информации для решения задач агротехнического характера с целью приближения к точному земледелию продолжала искать наиболее эффективные решения и такое время наступило.

Последние десятилетия с возрастающей миниатюризацией электронного приборостроения появились новые тенденции и в космических программах мониторинга земли, нашедшие свое отражение в миниатюризации как самих спутников, так и непосредственно приборах дистанционного зондирования.

Рис. 17. Современный фермер

Появление новых возможностей, снижение материало-, энерго- и капиталоемкости при разработке и создании спутников для различных народнохозяйственных целей позволило разрабатывать их в небольших лабораториях университетов, малых научно-исследовательских предприятиях и центрах [27, 28]. Наряду с традиционными «флагманскими» проектами многофункциональных спутников весом порядка тонны, появилась целая плеяда мини-спутников (до 500 кг), микро-спутников (до 100 кг), нано-спутников (до 10 кг) и даже пико-спутников (до 1 кг) (рис. 18).

Появились новые показатели эффективности космической техники, выражающиеся в относительной стоимости спутника. Которая выражается в соотношении количества полученной информации в байтах к стоимости проекта, в которых, конечно, лидируют миниатюрные приборы. Оказавшись сравнимыми по показателям эффективности, они, несомненно, выигрывают еще и количеством произведенных запусков. Безусловно, соперничать в универсальности с большими спутниками они не могут, однако вполне пригодны для выполнения конкретных задач [27].

Рис. 18. Пример нано спутника

Снижение стоимости и доступность наноспутников позволили использовать для их запусков менее дорогостоящие средства доставки или использовать «попутные» запуски ракет-носителей типа «Союз». Примером могут служить разработки Самарского аэрокосмического кластера по расширению функциональности третье ступени ракет-носителей «Союз» для выведения на орбиту наноспутников (рис. 19) [18–20]. В структуре кластера существуют научно-производственные структуры выполняющие услуги по запуску и обслуживанию наноспутников.

Началось развитие нового направления в космических исследованиях с использованием группировок наноспутников и наноспутников рассчитанных на определенный срок работы. Невысокая себестоимость таких краткосрочных спутников позволяет осуществлять их быструю замену. Например, запускается годовой цикл мониторинга на основе такого краткосрочного спутника и по истечении срока заменяется новым осуществляющим аналогичную миссию или более усовершенствованную в соответствии с потребностями программы исследований [18]. По завершению срока работы собственных аккумуляторов, такие спутники, не имеющие дополнительных конструкций из солнечных батарей, сгорают «как мотыльки» в верхних слоях атмосферы, не принося ущерба при падении, как традиционные спутники и отработавшие космические станции (рис. 20).

Таким образом, новое направление в космическом мониторинге открыло возможности агропромышленным объединениям и фермерским хозяйствам осуществлять мониторинг своих угодий с помощью наноспутников и пикоспутников в доступном ценовом диапазоне.

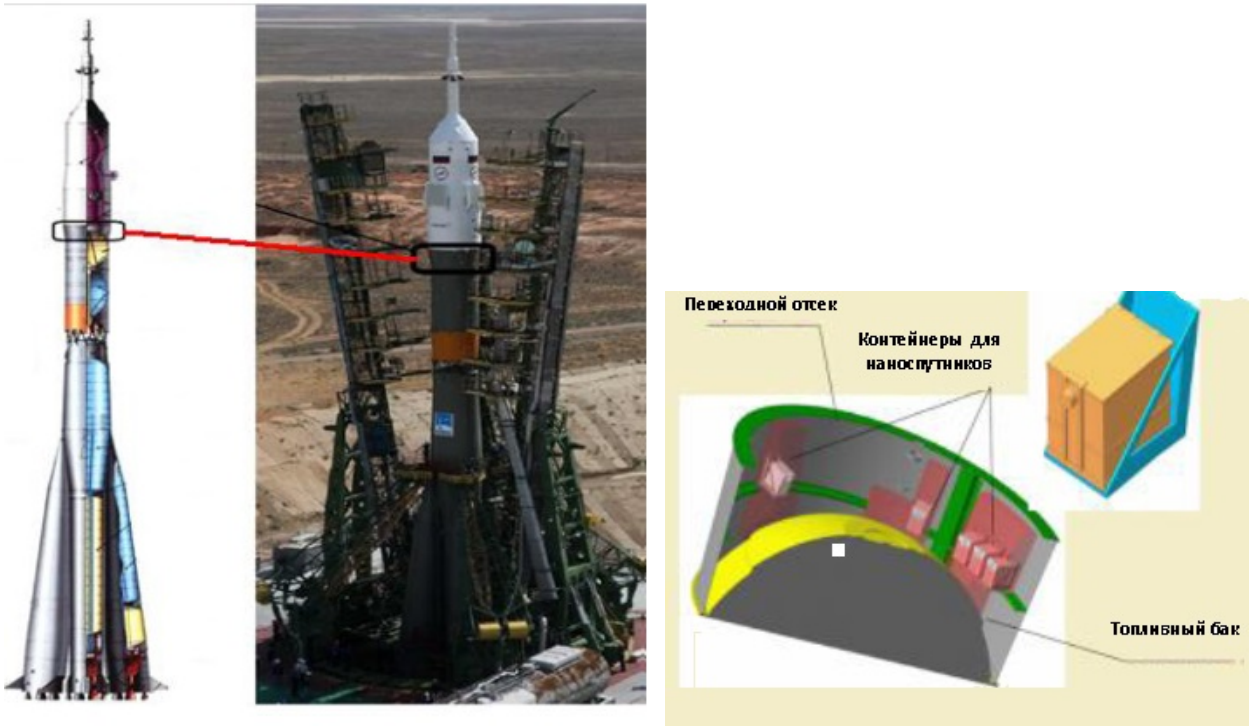


Рис. 19. Использование топливного бака третьей ступени для запуска наноспутников на околоземную орбиту

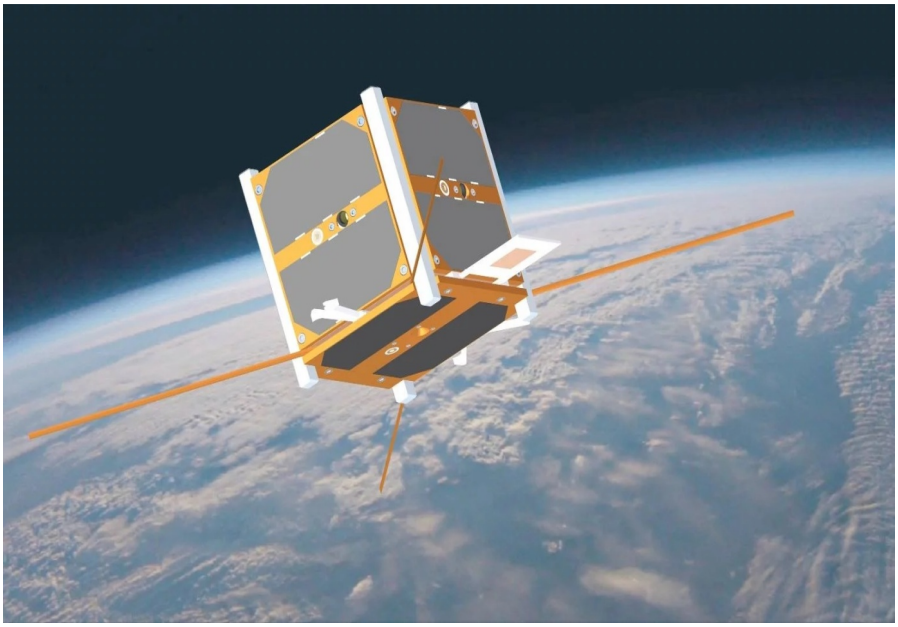


Рис. 20. Наноспутник без солнечных аккумуляторов на орбите

Беспилотные летательные аппараты в современном агроменеджменте

В авиационном мониторинге тоже произошли значительные изменения. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) – более известные как дроны – начали использовать в коммерческих целях с начала 1980-х гг. Однако только в последнее десятилетие возможности практического применения дронов стали активно расширяться. В ответ на стремительно развивающиеся технологии компании создают новые бизнес-модели и сценарии использования беспилотников. Именно дроны произвели настоящую революцию в агропромышленном секторе [19]. Уже сегодня беспилотники для сельского хозяйства позволяют осуществить переход к точному земледелию – так называется комплексная система агроменеджмента, при которой с помощью высокотехнологичного оборудования более продуктивно выращивают урожай, основываясь на анализе состояния почвы и внешних факторов. Дроны для сельского хозяйства стали осуществлять тот необходимый мониторинг и собирать информацию о состоянии полей и формировать на этой основе электронную высокоточную карту с минимальными трудозатратами.

Сельскохозяйственные дроны набирают популярность в Соединенных Штатах Америки, Европе, Бразилии, России, но лидером остается Китай, где производят сами беспилотники и запчасти к ним. Дроны стали удовлетворять потребностям самого широкого круга пользователей, они доступны как крупным агрокомплексам, так и небольшим фермерским хозяйствам, стремящимся к повышению эффективности результатов (рис. 21) [29].

Современные сельскохозяйственные дроны способны [19]:

- **Анализировать почву.** Дроны могут создать трехмерные карты для анализа почвы на содержание питательных веществ. Карты в дальнейшем используют для разработки схемы посадки.
- **Высаживать семена.** Коптеры зависают над грядками и выстреливают глубоко в почву капсулами с семенами и питательными веществами.
- **Опрыскивать урожай.** Посредством ультразвуковой эхолокации дроны регулируют высоту полета, сканируют местность и равномерно распыляют необходимое количество агрохимикатов.
- **Поливать.** Датчики на коптерах выявляют высохшие и нуждающиеся в инсектицидной обработке участки. Правда, пока для полива всего поля грузоподъемности дронов недостаточно – они могут поднимать до 200 кг, а для орошения среднего поля потребуется около 2 000 л воды. Сейчас российские ученые работают над экспериментальными коптерами, которые смогут поднять до 5 т груза.
- **Следить за состоянием посевов с большей эффективностью.** Раньше мониторинг урожая осуществлялся при помощи небольших пилотируемых самолетов, спутников или просто фермеров, обходящих грядки с измерительными приборами в руках. Все эти способы были время- и ресурсозатратными и требовали большого количества сил для систематизации данных. Дроны справляются куда быстрее, что сказывается и на прибыли. Погодные условия, большая площадь угодий, нашествие насекомых усложняют жизнь фермера и чаще всего отрицательно сказываются на урожае. Сегодня с помощью коптеров можно в режиме реального времени увидеть детализированную фотографию поля и улучшить показатели роста посевов.
- **Оценивать состояние урожая.** Дроны помогут узнать вегетативный индекс (показатель плотности и качества урожая), выявят появление болезней растений. Невооруженным глазом сложно увидеть нашествие паразитов на начальной стадии или недостаток питательных удобрений. Своевременная проверка дронами с мультиспектральными камерами нередко позволяет спасти весь урожай.

Рис. 21. Использование дрона для мониторинга в агропромышленном секторе

Космические технологии съемки реализовались некоторыми новыми возможностями, с помощью которых мониторинг угодий с помощью БЛА позволяет осуществлять сьемку как в видимом диапазоне частот, так и в мультиспектральном диапазоне.

Съемка БПЛА в видимом диапазоне частот позволяет [19, 20]:

1. Создание электронных карт полей с высокой точностью (до сантиметров), вести «паспорта» угодий, рассчитывать логистику (на базе расстояние от полей до трасс, населенных пунктов)

Электронная карта поля базируется на точных данных: площади полей, расстоянии дорог, населенных пунктов и позволяет рассчитывать площади и расстояния онлайн с точностью до сантиметров, обладая данным инструментом Вы сможете:

- определять ресурсный потенциал земель хозяйств, с помощью этого можно точно планировать объемы собранного урожая;
- точно рассчитать нормы расхода техникой ГСМ в зависимости от площади и отдаленности;
- нормы внесения удобрений и средств защиты растений (СЗР) в зависимости от площади;
- точно подсчитать нужное количество семенного материала и выявить факты его нерационального использования (возможно привести примеры, согласно которым выявлялись факторы кражи или нерационального использования);
- осуществлять мониторинг техники и определять не только расход топлива, но и эффективное использование рабочего времени и др.;
- прогнозировать урожайность сельскохозяйственных культур.

Вести «паспорта» сельскохозяйственных угодий за неограниченный промежуток времени и по разным показателям это необходимо для:

- мониторинга изменения состояния качества полей, с помощью чего можно оценить эффективность принятых решений, выявлять проблемы и отслеживать их прогресс – это служит инструментом формирования статистических справок и отчетов;
- становится возможным проводить агрохимическое обследование полей и вносить дополнительную информацию (карты содержания основных элементов N, P, K, Ca, Mg, S, Ph, гумус) о поле в существующую базу данных [30-34];
- оптимизировать производство с целью получения максимального дохода, а также рационального использования ресурсов.

2. Оценить объем работ и их качество. Оперативно реагировать на качество работы механизаторов путем мониторинга путей прохождения техники на поле;
3. Выявлять и анализировать случаи кражи, порчи урожая и последствий различных неблагоприятных погодных условий (площади полеглости посевов, вымерзших участков посевов, стадии созревания, засоренность полей);
4. Планировать прокладки дренажных систем
5. Определять рельеф местности

Мультиспектральная съемка БПЛА [19, 20]*:*

Использование мультиспектральной съемки в сельском хозяйстве – это новый шаг в развитии сельского хозяйства, данная технология предоставляет фермерам почти мгновенную максимально детальную информацию о том, как себя чувствуют посевы и позволяет осуществлять:

1. Мониторинг сорной растительности и составление схемы защиты растений на каждое поле;
2. Определить индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index – нормализованный вегетационный индекс).

Как известно, отражение растительного покрова в красной и ближней инфракрасной областях электромагнитного спектра тесно связано с его зеленой фитомассой. Для того, чтобы количественно оценить состояние растительности, широко применяется, так называемый, вегетационный индекс NDVI. Он характеризует также плотность растительности, позволяет

растениеводам оценить всхожесть и рост растений, продуктивность угодий. Индекс рассчитывается как разность значений отражения в ближней инфракрасной и красной областях спектра, деленная на их сумму. В результате значения NDVI меняются в диапазоне от –1 до 1. Для зеленой растительности отражение в красной области всегда меньше, чем в ближней инфракрасной за счет поглощения света хлорофиллом, поэтому значения NDVI для растительности не могут быть меньше 0.

Применение данной технологии поможет:

3. Составлять карты качества почв отдельных полей, ввести дифференциальное внесение СЗР и удобрений в различных частях поля, что позволит значительно сэкономить на внесении удобрений и СЗР, а также не перенасыщать почву;
4. Провести полный анализ условий, которые влияют на рост растительности на данном поле;
5. Выявить с достоверностью 99,9% контуры состояния сельскохозяйственных растений на поле, которые нуждаются во внесении удобрений;
6. Оптимизировать (сократить) внесение удобрений и работу техники на поле;
7. Вести экологический мониторинг сельскохозяйственных земель
8. Вести оперативный мониторинг состояния посевов (БПЛА позволяет быстро и эффективно строить карты по всходам);
9. Проводить мониторинг внесения посевного материала и всхожести растений;
10. Проводить наблюдения в течение вегетационного периода растительности.
11. Постоянный мониторинг дает возможность оценить всхожесть культур
12. Определение степени зрелости

Выводы

1. Аэрокосмический мониторинг стал необходимой составляющей современного высокотехнологического менеджмента в любой отрасли народного хозяйства и имеет наиболее перспективное применение в агропромышленном комплексе.
2. Каждый из видов аэрокосмического мониторинга имеет свои преимущества и недостатки и необходим в многочисленных сельскохозяйственных работах в составе агроменеджмента.
3. Становится очевидным, что для реализации точного земледелия необходимо создавать современные гибкие кластерные агроструктуры, структуры обеспечения максимальной эффективности агроменеджмента с учетом территориальных, климатических, географических, биологических и экологических особенностей для создания.
4. При формировании территориального агрокластера реализуются все высокотехнологичные возможности современного агроменеджмента для каждого из участников такой кластерной структуры, многократно возрастает возможность формирования отечественного точного земледелия.
5. В условиях растущего населения, дефицита пресной воды и продовольствия у человечества не остается иной альтернативы, как создание точного высокотехнологичного земледелия с применением технологий глобального позиционирования (GPS), географических и информационных систем (GIS), повышение экологичности и эффективности сельскохозяйственных работ.
6. Агропромышленный сектор России содержит целый ряд проблем, решение которых агропредприятиям «одиночкам» практически непосильно. В связи с этим, особую значимость приобретают различные формы интеграции, в том числе формирование агрокластеров [35, 36]. Агрокластер представляет собой ту необходимую структуру, которая кристаллизуется на базе точек роста, которыми являются крупные и сильные агрокомплексы, привлекающие в свою орбиту менее устойчивые и благополучные фермерские хозяйства (рис. 22).

Рис. 22. Условная схема формирования кластера

Безусловно, что в первую очередь, формирование территориальных кластерных структур в агропромышленном комплексе определяется фундаментальными предпосылками и инвестиционной привлекательности сельского хозяйства каждой территории (Краснодарский край – лучший регион для растениеводства в России, Воронежская область – крупная область в Черноземье, где есть условия для развития всех самых маржинальных направлений растениеводства и животноводства). Однако, также играет роль и возможность местных крупных инвесторов, например Брянская и Пензенская области. Помимо этого, что характерно для формирования кластерных структур, некоторые регионы попадают в топ благодаря активной работе местных властей над привлечением целевых инвесторов в агросектор – среди таких можно назвать Московскую и Курскую области.

Примером может служить и агропромышленный кластер Кемеровской области: это объединение организаций разных отраслей (сельхозтоваропроизводителей, организаций по переработке и хранению продукции, системы логистических и маркетинговых компаний, предприятий обслуживающих отраслей, инвестиционных центров, научно-образовательных организаций, организаций инфраструктуры и пр.) Целью создания этого кластера послужила возникшая необходимость повышения экономической привлекательности региона, которую рационально было сформировать на базе эффективности производства сельскохозяйственной продукции, повышения ее качества, оперативной переработки и реализации и защиты окружающей среды [37, 38].

Такой современный подход к решению основных проблем обеспечения человечества продовольствием демонстрирует реализацию холистической парадигмы и единственно верного конвергентного, интегрированного подхода к познанию окружающего мира и разумного природопользования, единой сложной живой структурой биосферой Земли.

Список литературы / References

1. Якушев В.В. Точное земледелие: теория и практика. — СПб.: ФГБНУ АФИ, 2016. — 364 с.
2. Якушев В.П., Полуэктов Р.А., Смоляр Э.И., Топаж А.Г. Точное земледелие (аналитический обзор) // Агрохимический вестник, 2001, № 5. – С. 28-34.
3. Якушев В.П., Полуэктов Р.А., Смоляр Э.И., Топаж А.Г. Использование ГИС в точном земледелии (аналитический обзор) // Агрохимический вестник, 2002, № 1. – С. 34-39.
4. Якушев В.П., Полуэктов Р.А., Смоляр Э.И., Топаж А.Г. Оценка технологий точного земледелия: аналитический обзор // Агрохимический вестник, 2002, № 3. – С. 36-40.
5. Темников В.Н. Государственный мониторинг сельскохозяйственных угодий с использование ГИС-технологий и ДДЗ // Агрохимический вестник, 2008, № 6. – С. 23.
6. Лукин С.В., Костин И.Г., Малышева Е.С. Применение геоинформационных систем для агроэкологического мониторинга сельскохозяйственных земель // Агрохимический вестник, 2019, № 4. – С. 8-13.
7. Метечко Л.Б., Сорокин А.Е., Новиков С.В. Введение в экологию аэрокосмической отрасли: учебник. – Калуга: Эйдос, 2016. – 320 с.
8. Юбилей сельскохозяйственной авиации. http://www.aviajournal.com/arhiv/2000_2002/magazine/20004/st6_2000.html
9. http://fb.ru/article/149451/samolet-an-tehnicheskie-harakteristiki-dvigatel-kabina-skorost-foto-i-tsena
10. Балабанов В.И., Железова С.В., Березовский Е.В., Беленков А.И., Егоров В.В. Навигационные системы в сельском хозяйстве. Координатное земледелие / под общ. ред. проф. В.И. Балабанова. – М.: РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2013. – 143 с.
11. Тюмаков А.Ю., Сабо У.М., Беленков А.И. Внедрение и освоение технологии точного земледелия в полевом опыте // Агрохимический вестник, 2014, № 4. – С. 2-8.
12. Беленков А.И., Сабо У.М., Малахов Н.В. Изучение влияния технологии обработки на плодородие дерново-подзолистой почвы в полевом опыте Центра точного земледелия // Агрохимический вестник, 2016, № 3. – С. 28-31.
13. Бадягин А.А., Мухамедов Ф.А. Проектирование легких самолетов. – М.: Машиностроение, 1978. – 206 с.
14. https://aviator.guru/blog/43986140825/Vertolyotyi-na-sluzhbe-u-selskogo-hozyaystva
15. https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/1436737Landsat
16. Метечко Л.Б., Дацюк М.М., Вострикова С.М., Сорокин А.Е. Аэрокосмические средства дистанционного зондирования в экологическом мониторинге: Учебное пособие. – М.: Изд-во МАИ, 2016. – 88 с.; ил.
17. Метечко Л.Б., Дацюк М.М., Вострикова С.М., Сорокин А.Е. Аэрокосмические средства дистанционного зондирования в экологическом мониторинге: Учебное пособие. – М.: Изд-во МАИ, 2016. – 100 с.
18. Сутырина Е.Н. Дистанционное зондирование земли: учебное пособие. – Иркутск: Изд-во ИГУ, 2013. – 165 с.
19. Эффективность применения малых космических аппаратов в социально-экономических и научных целях. Отчет по итогам круглого стола в аналитическом центре Российской Федерации. Информационный бюллетень. Ноябрь 2015. http//leaderid.ru/upload/file/get/2973
20. Петрукович А.А., Никифоров О.В. Малые спутники для космических исследований // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2016, т. 3, № 4. – С. 22-31.
21. http://www.myshared.ru/slide/662947/
22. http://russianspacesystems.ru/bussines/dzz/orbitalnaya-gruppirovka-ka-dzz/resurs-dk/

23. http://xn--80aaxridipd.xn--p1ai/pervye-2-sputnika-distancionnogo-zondirovaniya-zemli-vvedeny-v-ekspluataciyu/
24. https://sovzond.ru/industry-solutions/agro/
25. http://www.southwestfarmpress.com/management/these-actions-will-sour-your-relationship-landowner
26. http://www.stavagroland.ru/activity/geoinformation-technologies/
27. Железова С.В., Ананьев А.А., Вьюнов М.В., Березовский Е.В. Мониторинг посевов озимой пшеницы с применением беспилотной аэрофотосъемки и оптического датчика GreenSeeker® RT200 // Вестник Оренбургского государственного университета, 2016, № 6(194). – С. 56-61.
28. Лубков А.Н. Государственная программа развития сельского хозяйства на 2013-2020 годы: цели, задачи, механизмы, инструменты // Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих организаций, 2011, № 12. – С. 1-6.
29. https://fermer.ru/forum/zerno-i-zernoobrabotka/232082
30. Степанов М.И., Есбатырова С.Ю. Методические аспекты использования ГИС-технологий для обработки материалов агрохимического обследования почв // Агрохимический вестник, 2009, № 5. – С. 27-28.
31. Ваулин А.В. Оптимизация азотного питания ячменя при внедрении точного земледелия // Агрохимический вестник, 2013, № 1. – С. 15-16.
32. Ущаповский И.В., Корнеева Е.М., Павлова Л.Н., Ожимкова Е.В., Прутенская Е.А., Белопухов С.Л. Особенности азотного питания новых сортов льна-долгунца для задач точного земледелия // Агрохимический вестник, 2015, № 1. – С. 22-24.
33. Матвеенко 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.
34. Генин В. А., Клебанович Н. В. Оценка пространственного варьирования агрохимических показателей на отдельном поле // Агрохимический вестник, 2018, № 6. – С. 2-7.
35. Метечко Л. Б., Сорокин А. Е. Кластерная стратегия экоинновационного развития машиностроительной отрасли // СТИН, 2017, № 10. – С. 27-31.
36. Токолова А.А. Кластеры как форма интеграции агропромышленного комплекса // Молодой ученый, 2016, № 6-5(110). — С. 135-137.
37. Просянникова О.И., Михайлов В., Калинина Т.А., Королев Ю.А. Применение ГИС-технологий при дистанционном мониторинге земель сельскохозяйственного назначения // Агрохимический вестник, 2010, № 1. – С. 10-11.
38. Просянникова О.И., Королев Ю.А. Банк данных центра (станции) агрохимической службы // Агрохимический вестник, 2010, № 5. – С. 7-8.

AEROSPACE MONITORING FOR PRECISION AGRICULTURE

L.B. METECHKO, A.E. SOROKIN, I.S. PROKHOROV
Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, prokhorovis@mai.ru

Abstracts. Short history of aerospace monitoring is presented. Available possibilities of information gathering for rational land-use and agriculture are described. Technical characteristics of Earth remote sensing devices are given. A wide range of problems of practical application of aerospace monitoring in agriculture and forestry is presented.

Keywords. Aviation and astronautics, aircraft, monitoring of the Earth's surface, agricultural production, environmental management, precision farming.

УДК 528.8:633/635

СОВРЕМЕННЫЕ БПЛА ДЛЯ ОБСЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЕЛЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В. Я. ГОЛЬТЯПИН, Т. А. ЩЕГОЛИХИНА
ФГБНУ «Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса» («Росинформагротех»)

Аннотация. Приведено обоснование использования БПЛА для обследования земель сельскохозяйственного назначения, их номенклатура, основные технические данные и спектр решаемых задач. Показано, что для обеспечения полноценного мониторинга земель, необходимо наряду с традиционными методами применять новые, основанные на использовании беспилотных летательных аппаратов.

Ключевые слова. БПЛА, дрон, земля, поле, мониторинг, обследование, информация.

Введение

Земли сельскохозяйственного назначения являются стратегическим ресурсом, обеспечивающим продовольственную безопасность населения. От их рационального использования зависит функционирование всех отраслей сельского хозяйства и экономики в целом, поэтому важнейшей задачей государственного управления земельными ресурсами является организация мониторинга земель [1]. Одним из источников, обеспечивающим оперативное получение объективной информации о землях сельскохозяйственного назначения, являются данные дистанционного зондирования Земли, которое осуществляется спутниками со съемочной аппаратурой высокого и сверхвысокого пространственного разрешения. Однако для формирования современной, эффективной системы управления земельными ресурсами этой информации не всегда достаточно. Поэтому, для обеспечения полноценного мониторинга земель, отвечающего современным требованиям сбора, анализа, хранения и использования информации, необходимо наряду с традиционными методами применять новые системы наблюдения, основанные в том числе на использовании беспилотных летательных аппаратов.

Результаты и обсуждение

Применение аэрофотосъемки с БПЛА позволяет решать широкий спектр задач для сельского хозяйства: уточнение контуров полей и посевных площадей; выделение локальных участков угнетенной растительности на сельскохозяйственном поле; определение участков полей, подверженных водной эрозии; выявление агротехнических погрешностей; уточнение карт микрорельефа сельскохозяйственных угодий; техническое сопровождение процесса реализации технологических решений в технологии точного земледелия; мониторинг состояния осушительных мелиоративных систем; картирование селекционных участков [2].

БПЛА, в зависимости от решаемых задач, оснащаются полезной нагрузкой для фото и видеосъемки, мультиспектральными камерами, разнообразными датчиками и малогабаритными бортовыми компьютерами. В определении координат и скорости современных БПЛА, как правило, задействованы спутниковые навигационные приемники. Углы ориентации и перегрузки определяются с применением гироскопов и акселерометров.

В сравнении со спутниковыми пространственные данные с беспилотных летательных аппаратов отличаются хорошей детализацией исследуемой территории, что позволяет получать более подробные пространственные сведения. Подобная информация обладает высокой точностью позиционирования относительно земных координат и позволяет определить координату объектов по высоте. Для планирования, выполнения полетных заданий БПЛА и обработки полученных данных на рынке существует и предлагается множество программных средств зарубежных и отечественных компаний. Беспилотные летательные аппараты обладают еще

одним существенным преимуществом — доступность применения непосредственно работниками сельскохозяйственного предприятия.

БПЛА широко применяются в сельском хозяйстве многих зарубежных стран: США, Японии, Китае, Италии, Бразилии и т. д. В таблице 1 приведены основные данные БПЛА для сельского хозяйства, признанных лучшими за последние годы за рубежом [3, 4].

Таблица 1. Характеристика БПЛА зарубежных компаний

Марка (компания-изготовитель, страна)	Основные технические данные
Самолетные	
Ebee SQ (SenseFly, Швейцария), (рис. 1а)	Время полета 55 мин, высота полета 120-2000 м, скорость полета 40-110 км/ч, масса 1,1 кг, цена $12000.
AgDrone (HoneyComb Corporation, США)	Время полета 55 мин (+11мин при низкой скорости ветра), высота полета 130 м, максимальная скорость полета 82 км/ч, масса 2,25 кг, цена $10000
Lancaster 5 (PrecisionHawk, США)	Время полета 45 мин, высота полета 91,4 м, масса полезной нагрузки 998 г, масса 2,4 кг, цена $25000.
Phoenix 2 (Sentera, США)	Время полета до 70 мин, высота полета 120-5480 м, масса 2 кг, цена $18000.
RX-60 (AgEagle, США)	Время полета до 60 мин, рабочая скорость полета 50-79 км/ч, масса 3,2 кг, цена $17000.
Trimble UX5 (Trimble, США)	Время полета до 50 мин, скорость полета 80-85 км/ч, рабочая высота полета: 75-750, масса 2,5 кг, цена $25000.
Вертолетные	
3DR Solo (3D Robotics, США)	Время полета до 20 мин, высота полета 122 м, дальность управляемого полета 1000 м, масса 1,8 кг, максимальная скорость 89 км/ч, цена $25000.
OMNI AG (Sentera, США), (рис. 1б)	Квадрокоптер с размером по диагонали 700 мм, за один полет снимает до 100 га с разрешением 5 см на пиксель и до 7га с разрешением 1 см на пиксель. Высота полета 61-122 м, взлетная масса 3,6 кг, цена $16995.
AgBot (Aerial Technology International США)	Обладает самой большой дальностью полета среди дронов для фермеров – 26,7 км. Время полета 26 мин, максимальная скорость 61,7 км/ч, масса 4,7 кг. цена $9700.
T600 Inspire 1 (DJI, Китай)	Время полета 18 мин, максимальная высота полета 4500м, максимальная скорость подъема: 5м/с, масса 2,93 кг
Matrice 100 (DJI, Китай)	Максимальная скорость движения 61-79 км/ч, время зависания 22-40 мин, взлетная масса 3,6 кг.

Основными отечественными компаниями, занимающимися разработкой и поставкой беспилотных авиационных систем, в том числе для сельского хозяйства, являются: ГК «Геоскан», ООО НПП «АВАКС-ГеоСервис», ГК ZALA AERO, ГК «Беспилотные системы», АО «Геомир» и др. (табл. 2) [2].

Таблица 2. Характеристика БПЛА отечественных компаний

Название и марка	Основные технические данные
Группа компаний «Геоскан»	
Комплекс Геоскан 401	Продолжительность полета до 60 мин, максимальная высота полёта 500 м, максимальная взлетная масса 9,3 кг, максимальная масса полезной нагрузки 2 кг.
Комплекс Геоскан 101	Продолжительность полета до 1 ч, максимальная высота полета 4000 м, максимальная взлетная масса 3,1 кг, максимальная масса полезной нагрузки 0,8 кг.
Комплекс Геоскан 201 Агро	Продолжительность полета до 3 ч, максимальная высота полёта 4000 м, максимальная взлетная масса 8,5 кг,

Название и марка	Основные технические данные
Комплекс Геоскан Lite, (рис. 1в)	Продолжительность полета до 1 ч, максимальная высота полёта 4000 м, максимальная взлетная масса 3,1 кг, максимальная масса полезной нагрузки 0,8 кг.
Аэрофотосъемочный комплекс Геоскан Gemini	Продолжительность полета 40 мин, максимальная взлетная масса 1,7 кг, площадь съемки за полет до 1 км^2.
ООО «Оптиплейн Аэродинамика»	
Гибридный коптер Optiplane S2	Продолжительность полета 60 мин, дальность полёта 50 км, рабочая высота полета 1-3000 м, масса 3,7 кг, масса полезной нагрузки 1,5 кг.
ООО «Альбатрос»	
Малый беспилотный комплекс Альбатрос М1	Размах крыльев 1,6 м, продолжительность полета до 1,5 ч, рабочая высота полета 50-500м, максимальная взлетная масса 4 кг.
Беспилотный летательный комплекс Альбатрос М3	Размах крыльев 2,5 м, продолжительность полета до 3 ч, рабочая высота полета 50-1000м, максимальная взлетная масса 6 кг.
Беспилотный летательный комплекс Альбатрос М5	Размах крыльев 3,3 м, продолжительность полета до 4,5 ч, рабочая высота полета 50-1000м, максимальная взлетная масса 15 кг.
Дрон Spider	Продолжительность полета до 35 мин, протяженность маршрута 25 км, максимальная скорость полета 18 м/с, максимальная взлетная масса 3 кг.
Дрон А6 Plus	Продолжительность полета до 75 мин, протяженность маршрута 40 км, максимальная взлетная масса 7 кг.
АО «ГЕОМИР»	
Беспилотный комплекс М5 AGRO, (рис. 1г)	Размах крыльев 3,3 м, продолжительность полета до 4,5 ч, рабочая высота полета 50-1000 м, максимальная взлетная масса 15 кг, максимальная протяжённость маршрута 320 км, длина 80 см.
Группа компаний «ZALA AERO»	
Беспилотное воздушное судно ZALA 421-22	Вертолетного типа. Продолжительность полета 35 мин, максимальная высота полета 1000 м, максимальная взлетная масса 8 кг, масса целевой нагрузки до 2 кг, габаритные размеры 1065х1065х240 мм.
Беспилотное воздушное судно ZALA 421-16E2	Продолжительность полета более 4 ч, максимальная высота полета 5000 м, максимальная взлетная масса 7,5 кг, масса целевой нагрузки до 1,5 кг.
Беспилотное воздушное судно ZALA 421-08M	Продолжительность полета 80 мин, максимальная высота полета 3600 м, максимальная взлетная масса 2,5 кг, масса целевой нагрузки 300 г.
ООО НПП «АВАКС-ГеоСервис»	
Беспилотный летательный аппарат DELTA-M	Продолжительность полёта до 2,5 часов, высота полёта 100-3000 м, взлётная масса 9 кг, масса полезной нагрузки до 1,75 кг
Беспилотный летательный аппарат GAMMA	Продолжительность полёта до 12 часов, высота полёта 100-5000 м, взлётная масса 50 кг, масса полезной нагрузки до 25 кг.
Беспилотный летательный аппарат VZOR	Продолжительность полёта до 2,5 часов, высота полёта 150-3000 м, взлётная масса 4,9 кг, масса полезной нагрузки до 1 кг.
ГК «Беспилотные системы»	
Беспилотное воздушное судно вертолетного типа X6M2	Продолжительность полёта до 55 мин, максимальная высота полёта 3600 м, взлётная масса до 8 кг.
Беспилотный конвертоплан Supercam SX350	Размах крыльев 3,2 м, продолжительность полёта до120 мин, рабочая высота полёта 150-3000 м, максимальная взлётная масса 13,5 кг.
Беспилотное воздушное судно Supercam S350	Размах крыльев 3,2 м, продолжительность полета до 4.5 ч, рабочая высота полёта 150-5000 м, взлётная масса 11,5 кг.
Беспилотное воздушное судно Supercam S-250	Размах крыльев 2,53 м, продолжительность полета 3 ч, рабочая высота полёта 150-5000 м, взлетная масса 7,5-9,5 кг.
Беспилотный авиационный комплекс Supercam S150	Размах крыльев 1,5 м, продолжительность полета до 1,5 ч, рабочая высота полёта 150-5000 м, максимальная взлетная масса 5,5 кг.
Беспилотное воздушное судно Supercam S100	Размах крыльев 1м, продолжительность полета до 1 ч, рабочая высота полёта 150-1000 м, взлётная масса 3,5 кг.
Компания «Luftera»	

Название и марка	Основные технические данные
Беспилотный комплекс Luftera LQ-4	Продолжительность полета с нормальной нагрузкой 50 мин, максимальная высота полета 1000 м, максимальная горизонтальная скорость 70 км/ч, масса 5,4 кг
Беспилотный комплекс Luftera LQ-5	Продолжительность полета 60 мин, скорость до 70 км/ч, масса оборудования 3,5 кг, масса комплекса 10,5 кг.
Конвертоплан Luftera LT-1	Продолжительность полета с нормальной нагрузкой 2,5 ч, максимальная высота полета 4000 м, максимальная протяженность маршрута 210 км, максимальная горизонтальная скорость 110 км/ч, масса 6 кг.
ООО «АС-КАМ»	
БПЛА АС-32-12	Продолжительность полета до 4,5 ч, высота полета 50-7000 м, дальность полета до 240 км, скорость полета 65-140 км/ч, масса 10-14 кг.
БПЛА АС-32-10	Продолжительность полета до 5 ч, высота полета 50-7000 м, дальность полета до 240 км, скорость полета 65-140 км/ч, масса до 13,5 кг.
БПЛА АС-32-08	Продолжительность полета до 3 ч, высота полета 50-5000 м, дальность полета до 130 км, скорость полета 60-120 км/ч, масса до 6 кг.
Компания «RoboAvia»	
БПЛА Sapsan-3000	Продолжительность полета 2,5-4 ч, максимальная высота полета 3000 м, скорость полета 72-108 км/ч, максимальная взлетная масса 14 кг.
Компания «СОЕХ»	
Квадтокоптер «Пеликан»	Продолжительность полета 45 мин, дальность полёта 20 км, максимальная скорость 72 км/ч, масса полезной нагрузки 2 кг, масса с аккумуляторами без полезной нагрузки 7,2 кг.
Квадрокоптер «Пеликан Мини»	Продолжительность полета 25 мин, дальность полёта 10 км, максимальная скорость 50 км/ч, масса полезной нагрузки 1 кг.
ООО «Инновационные Комплексные Системы»	
Беспилотное воздушное судно «Фиксар»	Продолжительность полета 240-310 мин, масса полезной нагрузки 5 кг, масса БПЛА 13 кг.
Компания «Птеро»	
Беспилотная авиационная система «Птеро-G1»	Продолжительность полета до 8 ч, высота полета 80-2500 м, скорость полета 85-125 км/ч, масса полезной нагрузки до 5 кг.
ООО «АэроЛаборатория» (RusAeroLab)	
БПЛА R.A.L. X4L	Продолжительность полета до 90 мин, протяженность маршрута полета до 45 км, максимальная высота полета до 5000 м, максимальная скорость полета 55 км/ч, масса 6,5 кг.
БПЛА R.A.L. X6	Продолжительность полета до 50 мин, протяженность маршрута полета до 30 км, максимальная высота полета до 9000 м, максимальная скорость полета 60 км/ч, масса 5,5 кг.
Компания «ПЛАЗ»	
Беспилотный авиационный комплекс «Грифон-41»	Продолжительность полета до 60 мин, максимальная высота до 1000 м, масса полезной нагрузки до 2,5 кг, взлетная масса 9 кг.
Компания «ДИАМ-АЭРО»	
Беспилотная Авиационная Система «ДИАМ 6»	Продолжительность полета до 90 мин, максимальная дальность полета 30 км, максимальная высота до 4000 м, масса полезной нагрузки до 1,4 кг, взлетная масса 6 кг.
Компания «4vision.ru» (официальный дистрибьютор компании «DJI» в России)	
БПЛА Phantom 4 RTK	Максимальное время полета около 30 минут, высота полета до 6000 м, макс. Скорость 58 км/ч, размер по диагонали 350 мм, взлетная масса 1391 г.
Комплекс Phantom 4 Multispectral	Максимальное время полета около 27 минут, высота полета до 6000 м, макс. скорость 58 км/ч, размер по диагонали 350 мм, взлетная масса 1487 г.
Платформа DJI Matrice 210 V2	Максимальное полетное время 13-38 мин, максимальный потолок над уровнем моря 3000 м, масса полезной нагрузки 1,34 кг, максимальный взлетный вес 6,14 кг, масса 3,84-4,57 кг

Название и марка	Основные технические данные
Платформа DJI Matrice 200 V2	Максимальное полетное время 13-38 мин, максимальный потолок над уровнем моря 3000 м, масса полезной нагрузки 1,61-2,34 кг, максимальный взлетный вес 6,14 кг, масса 3,8-4,53 кг

а б в г

Рис. 1. Беспилотные летательные аппараты Ebee SQ (а), OMNI AG (б), Геоскан Lite (в), M5 AGRO (г)

Ряд БПЛА, предлагаемых компаниями и представленные в таблице 2, являются специализированными комплексами (платформами) с комплектацией, в том числе, для обследования земель сельскохозяйственного назначения.

Например, беспилотный комплекс сельскохозяйственного назначения M5 AGRO АО «Геомир» (табл. 2, рис. 1г) позволяет получать и самостоятельно обрабатывать информацию о состоянии полей и выполняемых на них операциях. В состав комплекта входит: БПЛА Альбатрос M5 ООО «Альбатрос», фотокамера Sony a6000, наземная станция управления и программное обеспечение для программирования, наблюдения и управления комплексом и фотограмметрической обработки данных. Результаты аэрофотосъемки сельхозугодий можно интегрировать в систему комплексной автоматизации предприятия: облачный сервис «История поля», программы и оборудование для точного земледелия АО «Геомир» [5].

БПЛА Optiplane S2 ООО «Оптиплейн Аэродинамика» в комплектации «Агро» предназначен для уточнения границ посевных площадей, подсчёта неудобицы; составления картограмм точечного внесения удобрений; прогнозирования объемов урожая; планирования и контроля проведения агротехнических мероприятий в реальном времени [6].

Беспилотный комплекс Геоскан 201 Агро группы компаний «Геоскан» является специальной версией для сельского хозяйства на базе БПЛА Геоскан 201 PRO. Разработан для решения целого спектра задач сельского хозяйства: обследование и инвентаризация земель, сопровождение мелиоративного строительства, оперативное создание карт NDVI, планирование внесения удобрений и контроль проведения агротехнических мероприятий. После проведения обследования могут быть сформированы файлы с заданием на выполнение работ для сельскохозяйственной техники. Способен за один полет собрать данные на площади до 2200 га [7].

Выводы. Перспективной альтернативой и дополнением к традиционным методам мониторинга земель является использование БПЛА, основным достоинством которых является рентабельность, возможность съемки с небольших высот и вблизи объектов, высокая разрешающая способность при простоте съемочной аппаратуры, оперативность получения снимков, что обеспечивает оптимальное соотношение между качеством данных и их стоимостью. Перспективность использования БПЛА для обследования состояния земель сельскохозяйственного назначения подтверждается ростом в последние годы числа компаний, занимающихся их разработкой, номенклатуры предлагаемых моделей и спектра услуг, предоставляемых данными компаниями для сельского хозяйства.

Использованные источники

1. Доклад о состоянии и использовании земель сельскохозяйственного назначения Российской Федерации в 2018 году. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2020. – 340 с.

2. Гольтяпин В.Я., Мишуров Н.П., Федоренко В.Ф. и др. Цифровые технологии для обследования состояния земель сельскохозяйственного назначения беспилотными летательными аппаратами: аналит. обзор. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2020. – 88 с.
3. Best Drones For Agriculture 2020: The Ultimate Buyer's Guide. [Электронный ресурс] https://bestdroneforthejob.com/drone-buying-guides/agriculture-drone-buyers-guide/ (дата обращения 10.06.2021)
4. Best Drones for Agriculture: 2021 Guide. [Электронный ресурс] https://blog.flykit.app/best-drones-for-agriculture/ (дата обращения 10.06.2021)
5. Сельскохозяйственные беспилотники. [Электронный ресурс] https://www.geomir.ru/catalog/bpla/ (дата обращения 10.06.2021)
6. Наши продукты. [Электронный ресурс] http://optiplane.ru/#product (дата обращения 06.06.2021)
7. Продукты. [Электронный ресурс] https://www.geoscan.aero/ru/products (дата обращения 06.06.2021)

MODERN DRONES FOR AGRICULTURAL LAND SURVEY

V. YA. GOLTYAPIN, T. A. SHCHEGOLIKHINA
Russian Research Institute of Information and Feasibility Study on Engineering Support of Agribusiness, the Federal State Budgetary Scientific Institution («Rosinformagrotekh», FSBSI)

Summary. The substantiation of the use of UAVs for the survey of agricultural lands, their nomenclature, basic technical data and the range of tasks to be solved are given. It is shown that in order to ensure a full-fledged monitoring of lands, it is necessary, along with traditional methods, to apply new ones based on the use of unmanned aerial vehicles.

Keywords. UAV, drone, land, field, monitoring, survey, information.

СИСТЕМЫ, МОДЕЛИ, МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ, КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ N, P, K В ЧЕРНОЗЕМЕ ВЫЩЕЛОЧЕННОМ ДЛЯ КАТЕГОРИИ ЗЕМЕЛЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДОЗА – ОТВЕТ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Г. П. ГЛАЗУНОВ, А. С. ЯКОВЛЕВ, М. В. ЕВДОКИМОВА, С. С. ОГОРОДНИКОВ
Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (МГУ),
Москва, soil.resources@mail.ru;

Аннотация. В работе определены оптимальные концентрации N, P, K в почве на основе модели доза-ответ (Гендугов, Глазунов, 2014) по материалам детальной космической съемки и подспутниковых наблюдений на примере чернозема выщелоченного для категории земель сельскохозяйственного назначения. В рамках приближений сплошной среды описана макроскопическая кинетика и закономерности пространственной изменчивости NDVI в зависимости от химического состава почв.

Ключевые слова. экологическое состояние, биоиндикация, математическое моделирование, анализ данных дистанционного зондирования Земли, вегетационный индекс, природный фон.

Введение

Постановлением Правительства Российской Федерации от 13.02.2019 г. № 149 введено в действие «Положение о разработке, установлении и пересмотре нормативов качества окружающей среды для химических и физических показателей состояния окружающей среды», которое определило основные принципы разработки нормативов качества окружающей среды. Несмотря на то, что для оценки качества почв для категории земель сельскохозяйственного назначения по химическим веществам установлены гигиенические нормативы (СанПиН 1.2.3685-21), для осуществления мониторинга земель сельскохозяйственного назначения нерешенным остается вопрос установления фоновых и оптимальных значений показателей химического состояния почв. Постановлением Правительства РФ № 149 определено, что значения показателей природного фона территорий устанавливаются на основании данных наблюдений за состоянием окружающей среды по химическим и физическим показателям на эталонных участках со сходными природными условиями при отсутствии признаков деградации.

Нормативы качества почв для земель сельскохозяйственного назначения должны включать нормативы плодородия почв и обеспечивать получение сельскохозяйственной продукции, безопасной для здоровья человека («Об охране почв», 2007). В этой связи нами была предпринята попытка определить оптимальные концентрации N, P, K в почве на основе модели доза-ответ (Гендугов, Глазунов, 2014) по материалам детальной космической съемки и подспутниковых наблюдений на примере чернозема выщелоченного для категории земель сельскохозяйственного назначения. Имея в виду работу (Глазунов и др., 2019), в которой в рамках приближений сплошной среды удалось успешно описать макроскопическую кинетику и закономерности пространственной изменчивости NDVI в зависимости от химического состава почв, представляется возможным испытать эту методику и в применении к установлению оптимальных и фоновых значений некоторых химических показателей состояния почв земель сельскохозяйственного назначения, в основе которого – анализ пространственных закономерностей изменения NDVI.

Объекты и методы исследования

На территории хозяйства «Опытное поле», расположенного в Куркинском районе Тульской области, в июне 2019 г. было заложено 20 пробных площадок (рис. 1), характеризующихся

отсутствием внешних признаков деградации. Со всех пробных площадок отобрали пробы с глубины 0 – 5 см. Химический состав исследуемых почв приведен в таблице 1.

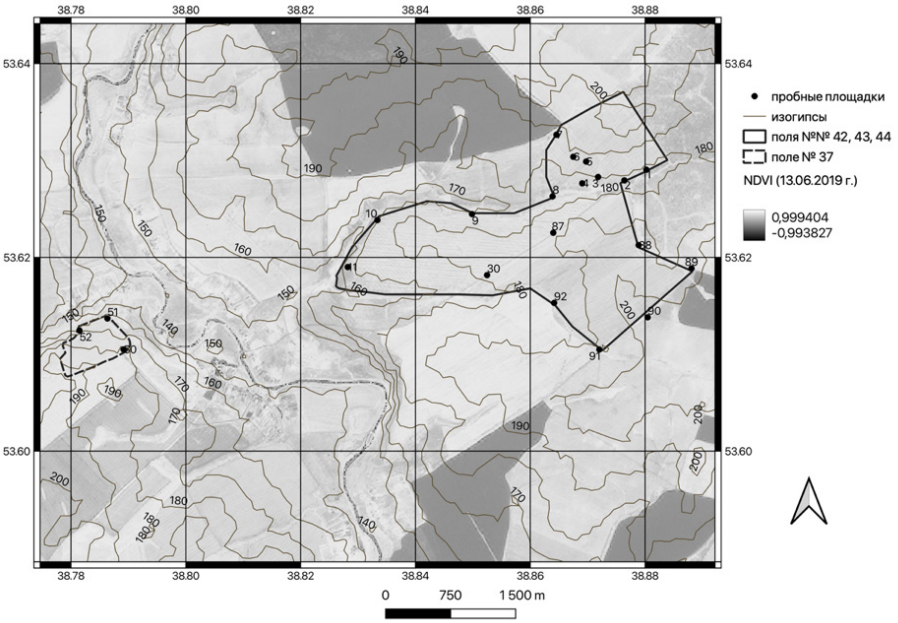


Рис. 1. Расположение пробных площадок в рельефе

Таблица 1. Химический состав почв

П/п	№ поля	pH	C орг., %	P, мг/кг	K, мг/кг	Mn, мг/кг	Cu, мг/кг	Zn, мг/кг	B, мг/кг	Ca, мг/кг	Mg, мг/кг	N_NH4, мг/кг	z, мг/кг
1	43	5,8	6,5	81,1	178,3	24,1	0,1	0,2	2,2	54,8	6,5	8,9	17,0
2	»	5,9	6,2	262,9	328,8	29,0	0,1	0,2	2,6	57,2	6,2	12,1	21,6
3	»	5,7	7,4	202,3	255,5	27,9	0,1	0,3	2,1	50,0	6,0	9,0	20,8
4	»	5,9	7,2	66,7	136,8	15,1	0,1	0,4	2,3	57,6	6,5	9,1	17,6
5	»	5,7	6,7	68,0	210,7	22,9	0,1	0,2	2,0	50,0	5,5	8,2	16,3
6	»	5,8	7,4	61,1	134,1	13,1	0,1	0,2	2,0	55,2	5,5	12,5	14,9
7	»	6,4	8,1	114,0	331,3	8,2	0,1	0,2	2,2	50,8	5,3	3,4	15,5
9	42	6,1	6,7	101,8	177,4	17,6	0,1	0,4	2,2	53,2	5,8	15,3	20,5
10	»	6,5	4,8	54,9	125,6	11,6	1,1	0,1	1,8	58,4	4,8	9,6	17,7
11	»	8,0	5,8	32,0	68,0	9,8	0,7	0,1	1,9	69,2	2,4	3,5	12,8
30	44	4,9	7,1	159,9	411,8	7,1	0,2	0,4	2,0	64,0	6,2	4,5	20,0
50	37	8,1	6,1	136,4	141,8	6,1	0,1	0,1	1,9	76,0	3,4	2,9	13,0
51	»	6,6	6	94,5	116,2	4,2	0,1	0,2	2,1	65,6	6,2	57,0	16,7
52	»	6,8	5,1	60,2	126,7	4,1	0,1	0,1	1,9	34,8	2,9	6,7	10,5
87	44	6,1	7,7	82,9	233,4	3,4	0,5	0,3	2,6	62,4	4,6	4,5	17,2
88	»	5,9	7	51,4	105,7	4,3	0,2	0,3	2,3	60,4	3,8	5,2	13,4
89	»	5,9	6,2	74,9	139,4	3,3	0,3	0,2	2,4	58,8	4,1	4,7	14,3
90	»	5,8	7,7	2035,2	299,4	4,5	0,1	0,2	2,4	73,6	6,7	3,2	20,5
91	»	5,4	6,9	209,4	357,0	4,6	0,1	0,3	1,1	62,0	7,0	3,2	15,0
92	»	6,0	7,8	136,4	200,7	8,5	0,1	0,3	2,6	73,2	6,0	3,8	17,3

z* – среднее геометрическое, мг/кг.

В районе исследования преобладают черноземы выщелоченные разной степени смытости в сочетании с лугово-черноземными и дерново-карбонатными почвами. В момент исследования на полях возделывалась яровая пшеница.

Из общего числа пробных площадок выбрали однородные по типу возделываемых культур, местоположению в рельефе, крутизне уклона поверхности и морфогенетической принадлежности почв. Условиям однородности соответствовали пункты №№ 3-6, 9, 30, 87-90.
Материалы дистанционного зондирования в форме NDVI для однородных во всех отношениях, кроме химического состава почвы, пунктах анализировали с использованием выведенной ранее модели (Гендугов, Глазунов, 2014):

$$q = \Lambda \mathrm{c}^{-B} exp\left(\frac{\mathrm{K}}{\mathrm{c}}\right). \quad (1)$$

В уравнении (1) Λ – масштабирующий коэффициент, K – коэффициент, характеризующий интенсивность возрастания фотосинтетически активной биомассы (q=NDVI) в ответ на рост показателя концентрации, с (мг/кг), B – коэффициент, характеризующий интенсивность убывания фотосинтетически активной биомассы. В качестве оценки расчетного максимума NDVI использовали максимальные за вегетационный сезон наблюденные значения по материалам Sentinel-2 от 13.06.2019 г. из источника ВЕГА-Science.
Значения коэффициентов уравнения (1) находили подгонкой по способу наименьших квадратов с использованием созданного авторами на языке программирования Python 3 алгоритма и библиотек SciPy, NumPy, Pyeq3 и Matplotlib. Для иллюстрации точности приближения модели на графике наряду с теоретической кривой и экспериментальными точками синим пунктиром приведены 95% доверительные интервалы.
С использованием пакета программ компьютерной алгебры Maxima и полученных указанным способом коэффициентов моделей и анализом производных первого, второго и третьего порядка по z и c для модели (1), находили особые точки модели, разделяющие кривые отклика на интервалы, характеризуемые сходством макроскопической кинетики.
Цифровую модель рельефа построили по материалам радарной съемки SRTM с использованием QGIS 3.18.1. Анализ растровых карт NDVI по данным Sentinel-2 из источника ВЕГА-Science и подготовку картографических материалов проводили в QGIS 3.18.1.
Найдя константы и особые точки уравнения (1), определи оптимальные значения показателей плодородия почв, а также диапазоны их фоновых значений. Точке максимума модели c_4 соответствуют оптимальные значения показателей, а в диапазоне от c_3 до c_4 лежат фоновые значения показателей.

Результаты и обсуждение

Аналитическое решение теоретической модели, выведенной ранее (Гендугов, Глазунов, 2014) в рамках законов сохранения механики, макроскопической химической и биохимической кинетики, представлений сплошной среды и теории подобия и анализа размерности, апробировано на экспериментальных данных по изучению отклика посевов яровой пшеницы в форме показателя концентрации фотосинтетически активной биомассы (q=NDVI) в ответ на рост концентрации в почве ведущего компонента c (мг/кг) или комплексного показателя z (мг/кг) (табл. 2, рис. 2).
Установлено, что модель адекватна нелинейному отклику состояния посевов пшеницы на разное содержание N, P и K в почвах сельхозугодий, и позволяет вычислить их оптимальное содержание в почве, которое соответствует максимуму ответа сельскохозяйственной культуры на разные концентрации N, P и K (рис. 2).

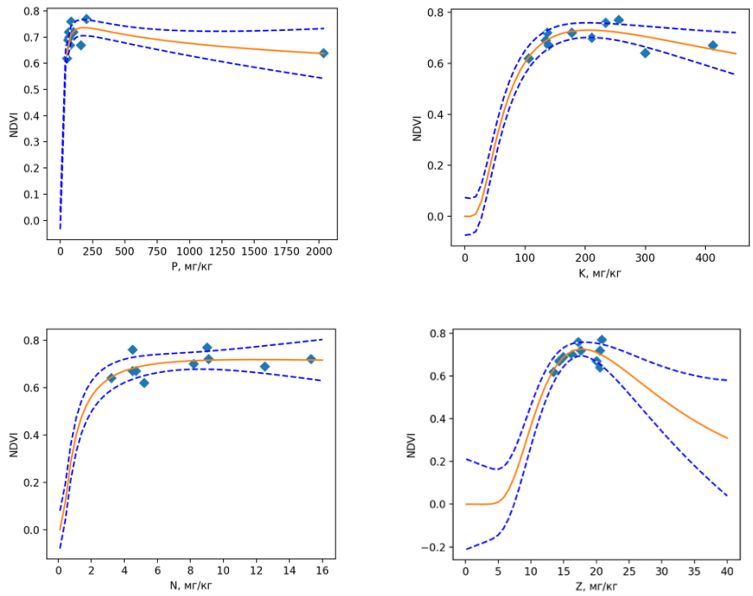


Рис. 2. Зависимость вегетационного индекса NDVI, рассчитанного по материалам Sentinel-2 (13.06.2019 г.), от концентрации в почве N, P, K и от результирующей концентрации z всех исследованных элементов (точки соответствуют пробным площадкам, сплошные линии – уравнению (1), пунктирные линии – доверительным интервалам для модели)

Таблица 2. Константы и абсциссы особых точек модели (1) (мг/кг)

Вариант	Λ	B	K	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6
z	319099,20	3,35	59,62	6,17	9,26	12,78	17,79	26,32	34,42
N	0,94	0,08	0,91	0,19	0,43	0,68	12,04	23,65	35,25
P	1,32	0,09	16,92	3,46	7,89	12,37	178,46	349,02	519,55
K	25,85	0,56	116,01	20,62	41,21	62,70	205,67	370,13	533,70

Выводы

На примере яровой пшеницы показана адекватность теоретической модели отклика состояния посевов в фазовой плоскости «доза-ответ» на содержание азота, фосфора и калия, а также на результирующую концентрацию всех исследованных компонентов субстрата, что открывает возможность точного определения оптимального удобрения по результатам полевых опытов, в том числе при использовании комплекса удобрений.

Благодарности

Исследование выполнено частично при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды», а также в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации «Почвенные информационные системы и оптимизация использования почвенных ресурсов» (Номер ЦИТИС: 121040800147-0).

Список литературы / References

1. ВЕГА-Science. [Электронный ресурс]. http://sci-vega.ru. (Дата обращения: 01.05.2021 г.).
2. Гендугов В. М., Глазунов Г. П. Макрокинетическая модель микробного роста на многокомпонентном субстрате // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2014. № 3. С. 10–16.

3. Глазунов Г. П., Гендугов В. М., Евдокимова М. В., Титарев Р. П., Шестакова М. В. Макроскопическая кинетика временной и пространственной изменчивости вегетационного индекса NDVI на территории заповедника «Ямская степь» в условиях загрязнения почвы тяжёлыми металлами // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 111–127.
4. Модельный закон «Об охране почв» принят на двадцать девятом пленарном заседании Межпарламентской Ассамблеи государств - участников СНГ (постановление № 29-16 от 31 октября 2007 года).
5. Постановление Правительства РФ от 13.02.2019 № 149 «О разработке, установлении и пересмотре нормативов качества окружающей среды для химических и физических показателей состояния окружающей среды, а также об утверждении нормативных документов в области охраны окружающей среды, устанавливающих технологические показатели наилучших доступных технологий» (вместе с «Положением о разработке, установлении и пересмотре нормативов качества окружающей среды для химических и физических показателей состояния окружающей среды»).
6. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 № 2 «Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания»».
7. Система компьютерной алгебры Maxima. [Электронный ресурс]. 2017. Дата обновления 17.03.2020 г. URL: https://sourceforge.net/projects/maxima/. (Дата обращения: 01.05.2021 г.).
8. SRTM 90m DEM Digital Elevation Database. [Электронный ресурс]. 2004. Дата обновления 01.11.2018 г. URL: https://srtm.csi.cgiar.org. Дата обращения: 01.05.2021 г.).
9. Свободная географическая информационная система с открытым кодом QGIS. [Электронный ресурс]. 2021. URL: https://qgis.org/ru/site/forusers/download.html

DETERMINATION OF OPTIMAL CONCENTRATIONS OF N, P, K IN LEACHED CHERNOZEM FOR THE CATEGORY OF AGRICULTURAL LAND BASED ON THE THEORETICAL DOSE – RESPONSE MODEL, BASED ON REMOTE SENSING DATA

G. P. GLAZUNOV, A. S. YAKOVLEV, M. V. EVDOKIMOVA, S. S. OGORODNIKOV
Lomonosov Moscow State University (MSU), Moscow, soil.resources@mail.ru

Abstract. The optimal concentrations of N, P, and K in the soil are determined on the basis of the dose-response model (Gendugov and Glazunov, 2014) based on detailed satellite imagery and subsatellite observations on the example of leached chernozem for the category of agricultural land. The macroscopic kinetics and patterns of spatial variability of NDVI depending on the chemical composition of soils are described in the framework of the continuous medium approximation.

Keywords. ecological state, bioindication, mathematical modeling, analysis of Earth remote sensing data, vegetation index, natural background concentration.

КОНФИГУРАЦИЯ ОБЛАЧНОЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ АГРАРНОЙ ПЛАТФОРМЫ С ЭЛЕМЕНТАМИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Н. И. ВОРОБЬЕВ[1], В. П. ЯКУШЕВ[2], В. В. ЯКУШЕВ[2], В. Н. ПИЩИК[1,2], Я. В. ПУХАЛЬСКИЙ[1]
[1]ФГБНУ ВНИИСХМ,
[2]ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт» (ФГБНУ АФИ)

Аннотация. С развитием Интернет-сетей и появлением облачных *BigData*-платформ стало возможным создание специализированной облачной научно-исследовательской аграрной *AI*-платформы, которая позволяет осуществлять цифровую визуализацию длительных цикличных биосистемных процессов, используя системы искусственного интеллекта. Цифровая визуализация предоставляет уникальную возможность изучения сверхдлительных аграрных процессов во всем многообразии физиологических состояний микробно-растительных биосистем и в любом по длительности временном интервале. Продуктом коллективного пользования аграрной облачной *AI*-платформы могут стать отлаженные алгоритмы вычислительных операций и интеллектуальные вычислительные процедуры для обработки мониторинговых аграрных данных. С помощью интеллектуальных вычислительных процедур *AI*-платформы появляется уникальная возможность относительно быстро провести теоретический вычислительный анализ длительных цикличных биосистемных процессов и прогнозировать финальные стационарные состояния биосистем в зависимости от аграрных технологий.

Ключевые слова: система искусственного интеллекта, когнитивные треки для цифровой визуализации цикличных биосистемных процессов.

С появлением высокопроизводительных вычислительных устройств, скоростных Интернет-сетей и средств дистанционного контроля за природными экосистемами (17. Якушев, 2016) стало возможной не только обработка биологических, агрофизических и агрохимических мониторинговых данных (12. Полуэктов, 2006, Шафран, 2019), но и решение масштабных оптимизационных задач с привлечением *BigData*-платформ, собирающих аграрные данные, и *Artificial-Intelligence*-платформ (*AI*-платформ), содержащих вычислительные системы искусственного интеллекта (11. Павлов, 2011; 5. Гусарова, 2018; 6. Душкин, 2019). Системы искусственного интеллекта на *AI*-платформе необходимы для визуализации в цифровой форме сложных многоуровневых динамичных процессов, происходящих в природных биосистемах (1. Авербух, 2005).

С искусственным интеллектом связывают прогресс систем распознавания изображений и речи и систем медицинской диагностики (15. Хайкин, 2006; 13. Рассел; 2016; 4. Гафаров, 2018; 9. Мюллер, 2019). Первые шаги успешного применения искусственного интеллекта были сделаны в компьютерных системах распознавания текстов и речи (7. Журавлев, 2006; 14. Фисенко, 2008), использующие навигацию по когнитивным трекам, подобным нейронным сетям (10. Николаева, 2015; 2. Вакуленко, 2018; 8. Маркин, 2019).

Навигация по когнитивным трекам сопровождается следующими действиями. При наведении фокуса навигации на узел трека автоматически запускаются вычисления тех процессов, на которые имеются ссылки в данном узле. Если, например, диагностируется совпадение звуков или изображений (рис. 1), то фокус навигации переносится к узлу, следующему по номеру. В противном случае навигация прекращается. Если во всех узлах прошла успешная идентификация изобразительных или звуковых объектов, то в конце ветви трека делается вывод относительно всего слова целиком и в отношении объекта, обозначенного данным словом.

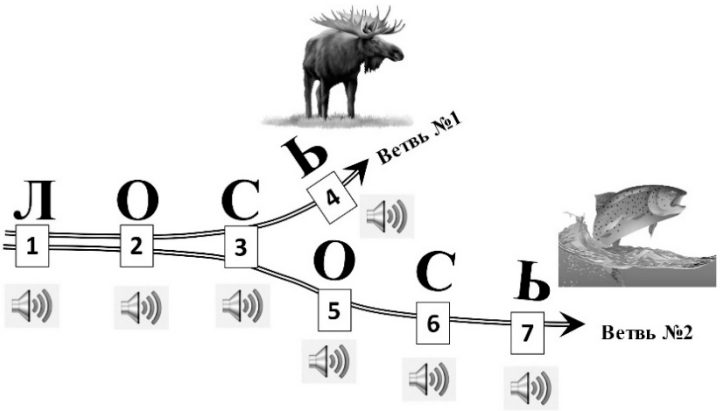


Рис. 1. Когнитивный трек с узлами и двумя ветвями для распознавания звуковых и текстовых образов

Модульная структура облачной аграрной *AI*-платформы может быть представлена четырьмя взаимосвязанными программными модулями (ПМ), содержащими набор необходимых вычислительных процедур (рис. 2). Процедуры ПМ1 обрабатывают эмпирические данные и определяют значения параметров математических моделей, представленных процедурами ПМ2. ПМ3 содержит когнитивные треки, по которым осуществляется последовательная навигация и управляемый запуск вычислений по моделям ПМ3. Процедуры ПМ4 контролируют точность вычислений.

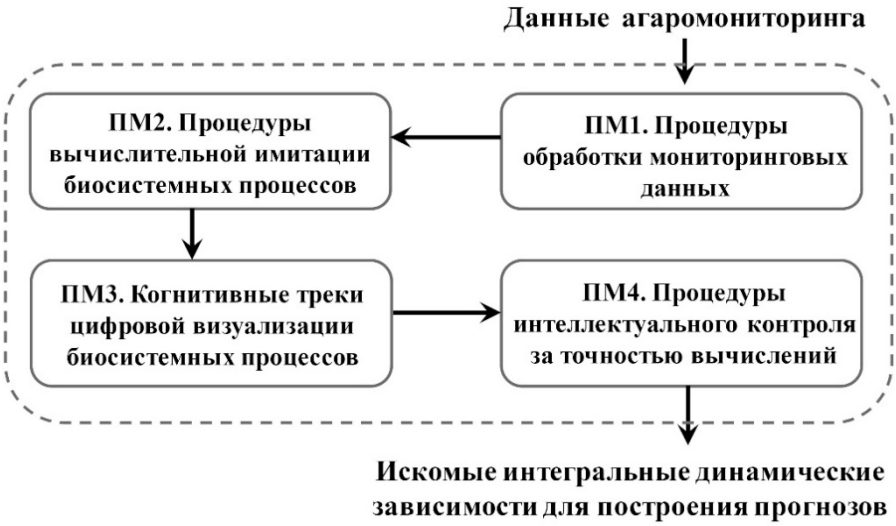


Рис. 2. Схема связей программных модулей (ПМ) в облачной вычислительной аграрной *AI*-платформе.

Для визуализации цикличных процессов в микробно-растительных биосистемах нами была создана пара рекурсивных когнитивных треков (рис. 3) (З. Воробьев, 2014), в которых вместо узлов используются программные блоки.

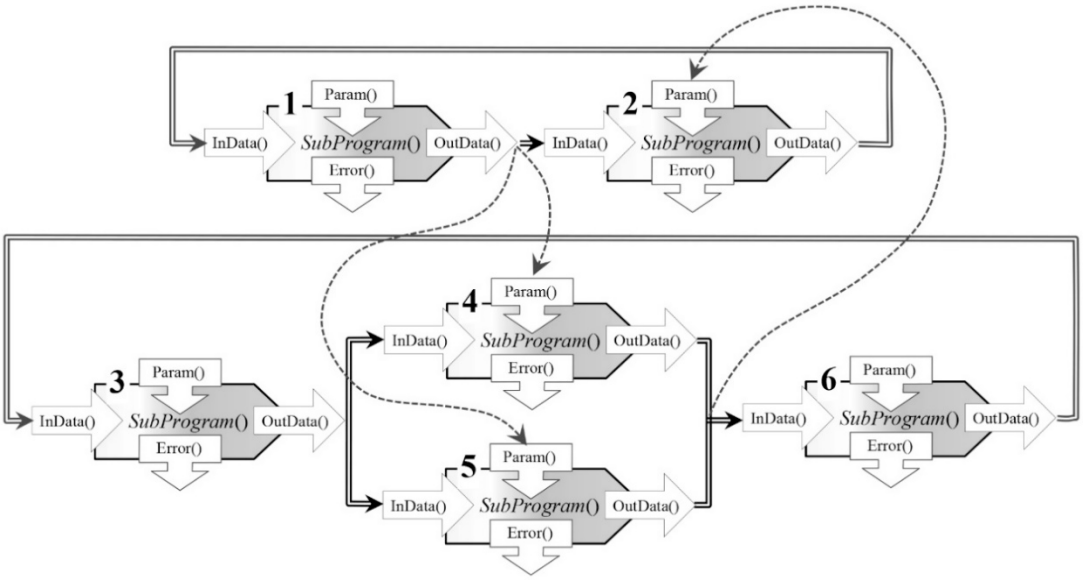


Рис. 3. Рекурсивные когнитивные треки: растительный (сверху) и микробиологический (снизу) – для визуализации в цифровой форме процессов в микробно-растительных биосистемах.

Каждый блок когнитивных треков (рис. 3) связан с определенным биосистемным процессом. Ячейки памяти InData() и OutData() в блоках предназначены для хранения значений входных и выходных переменных соответствующего процесса, а в ячейках Param() и Error() хранятся значения параметров модели процесса и ошибки вычислений. Преобразование InData() в OutData() в каждом блоке выполняется соответствующей подпрограммой SubProgram(). Рекурсия в треках (рис. 3) обеспечивает непрерывные вычисления динамических процессов на протяжении заданного числа жизненных микроэволюционных циклов биосистем.

На основании изложенного можно утверждать, что внедрение разных форм системы искусственного интеллекта в пользовательские сервисы облачной аграрной *AI*-платформы является перспективным, так как значительно расширяет ее вычислительные возможности и позволяет сравнительно быстро изучить динамику длительных цикличных процессов в сложных многокомпонентных биосистемах, а также позволяет определить производительность биосистем в финальных стационарных состояниях, зависящих от внешних экологических условий и от применяемых агротехнологий. В натурных экспериментах на изучение таких зависимостей требуются многие годы.

Список литературы

1. Авербух В.Л. К теории компьютерной визуализации // Вычислительные технологии. Т. 10. № 4. 2005. С. 21-51.

2. Вакуленко С.А., Жихарева А.А. Практический курс по нейронным сетям // СПб: Университет ИТМО, 2018. 71 с.

3. Воробьев Н.И., Пищик В.Н., Проворов Н.А., Свиридова О.В. Моделирование стохастических связей в виртуальных моделях микробно-растительных систем. – Материалы международного семинара «Математические модели в теоретической экологии и земледелии» посвященного памяти профессора Ратмира Александровича Полуэктова (Полуэкстовские чтения) // Санкт-Петербург, 14-16 октября 2014 г.-СПб.: АФИ, 2014. С. 77–79.

4. Гафаров Ф.М. Галимянов А.Ф. Искусственные нейронные сети и приложения: учеб. пособие // Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2018. 121 с.

5. Гусарова Н.Ф. Введение в теорию искусственного интеллекта // СПб: Университет ИТМО, 2018. 62 с.
6. Душкин Р.В., Андронов М.Г. Гибридная схема построения искусственных интеллектуальных систем // Кибернетика и программирование. 2019. № 4. С. 51–58.
7. Журавлев Ю.И., Рязанов В.В., Сенько О.В. Распознавание. Математические методы. Программная система. Применения // Москва: Фазис, 2006. 176 с.
8. Маркин Е.И., Зупарова В.В., Сальников И.И. Распознавание рукописного текста с использованием нейронных сетей // Научное обозрение. Педагогические науки. 2019. № 3-2. С. 44-47.
9. Мюллер Д. П., Массарон Л. Искусственный интеллект для чайников. // СПб.: «Диалектика», 2019. 384 с.
10. Николаева С.Г. Нейронные сети. Реализация в Matlab: учебное пособие // Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2015. 92 с.
11. Павлов С.Н. Системы искусственного интеллекта: учеб. пособие // Томск: Эль Контент, 2011. Ч. 1. 176 с.
12. Полуэктов Р.А., Смоляр Э.И., Терлеев В.В., Топаж А.Г. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур // СПб.: Изд-во СПбГУ. 2006. 396 с.
13. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход, 2-е изд. / М.: ООО «И.Д. Вильяме», 2016. 1408 с.
14. Фисенко В.Т., Фисенко Т.Ю., Компьютерная обработка и распознавание изображений: учеб. пособие // СПб: СПбГУ ИТМО. 2008. 192 с.
15. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс // М.: Издательский дом «Вильямс». 2006. 1104 с.
16. Шафран С.А. Почва, удобрения, урожай // М.: Издательство Листерра, 2019, 471 с.
17. Якушев В.В. Точное земледелие: теория и практика// СПб.: ФГБНУ АФИ.2016.364 с.

МОНИТОРИНГ АЗОТНОГО ПИТАНИЯ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

И. С. БЛЕКАНОВ[1], А. Е. МОЛИН[2], Е. С. РАЗУМИЛОВ[3], Е. А. ЕРШОВ[4]
[1] ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет» (ФГБОУ ВО СПбГУ), Санкт-Петербург, i.blekanov@spbu.ru;
[2] ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет» (ФГБОУ ВО СПбГУ), Санкт-Петербург, st084824@student.spbu.ru;
[3] ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет» (ФГБОУ ВО СПбГУ), Санкт-Петербург, st068863@student.spbu.ru;
[4] ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет» (ФГБОУ ВО СПбГУ), Санкт-Петербург, st068530@student.spbu.ru;

Аннотация. Работа посвящена исследованию проблем применения современных инструментов и технологий интеллектуального анализа данных к изучению агрофизических процессов. В частности, авторы исследуют автоматизацию мониторинга азотного питания зерновых культур в виде обработки и анализа, посредством нейронных сетей, снимков изображений (в формате GeoTIFF) сельскохозяйственного поля с засеянной яровой пшеницей, сделанных квадрокоптером Геоскан-401. Приводится обзор современных архитектур сверточной нейросети, таких как, U-Net, Attention U-Net, Attention R2U-Net, DeepLabv3+, применимых к задаче сегментации изображений. Описывается эксперимент по оценке качества использования архитектуры U-Net в задаче сегментации реальных снимков изображений с яровой пшеницей.

Ключевые слова: азотное питание, сегментация изображения, нейронная сеть, U-Net

Введение

За последние несколько лет с развитием цифровизации в сельскохозяйственных науках стало появляться все больше научных работ ((R. Taghizadeh-Mehrjardi et al., 2020), (T. -Y. Lee et al., 2020), (Sanjay Patidar et al., 2020)) по применению методов обработки изображений и нейросетевых технологий к решению агрофизических задач. Однако большая часть исследований основываются на использовании классических методов машинного обучения и моделей нейронных сетей, которые в настоящее время по качеству уступают современным (state-of-the-art) нейросетевым моделям. К таким современным моделям относятся модели трансферного обучения (Priit Ulmas et al., 2020) и сверточные нейронные сети (Liang-Chieh Chen et al., 2018), которые часто применяются к задачам анализа медицинских изображений и распознаванию лиц (Olaf Ronneberger et al., 2015). В данной работе ставится эксперимент, в котором оценивается эффективность применения современной нейросетевой архитектуры U-Net к задаче сегментации изображения сельскохозяйственного поля по уровню азотного питания засеянной на нем яровой пшеницы.

Объекты и методы исследования

Постановка эксперимента и построение датасета

Объектом исследования являются снимки изображений сельскохозяйственного поля с засеянной яровой пшеницей, сделанных квадрокоптером Геоскан-401. Данные снимки объединены в фотографию сельскохозяйственного поля большого разрешения в формате GeoTIFF и имеют 7 каналов (средний размер полученного ортофотопокрытия – 14 Гб). Первые три канала – это цветные изображения RGB (красный, зеленый, синий цвет). Четвертый и пятый каналы – это инфракрасный спектр (RedEdge и NIR). Шестой канал – индекс NDVI, обозначающий нормализованный относительный индекс растительности. Седьмой канал – это размеченные экспертами-агрономами тестовые площадки. Общее количество таких площадок составляло 12 штук, на которых был известен уровень азотного питания. Уровень азота был разделен на 6 классов в промежутке от 0 кг до 200 кг.

После обработки полученное фото было представлено как тензор, состоящий из 7 наложенных друг на друга матриц. В каждой матрице находилось числовое значение, отображающее отдельный признак снимка: значение по каждому приведенному выше каналу и значение, отвечающее за уровень азотного питания на размеченных площадках, которое и требовалось научиться определять автоматически. В связи с этим, в работе был поставлен эксперимент по оценке качества сегментации построенного ортофотопокрытия по уровню азота как с помощью классических методов машинного обучения (в частности, Random forest (Barinova et al, 2012)), так и с использованием современной архитектуры сверточной нейронной сети U-Net.

Ввиду большого размера полученного ортофотопокрытия поля, исходное изображение делилось на отдельные объекты:

– для Random forest таким объектом является отдельный пиксель с 6 признаками (R, G, B, RedEdge, NIR, NDVI)
– для Unet – отдельным объектом будет являться часть изображения фиксированного размера. Чтобы получить объекты для обучения использовались снимки с описанными выше 12 тестовыми площадками, в которых известен уровень азота. Такие снимки были разделены пополам на тестовые данные и данные для обучения. Таким образом, для каждого размеченного снимка получаем по два изображения с одинаковым уровнем азота. Эти два изображения были перемешаны между собой так, чтобы пиксели изображений, которые будут использованы для обучения и для оценки качества алгоритма были разные. В результате были получены 6 изображений для обучения нейросети и столько же для тестирования. Для расширения обучающей выборки использовались техники перемешивания изображений с разным уровнем азота и техники аугментации (повороты и т.д.).

Оценка качества сегментации проводилась значением коэффициента Жаккара по формуле:

$$J = \frac{TP}{TP + FP + FN}$$

Нейросетевые модели

U-Net является одной из первых нейронных сетей для решения задачи сегментации изображений, демонстрирующей высокие качественные оценки по многим задачам обработки изображений, таким как детектирование изображений (X. Yang., 2019), классификация и сегментация медицинских изображений (Olaf Ronneberger et al., 2015; Md Zahangir Alom., 2018) и т.п. Архитектура сети U-Net представлена на рисунке ниже:

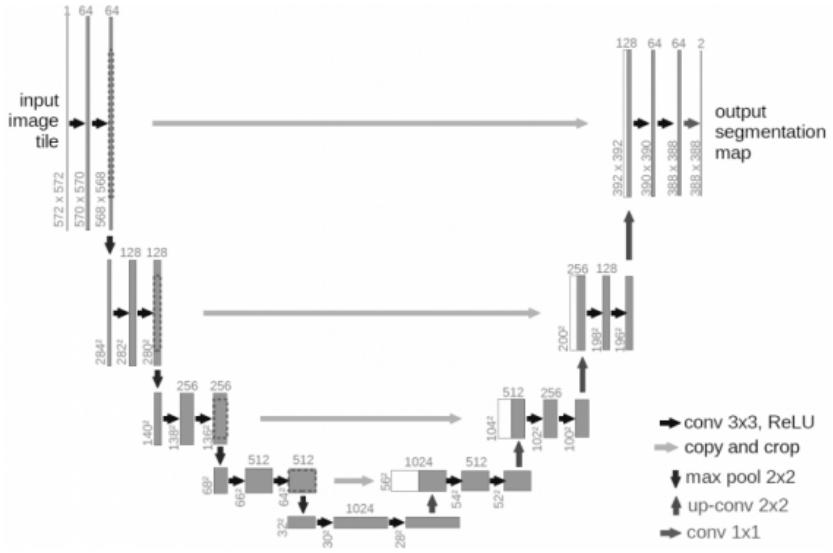


Рис. Архитектура Unet

Большинство последующих моделей глубокого обучения основано на улучшении и добавлении новых слоев к U-Net, как, например, поступили авторы модели под названием DeepLabv3+ (Liang-Chieh Chen et al., 2018). Принцип работы сети тот же, что и у U-Net, только сеть немного усложнена и добавлены дополнительные слои для выделения большего числа признаков.

Также существует множество приемов-надстроек над уже готовой сетью: например, изменение самой методологии обучения hierarchical multi-scale attention (Andrew Tao, 2020), или построение CRF (X. Hu et al., 2018) (условного случайного поля) на уже готовых признаках, полученных нейросетью.

В последнее время также появляются модели, которые отходят от стандартной модели «энкодер-декодер», например, архитектура HRNet, которая просто применяет различные свертки на различных разрешениях одного и того же изображения, что приводит к получению большого числа признаков, которые в последствии объединяются в одно изображение.

Таким образом, существует множество различных нейросетевых подходов, которые могут решать задачу данного исследования, но необходимо отметить, что в сфере агротехнологий используются не самые лучшие модели, поэтому реализация state-of-the-art методов глубокого обучения может существенно улучшить качество решения уже существующих задач в агрофизике.

Результаты эксперимента

После обучения моделей точность работы методов Random forest и U-Net проверялась на 6 изображениях. Для U-Net была составлена матрица ошибок (см. таблицу 1): строки – классы (по количеству азота в кг.), столбцы – предсказанные классы. Каждая клетка таблицы – количество пикселей, соотнесенных нейросетью U-Net к соответствующему классу.

Таблица 1. Матрица ошибок

	0	40	80	120	160	200
0	*16339.0*	*11.0*	*0.0*	*0.0*	*0.0*	*0.0*
40	*462.0*	*15848.0*	*2.0*	*0.0*	*0.0*	*0.0*
80	*691.0*	*7.0*	*15904.0*	*1.0*	*0.0*	*0.0*
120	*840.0*	*3.0*	*72.0*	*15468.0*	*47.0*	*20.0*
160	*529.0*	*3.0*	*7.0*	*49.0*	*15849.0*	*53.0*
200	*467.0*	*1.0*	*0.0*	*87.0*	*51.0*	*15493.0*

Полученные оценки по мере Жаккара представлены в таблице 2.

Таблица 2. Значения коэффициента Жаккара.

	Random Forest	U-Net
J	*0.96*	*0.91*

Таким образом, получили, что метод сегментации на основе сверточной нейронной сети U-Net по точности превосходит классический метод машинного обучения Random forest на 5 %.

Выводы

Эксперимент показал, что использование предложенного нейросетевого подхода, основанного на архитектуре U-Net, для сегментации ортофотопокрытия сельскохозяйственного поля по уровню азотного питания засеянной на нем яровой пшеницы приводит к существенному

увеличению точности сегментации – на 5 % по сравнению с классическим методам машинного обучения Random forest.

В дальнейшем планируем расширить эксперимент путем использования трансферного обучения и проведения сравнительного анализа других state-of-the-art моделей на задаче предсказания уровней азотного питания на сельскохозяйственных полях. Затем планируется опробовать методы на спутниковых снимках и понять уровень влияния качества и типа снимка на ключевые метрики моделей.

Список литературы / References

1. R.Taghizadeh-Mehrjardi, M.Mahdianpari, F.Mohammadimanesh, T.Behrens, N.Toomanian, T.Scholten, K.Schmidt (2020), Multi-task convolutional neural networks outperformed random forest for mapping soil particle size fractions in central Iran, Geoderma, 376,114552
2. T. -Y. Lee, J. -Y. Yu, Y. -C. Chang and J. -M. Yang (2020), Health Detection for Potato Leaf with Convolutional Neural Network, 2020 Indo – Taiwan 2nd International Conference on Computing, Analytics and Networks (Indo-Taiwan ICAN), Rajpura, Punjab, India, pp. 289-293
3. Sanjay Patidar,Utkarsh Singh,Sumit Kumar Sharma and Himanshu (2020),Weed Seedling Detection Using Mask Regional Convolutional Neural Network, International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC), Coimbatore, India, 2020, pp. 311-316
4. Priit Ulmas, Innar Liiv. (2020). Segmentation of Satellite Imagery using U-Net Models for Land Cover Classification. arXiv:2003.02899
5. Liang-Chieh Chen, Yukun Zhu, George Papandreou, Florian Schroff, Hartwig Adam. (2018). Encoder-Decoder with Atrous Separable Convolution for Semantic Image Segmentation, arXiv:1802.02611
6. Olaf Ronneberger, Philipp Fischer, Thomas Brox. (2015). U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015, 234-241
7. O. Barinova, R. Shapovalov, S. Sudakov, and A. Velizhev, “Online random forest for interactive image segmentation,” in Proc. Int. Workshop Exp. Economics Mach. Learn., 2012, pp. 1–8.
8. Andrew Tao, Karan Sapra, Bryan Catanzaro. (2020) Hierarchical Multi-Scale Attention for Semantic Segmentation. arXiv:2005.10821v1
9. X. Hu, Y. Zhong, C. Luo and L. Wei. (2018). Fine Classification of Typical Farms in Southern China Based on Airborne Hyperspectral Remote Sensing Images. 7th International Conference on Agro-geoinformatics (Agro-geoinformatics), Hangzhou, pp. 1-4
10. X. Yang, X. Li, Y. Ye, R. Y. K. Lau, X. Zhang and X. (2019). Huang. Road Detection and Centerline Extraction Via Deep Recurrent Convolutional Neural Network U-Net. in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 57, no. 9, pp. 7209-7220
11. Md Zahangir Alom, Mahmudul Hasan, Chris Yakopcic, Tarek M. Taha, Vijayan K. (2018). Asari. Recurrent Residual Convolutional Neural Network based on U-Net (R2U-Net) for Medical Image Segmentation. arXiv:1802.06955

MONITORING OF NITROGEN NUTRITION OF GRAIN CROPS BASED ON NEURAL NETWORK TECHNOLOGIES

I. S. BLEKANOV [1], A. E. MOLIN [2], E. S RAZUMILOV[,3,] E. A. ERSHOV [4]
[1] *St Petersburg University, St. Petersburg, Russia, i.blekanov@spbu.ru;*
[2] *St Petersburg University, St. Petersburg, Russia, st084824@student.spbu.ru;*
[3] *St Petersburg University, St. Petersburg, Russia, st068863@student.spbu.ru;*
[4] *St Petersburg University, St. Petersburg, Russia, st068530@student.spbu.ru;*

Abstract. This research is devoted to study the problems of applying modern tools and technologies of data mining for the study of agrophysical processes. In particular, the authors investigate the automation of monitoring nitrogen nutrition of grain crops in the form of processing and analyzing the images (using GeoTIFF format) of an agricultural field with sown spring wheat, made by a Geoscan-401 quadcopter, by the means of neural networks. They also provide an overview of modern architectural convolutional neural networks, such as U-Net, Attention U-Net, Attention R2U-Net, DeepLabv3+, applicable to the problem of image segmentation. Describe an experiment of assessing the accuracy of the U-Net architecture in the problem of segmentation of real images with spring wheat.

Keywords. nitrogen nutrition, image segmentation, neural network, U-net.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА БИОПРОДУКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ АГРОТЕХНОЛОГИЙ

Е. А. ДУНАЕВА
ФГБУН «Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма» (ФГБУН «НИИСХ Крыма»), г. Симферополь, Крым, dunaeva_e@niishk.ru;

Аннотация. На базе сравнения данных об уровне производственной урожайности основных полевых культур и данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) за 2019-2020 гг., а также ретроспективного анализа спутниковой информации за 2014-2020 гг. проведено сопоставление двух пилот-территорий, ориентированных на традиционную технологию возделывания сельскохозяйственных культур и технологию нулевой обработки почвы. В качестве спутниковой информации использованы данные сенсора MODIS спутника TERRA в виде нормализованного дифференцированного вегетационного индекса (NDVI) и оценки чистой первичной продукции экосистемы (NPP). Результаты сравнения различных агротехнологий показали превышение осредненных значений биопродуктивности на уровне полей для озимой пшеницы в 2019 г. и 2020 г., а подсолнечника только в 2019 г. (превышение статистически значимо). Укрупненная оценка для близких по площади пилот-территорий (около 50 км^2) показала отсутствие статистически различимой разницы в уровне среднегодовых значений NPP и их дисперсий для периода 2014–2020 гг.

Ключевые слова. Оценка, агротехнология, no-till, продуктивность, озимая пшеница, подсолнечник, NPP, ДЗЗ.

Введение

Нулевая обработка почвы (no-till, прямой посев) за последние десятилетия достаточно прочно заняла свое место на рынке земледельческих технологий во многих странах мира. Как и у других технологий у нее есть свои плюсы, что показывает уровень ее распространения в отдельных регионах (преобладающая технология в Аргентине – около 90% от площади пахотных земель [1, 2]), и минусы, показывающие, что даже во многих экономически высокоразвитых странах технология не становится преобладающей (например, в США общая площадь под no-till и zero tillage в 2017 г. достигла 42.3 млн. га или около 27 % от площади пахотных земель, а во многих странах Европы доля этих площадей лежит в диапазоне от 0.1 до 6 %), что говорит о еще не установившемся рыночном равновесии в экономическом и пространственном функционировании агротехнологий, а также о том, что несмотря на ряд имеющихся у no-till преимуществ региональные условия могут существенно влиять на оценку экономической эффективности, возможность и целесообразность перехода к данной технологии.

Несмотря на постепенное увеличение в Крыму площадей возделывания сельскохозяйственных культур с использованием технологии no-till или прямого посева доля таких посевов в общей площади остается невысокой (около 52 тыс. га или 4 % от общей площади пахотных земель). Наиболее распространенной в степной части Крыма является минимальная технология обработки почвы и, учитывая, что опыт ее использования на полуострове составляет около полувека именно данная технология является традиционной в условиях богарного земледелия в Крыму.

Актуальность исследований заключается в необходимости поиска резервов повышения эффективности использования ограниченных естественных водных ресурсов в условиях богарного земледелия в аридной зоне, а также оценки возможности использования новых агротехнологий в качестве элементов адаптационных мероприятий противодействия негативным воздействиям изменений климата на агроэкосистемы. По предварительным оценкам увеличение площади посевов с использованием водо-эффективных технологий, например, только на площади Крымского полуострова до 150-200 тыс. га позволит экономить (за счет уменьшения испарения с поверхности почвы при ее дополнительном мульчировании) и вовлечь в водооборот (за счет снегозадержания) от 30 до 50 млн. м^3 водных ресурсов.

Рассмотрены методологические подходы в сравнении различных агротехнологий в богарной системе земледелия, основанные на использовании производственных данных об уровне

урожайности сельскохозяйственных культур и на данных детальной (на уровне поля) и интегральной оценке уровня биопродуктивности территории с задействованием материалов ДЗЗ.

Объекты и методы исследования

Объектом исследований являлись 2 пилот-территории Красноперекопского района, расположенные в северной степной части Крымского полуострова. Предметом исследования является уровень варьирования биопродуктивности территорий по годам (2014–2020 гг.) и осредненных показателей по отдельным культурам в производственных посевах сельскохозяйственных культур, выращиваемых по традиционной (под «традиционной» технологией в данной работе подразумевается наиболее распространенная в настоящее время в Крыму минимальная обработка почвы) и no-till технологиям. Расстояние между центрами пилот-территорий около 20 км, ближайшая, к пилот-территориям стационарная метеорологическая станция – Ишунь (расстояние до центров пилот-территорий 9 и 19 км соответственно). Суммарная площадь каждой из сравниваемых территорий около 50 км^2 и включает для традиционной технологии часть территории Ишунского и Ильинского сельских поселений, а для технологии no-till часть территории Орловского и Магазинского сельских поселений (при этом доля полей с технологией no-till во второй пилот-территории – около 70 %). В рамках текущего анализа принято допущение, что осадки являются одинаковыми для обеих пилот-территорий и данные метеостанции Ишунь являются репрезентативными для них.

Данные о годовых суммах осадков приняты по материалам открытых ресурсов (сервис погодного информера rp5.ru) для метеостанции Ишунь и материалам миссии глобального измерения осадков (GPM [3], 2014 - 2020 гг.).

Данные о годовых значениях и пространственному распределению первичной продукции агроэкосистем нетто (Net Primary Productivity, NPP [4, 5]), приняты по данным продукта MOD17A3HGF, версия 6 (пространственное разрешение 500 м) и выгружены для границ Крымского полуострова из сервиса Giovanni [6]. При обработке данных ДЗЗ (распределение осадков и годовых значений NPP) использована открытая ГИС - QGIS 2.18. Для анализа динамики индекса NDVI на уровне полей использованы данные сервиса «Вега-Science» ИКИ РАН [7].

Результаты и обсуждение

Для территорий аридной зоны в условиях богарного земледелия осадки являются наиболее значимым фактором, определяющим биопродуктивность территории. Вместе с тем, зачастую новые технологии, такие как no-till, более активно, по сравнению с традиционными, используют возможности сохранения влаги за счет мульчирования поверхности почвы и других агроприемов.

На примере озимой пшеницы и подсолнечника показаны различия в динамике и амплитуде варьирования NDVI для вегетационных периодов 2019 и 2020 гг., осредненные по пилот-территориям для групп полей с одинаковыми сельскохозяйственными культурами и возделываемые по различным технологиям (см. рис. 1).

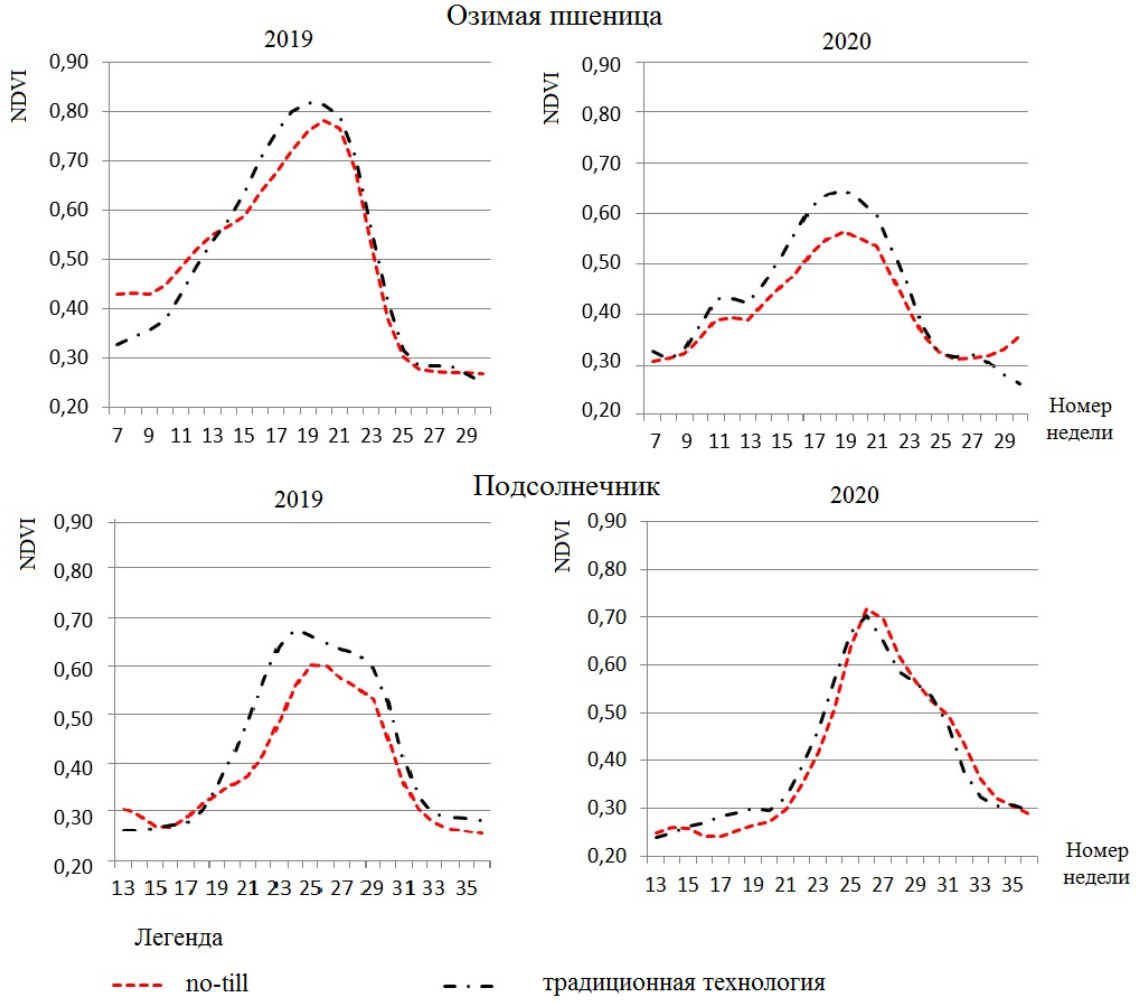


Рис. 1. Сравнение осредненной по полям пилот-территорий динамики NDVI для озимой пшеницы и подсолнечника, выращиваемых по традиционной (минимальной) и no-till технологиям

Сравниваемые пилот-территории имеют высокий уровень агротехнологий, а опыт использования технологии no-till на второй пилот-территории превышает 10 лет. При этом осредненные показатели динамики NDVI, приведенные на рисунке для озимой пшеницы и подсолнечника для сезонов 2019 и 2020 гг. позволяют сделать вывод о более высоком уровне развития фотосинтетически активной биомассы озимой пшеницы при ее возделывании по традиционной (минимальной) технологии для обоих лет и для подсолнечника – в 2019 г. В 2020 г. динамика осредненных значений параметра NDVI была идентична практически для обеих сравниваемых технологий. Данные динамики NDVI подтверждаются осредненными для территорий значениями урожайности по годам: 44.3, 34.1 ц/га и 29.6, 15.3 ц/га в 2019 г.; 20.7, 16.0 ц/га и 22.2 и 20.3 ц/га в 2020 г., – для озимой пшеницы и подсолнечника соответственно. Расхождение в урожайности подсолнечника статистически существенно в 2019 г.

Сумма осадков в 2019 г. по метеостанции Ишунь составила 268.0 мм (обеспеченность осадков 83,8%), а в 2020 г. 350,3 мм (обеспеченность, близкая к средней – 57,2%), что для данных лет явно показывает низкий уровень связи (даже обратный) урожая анализируемых культур с суммой осадкой за календарный год (более важным оказалось внутригодовое распределение осадков и перераспределение влаги между годами). В связи с этим, при анализе связи NPP с укрупненными данными об осадках в качестве их суммы использован гидрологический год (с сентября предыдущего года по август текущего, см. таблицу), что позволило существенно увеличить

уровень взаимосвязи анализируемой динамики годовых значений NPP с обеспеченностью осадками (коэффициент корреляции возрос с 0.64 и 0.57 до 0.85 и 0.90 для традиционной и no-till технологий соответственно).

Таблица 1. Сравнение уровня годовой биопродуктивности (NPP) пилот-территорий (Красноперекопский район)

Год	Сумма P, мм (IX-VIII)	Обеспеч. осадков,%	NPP, кг C /м^2	
			традиц.	no-till*
2014	406,5	27,2	0,485	0,449
2015	406,7	24,6	0,486	0,461
2016	439,3	19,5	0,551	0,480
2017	279,9	85,5	0,444	0,422
2018	312,6	72,8	0,418	0,405
2019	357,9	47,5	0,432	0,422
2020	313,3	67,8	0,433	0,413
Средн.	359,5	-	0,464	0,436
σ	59,8	-	0,047	0,028
Cv, %	16,6	-	10,04	6,34
* технология no-till используется на 70% полей пилот-территории				

Сравнение уровня биопродуктивности при различных технологиях возделывания сельскохозяйственных культур, приведенное в таблице позволяет отметить более высокую отзывчивость на более высокую водообеспеченность при традиционной (минимальной) технологии (2016 г.). В наиболее засушливом в рассматриваемом периоде 2017 г. (обеспеченность анализируемого периода близка к засушливой, т.к. в 86 случаях из 100 осадки за рассматриваемый период превышают выпавшие в период с сентября 2016 г. по август 2017 г.) уровень годовой биопродуктивности не являлся минимальным, что было обусловлено высоким уровнем увлажнения в течение предыдущего года и соответствующим накоплением осадков в осенне-зимний период. При этом минимальная биопродуктивность приходится на 2018 г. (гидрологический год близкий к среднесухому по обеспеченности осадками).

Статистический анализ не показал достоверного различия между средними значениями параметра экологической продуктивности нетто NPP по годам для периода 2014–2020 гг. (параметр $t_{0.01}$ Стьюдента равен 1.33 при табличном значении $t_{0.01}$ = 3.06) и значение критерия Фишера при сравнении среднеквадратических отклонений F = 2.8 не дает основания считать дисперсии, а следовательно и стандартные отклонения различными, т.к. F меньше критического значение $F_{0.05}$ = 4.3.

Выводы

Показано различие в средней величине урожайности на уровне полей для двух недалеко расположенных пилот-территорий с выращиванием посевов полевых культур по традиционной для степной части Крымского полуострова минимальной и нулевой технологиям в среднем (2019 г.) и близком к средне-засушливому по обеспеченности годового гидрологического цикла осадками (2020 г.). Максимальные осредненные значения NDVI и урожайности были для озимой пшеницы выше при традиционной технологии чем при no-till для обоих лет, а для посевов подсолнечника в 2019 г. (в этом году различие статистически значимо). В условиях 2020 г. значения NDVI по подсолнечнику практически не отличались, а урожайность также была на 10% выше при традиционной технологии.

Сравнительный анализ варьирования экологической продуктивности нетто (NPP) не показал достоверного различия в осредненных для пилот-территорий годовых значениях этого

параметра, а также разницы в коэффициентах детерминации. Абсолютные значения для пилот-территории с традиционной технологией превышают значения данного параметра для всех проанализированных лет (2014–2020 гг.), при этом коэффициент вариации NPP для технологии no-till почти на 30% ниже, чем при традиционной.

Существенное увеличение коэффициентов корреляции связи уровня годовых значений NPP с осадками при переходе от календарных лет (для сумм осадков) к гидрологическому году показывает необходимость учитывать данную особенность при сравнении биопродуктивности территорий, а при сравнительной оценке агротехнологий на различных пространственных уровнях, и более детальное внутригодовое распределение осадков и их перераспределение между годами.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках гранта РФФИ, проект № 19-016-00148 А.

Список литературы / References

1. A. Kassam, T. Friedrich, R. Derpsch and J. Kienzle, «Overview of the Worldwide Spread of Conservation Agriculture», Field Actions Science Reports, Vol. 8, 2015, URL: http://journals.openedition.org/factsreports/3966
2. Электронный ресурс, URL: http://www.fao.org/faostat/en/#data/RL
3. Huffman, G. J. NASA Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (IMERG) / G. J. Huffman, D. T. Bolvin , D. Braithwaite, K. Hsu , R. Joyce , C. Kidd , E. J. Nelkin , S. Sorooshian , J. Tan , P. Xie // Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) Version 5.2. 2018.35 p.
4. Turner, D.P., Ritts, W.D., Cohen, W.B., Gower, S.T., Running, S.W., Zhao, M., Costa, M.H., Kirschbaum, A.A., Ham, J.M., Saleska, S.R., Ahl, D.E., 2006. Evaluation of MODIS NPP and GPP products across multiple biomes. Remote Sensing of Environment 102 (3–4), 282–292.
5. Running S., Zhao M. (2019). MOD17A3HGF MODIS/Terra Net Primary Production Gap-Filled Yearly L4 Global 500 m SIN Grid V006 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. Accessed 2021-02-18 from https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD17A3HGF.006
6. Электронный ресурс, URL: http://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/
7. Онлайн-сервис ИКИ РАН «Вега-Science» [Электронный ресурс], URL: http://sci-vega.ru/

COMPARATIVE ASSESSMENT OF BIOPRODUCTIVITY OF DIFFERENT AGROTECHNOLOGIES

I. A. DUNAIEVA
FSBSI «Research Institute of Agriculture of Crimea», Simferopol, Crimea, dunaeva_e@niishk.ru;

Abstract. Based on a comparison of level of production yields data of the main field crops and Earth remote sensing data (RS) for 2019-2020, as well as a retrospective analysis of satellite information for 2014-2020, a comparison of two pilot territories focused on the traditional technology of cultivation of agricultural crops and no-tillage technology was made. The data of the MODIS sensor of the TERRA satellite in the form of a normalized differentiated vegetation index (NDVI) and an estimate of the net primary production of the ecosystem (NPP) were used as satellite information. The results of comparing various agricultural technologies showed an excess of the average values of bioproductivity at the field level for winter wheat in 2019 and 2020, and for sunflower only in 2019 (the excess is statistically significant). The aggregated estimate for pilot territories close in area (about 50 km^2) showed no statistically distinguishable difference in the level of average annual NPP values and their variances for the period 2014-2020.

Keywords. Assessment, agricultural technology, no-till, productivity, winter wheat, sunflower, NPP, remote sensing.

РАЗВИТИЕ ИНДЕКСНОЙ ПАРАДИГМЫ В ДИСТАНЦИОННОМ ЗОНДИРОВАНИИ ПОЧВЕННО-РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА

И. М. МИХАЙЛЕНКО
ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт» (ФГБНУ АФИ), Санкт-Петербург, ilya.mihailenko@yandex.ru

Аннотация. Целью работы является системный анализ и обобщение общепринятой индексной парадигмы использования данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для оценивания состояния почвенно-растительного покрова. Установлено, что скалярная форма и отсутствие математической основы не позволяет использовать общепринятые вегетационные и подобные им индексы для оценивания векторов количественных показателей почвенно-растительного покрова. В тоже время для принятия многих видов управляющих решений в земледелии актуально построение индексных изображений, отражающих такие неколичественные показатели, как виды культурных и сорных растений, наличие болезней растений, повреждений посевов и почв, физических и химических стрессов. По своему информационному содержанию оценивание таких неколичественных (счетных) состояний представляют собой процедуры распознавания образов или классов объектов почвенно-растительного комплекса. Изобретательский эмпирический подход к выбору спектрального состава индексов их комбинаций не позволяет в настоящее время обеспечить достаточную надежность таких процедур. Поэтому целью исследования в настоящей работе является формализация процесса, что позволяет полностью исключить эмпирический подход построения индексов и автоматизировать всю процедуру их формирования для любого числа и видов распознаваемых объектов. Основу формализации являются алгоритмы оценивания и отбора информативности признаков, с последующим построением индексных моделей, представляющих собой линейные решающие правила (ЛПР) для распознавания классов. При этом признаками классов являются спектральные поддиапазоны, на которые разбивается весь спектр данных ДЗЗ, а число информативных признаков выбирается из условия обеспечения требуемой надежности распознавания всех наблюдаемых объектов (классов).

Ключевые слова: индексные модели, распознавание образов, информативные признаки, алгоритмы, информативность признаков, идентификация моделей.

Введение

В настоящее время для работы со спектральной информацией при дистанционном зондировании Земли (ДЗЗ) часто прибегают к построению так называемых «индексных» изображений. На основе комбинации параметров отражения в определенных каналах, информативных для выделения исследуемого объекта**,** и расчета по этим значениям «спектрального индекса» объекта строится изображение, соответствующее значению индекса в каждом пикселе, что и позволяет выделить исследуемый объект или оценить его состояние. Спектральные индексы, используемые для изучения и оценки состояния растительности, получили общепринятое название вегетационных индексов (ВИ) [2, 4, 10, 23].

Вегетационный индекс представляет собой безразмерный скалярный показатель, представляющий комбинацию параметров отражения в разных спектральных диапазонах данных дистанционного зондирования, отражающую состояние растительности на данном участке поверхности и в данном пикселе снимка. В настоящее время существует более 160 вариантов вегетационных индексов. Они подбираются экспериментально (эмпирическим путем), исходя из известных особенностей кривых спектральной отражательной способности растительности и почв.

Расчет большей части вегетационных индексов базируется на двух наиболее стабильных (не зависящих от прочих факторов) участках кривой спектральной отражательной способности растений. На красную зону спектра (620–750 нм) приходится максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом, а на ближнюю инфракрасную зону (750–1300 нм) максимальное отражение энергии клеточной структурой листа. Высокая фотосинтетическая активность (связанная, как правило, с большой биомассой растительности) ведет к более низким значениям коэффициентов отражения в красной зоне спектра и большим значениям в ближней

инфракрасной. Отношение этих показателей друг к другу позволяет четко отделять растительность от прочих природных объектов [2, 4, 18].

При обработке космических снимков в программном комплексе ENVI имеется специальный калькулятор вегетационных индексов ENVI (калькулятор VI ENVI), который позволяет рассчитать 27 вегетационных индексов, используемых для оценки состояния растительности, содержания пигментов, азота, углерода, воды. По снимкам, где есть только красная и ближняя инфракрасная спектральные зоны, программа может рассчитать два индекса – NDVI и RVI. При работе с гиперспектральным снимком будет предложен расчет всех 27 индексов [4].

Каждая из перечисленных групп индексов предназначена для оценки какого-либо из свойств растительного покрова и содержит несколько индексов. Для конкретных природных условий и различных задач одни индексы из группы могут дать более точные результаты, чем другие. Сравнивая результаты расчетов индексов с полевыми данными, можно выбрать индекс, максимально точно отражающий исследуемое свойство. Таким образом, существенно повышается точность результатов при последующей обработке.

Наиболее распространенный и часто используемый индекс - **NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) – нормализованный разностный индекс растительности**, впервые был описан Rouse B. J. в 1973 г. – простой количественный показатель количества фотосинтетически активной биомассы (обычно называемый вегетационным индексом) [25]. Один из самых распространенных и используемых индексов для решения задач, использующих количественные оценки растительного покрова. NDVI позволяет выявить проблемные зоны угнетенной растительности, давая возможность принимать наиболее верные в долгосрочной перспективе решения, направленные на повышение урожайности. Участки с различным состоянием растительности или объемом зеленой фитомассы могут быть изображены различными цветами. При помощи статистической обработки карт NDVI помимо определения количества фитомассы можно также выделить площади посева различных сельскохозяйственных культур.

Следует отметить, что любые вегетационные индексы не дают абсолютных количественных показателей исследуемого свойства, и их значения зависят от характеристик сенсора (ширина спектральных каналов, разрешения), условий съемки, освещенности, состояния атмосферы. Они дают только относительные оценки свойств растительного покрова.

Перед завершением введения приведем само определение «индекс», как списка, реестра, указателя, числа, буквы или другой комбинации символов, указывающей место элемента в совокупности, номинальной шкале или характеризующей состояние некоторой системы, например показатель активности, производительности, развития, изменения чего-либо (википедия).

Информационный анализ вегетационных и других спектральных индексов, перечень решаемых задач на их основе, а также быстро растущее число таких индексов показывает, что в настоящее время еще не сложилась единая методика их формирования и спектрального состава используемых данных ДЗЗ. Отсутствие такой методики приводит к отсутствию обоснования для введения новых индексов и их спектрального состава, а также не позволяет оценивать их эффективность при решении задач, в которых эти индексы используются.

В настоящей работе предлагается методика формирования вегетационных и подобных им индексов и оценки их эффективности.

Материалы и методы

Скалярная форма индексов, независимо от сочетаний используемых спектральных каналов ДЗЗ не позволяет решать задачи оценивания количественных показателей исследуемых свойств

зондируемых растительных и почвенных покровов. Для оценивания этих показателей в соответствии с современной информационной теорией необходимы математические модели зависимостей этих показателей между собой и от основных влияющих факторов, а также от связи параметров отражения средств ДЗЗ и оцениваемых показателей [20]. При наличии таких моделей для оценивания векторов количественных показателей необходимо наличие векторов данных ДЗЗ соответствующей размерности. Любые комбинации спектральных каналов не отвечают этим требованиям.

В тоже время такие индексы являются индикаторами неколичественных состояний растительного и почвенного покрова таких, как стрессы различной природы, наличие болезней и вредителей, типы культурных растений и сорняков и многие другие. Именно в оценивании таких состояний были достигнуты наиболее значительные результаты использования различных индексов. Наличие пространственных картин оценок таких состояний является важной мониторинговой информацией, позволяющей принимать предварительные управляющие решения начала и очередности технологических управлений, сева и уборки урожая и др. Поэтому повышение надежности и достоверности таких оценок является актуальной проблемой. Она может быть решена только при наличии общей методики формирования индексов, посредством которых возможно оценивание неколичественных показателей (состояний) растительного и почвенного покрова.

С точки зрения современной информационной теории, оценивание неколичественных показателей (состояний) относится к задаче распознавания образов, а каждое из таких неколичественных состояний может рассматриваться как образ или класс. Как только мы сведём процедуру оценивания на основе индексов к задаче распознавания образов, то согласно теории распознавания сразу же возникает проблема отбора информативных признаков, на основании которых решается эта задача. При использовании данных ДЗЗ признаками являются отдельные градации (интервалы) спектра отражения средства ДЗЗ. Сама процедура отбора признаков практически не зависит от способа измерения информативности. Важно лишь, чтобы этот способ был одинаков для всех признаков (групп признаков), входящих в исходное их множество и участвующих в процедуре отбора.

Одним из наиболее простых и эффективных методов оценивания информативности признаков является метод Шеннона [28]. Он предлагает оценивать информативность как средневзвешенное количество информации, приходящиеся на различные градации признака. Под информацией в теории информации понимают величину устраненной энтропии.

Информативность по методу Шеннона определяется следующим образом

$$I(x_i) = P_i * \sum_{k=1}^{K} P_{i,k} * \log_k P_{i,k} \qquad (1)$$

где I(x_i) – информативность признака x_i , G – количество интервалов (градаций) признака, P_i – вероятность *i*-го интервала (градации) признака, *K* – количество классов признака, $P_{i,k}$ – вероятность появления *i* – ого интервала признака в *k*-ом классе.

Вероятность *i*-го интервала признака (P_i), рассчитывалась по формуле:

$$P_i = \frac{\sum_{k=1}^{K} m_{i,k}}{N} \qquad (2)$$

где $m_{i,k}$ - частота появления *i*-го интервала в *k*-ом классе, K – количество классов признака, *N* – общее количество классов.

Вероятность появления *i*-го интервала признака в *k*-ом классе ($P_{i,k}$) рассчитывалась по формуле:

$$P_{i,k} = \frac{m_{i,k}}{\sum_{k=1}^{K} m_{i,k}}. \quad (3)$$

где $m_{i,k}$ – частота появления *i*-го интервала в *k*-ом классе, К – количество классов признака.
После оценивания информативности всех градаций спектрального диапазона используемой системы ДЗЗ, для облегчения дальнейшего отбора они выстраиваются по убыванию показателя информативности. Для отбора наиболее эффективных информативных признаков введем математическую модель индекса

$$I_k = \sum_{i=1}^{n_k} b_{ik} x_{ik}^*, \quad (4)$$

или в векторно-матричной форме

$$I_k = \mathrm{B}_k^{\mathrm{T}} \mathrm{X}_k^*, \quad (5)$$

где b_{ik} - параметры модели индекса для *k*-го класса, объединенные в матрицу-строку $\mathrm{B}_k^{\mathrm{T}}$, x_{ik}^* - наиболее информативные признаки для *k*-го класса, обозначаемые индексом I, объединенные в векторы X_k^*, I_k – распознаваемые образы, обозначаемые последовательно числами 1,2,3…K, служащими выходными величинами модели.
Параметры модели индекса (4), (5) оцениваются по обучающей выборки посредством рекуррентного метода наименьших квадратов РМНК [7]

$$\begin{aligned}
&G_k(j) = R_k(j-1)X_k(j),\\
&z_k(j) = W_k^{\mathrm{T}}(j)G_k(j),\\
&e_k(j) = I_k(j+1) - B_k^{\mathrm{T}}(j-1)X_k(j),\\
&B_k(j) = B_k(j-1) + \frac{1}{1+z_k(j)} G_k(j)e_k(j),\\
&R_k(j) = R_k(j-1) - \frac{1}{1+z_k(k)} G_k(j)G_k^{\mathrm{T}}(j),
\end{aligned} \quad (6)$$

здесь: *j*=1,2,3…*J* – номера записей в обучающей выборке, $e_k(j) = I_k(j+1) - B_k^{\mathrm{T}}(j-1)X_k(j)$ - текущая ошибка обучения на j-том шаге процедуры, $G_k(j)$, $z_k(j)$, $R_k(j)$ – соответственно, векторный, скалярный и матричный параметры алгоритма, обеспечивающие его сходимость.
В модели (4), (5) и в алгоритме обучения (6) остается неясным, сколько наиболее информативных признаков должно быть отобрано для каждого распознаваемого класса, т.е. какова размерность n_k вектора X_k^*.
Для этого сначала приведем решающее правило, посредством которого принимается решение об отнесении текущего вектора признаков $\mathrm{X}_k^*(j)$ к конкретному классу k^*

$$I_k(j) = I_k^*, \quad если \ \left| I_k^* - \mathrm{B}_k^{\mathrm{T}} \mathrm{X}_k^*(j) \right| \le \delta, \quad (7)$$

где: δ - заданный допуск на ошибку распознавания, как правило - $\delta = 0,05 I_k^*$.
Принимая частоту попадания решений (7) в допуск в качестве оценки вероятности правильных решений

$$\widehat{P}_k = \frac{n_k}{\sum_{k=1}^{K} n_k}, \qquad (8)$$

можно последовательно, начиная с первых 2-х признаков, вводить в порядке убывания наиболее информативные признаки пока оценка вероятности (8) не достигнет заданного значения $\widehat{P}_k^*$.

С учетом всех приведенных рассуждений общий алгоритм формирования моделей индексов включает в себя следующие этапы и шаги:

Этап 0. Формирование обучающей выборки. Заключается в фиксации спектров отражения K классов во всем рабочем диапазоне используемого средства ДЗЗ, который разбивается на G отдельных интервалов, обозначаемых переменными *i* = 1,2,…G. Для разделения информации о классах в естественных условиях выделяются отдельные зоны наблюдения с преимущественным содержанием объектов k-ого класса, для агроценозов используются специально выделенные тестовые площадки с отдельными видами распознаваемых классов. Все данные фиксируются в БД, с номерами записей *j*=1,2,…J.

Этап 1. Оценивание информативности признаков**.** По формулам (1)-(3) формируется убивающая последовательность 10-ти наиболее информативных признаков.

Этап 2. Оценивание параметров моделей индексов и отбор информативных признаков:

Шаг 1. Принимается класс *k*=1 и в модели индекса (5) принимается число информативных признаков n_k=2 (первые два в убывающей последовательности).

Шаг 2. Посредством алгоритма (6) оцениваются параметры модели индекса (5) для текущего числа признаков n_k.

Шаг 3. Посредством решающего правила по контрольной выборке данных оценивают вероятность правильных решений P_k^*, которую сравнивают с заданным значением $\widehat{P}_k^*$. Если $\widehat{P}_k \lhd P_k^*$, то принимается число информативных признаков $n_k=n_k+1$ (добавляется следующий признак из убывающей последовательности) и осуществляется переход к п. 1. Если $\widehat{P}_k \geq P_k^*$, то принимается класс *k*=1+1 и осуществляется переход к п. 1, вплоть до последнего класса *k*=K.

Обсуждение результатов

В таблицах 1, 2 представлены фрагменты данных спектров отражения различных растений для южных и северных широт Российской Федерации. Они существенно различаются по своим спектральным картинам, где для растений северных широт значения параметров отражения распределены более равномерно по исследуемым спектральным диапазонам (признакам). При исследовании информативности признаков следует иметь в виду, что эмпирические оценки вероятностей, в формулах (1)-(3) зависят от выбранных пороговых значений признаков. Как видно из диаграмм на рис. 1-6 выбор пороговых значений существенно отражается на оценках информативности. При малых значениях порогов эти оценки имеют большие значения и мало различаются между собой. При увеличении величины порогов оценки информативности уменьшаются вплоть до обнуления, при увеличении степени различия между собой. В связи с тем, что информативность определяет последовательность ввода признаков в модели индексов (4), (5), то следует выбрать компромиссные варианты, в которых нет нулевых информативностей и они достаточно различимы для отдельных признаков. В соответствии с этими соображениями, для растений южных широт был выбрано пороговое значение равным 2% (рис. 1), а для растений северных широт – 6% (рис. 2).

Table 1. Fragment of spectral data on the state of plants in the southern latitudes of Russia

Наименование растений	Номера классов, k	Спектральная плотность энергетической яркости (СПЭЯ), %				
		450–520 нм	530–610 нм	625–680 нм	680–740 нм	800–1100 нм
Озимая пшеница (*T. aestivum* L.)		x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
Озимый ячмень (*H. vulgare* L.)	1	2,83	4,75	6,19	6,68	6,99
Яровая пшеница (*T. aestivum* L.)	2	2,81	4,78	6,26	6,32	6,1
Яровой ячмень (*H. vulgare* L.)	3	2,38	3,94	4,65	4,39	6,07
Кукуруза (*Z. mais* L.)	4	2,2	3,76	4,88	5,45	6,03
Подсолнечник (*H. annuus* L.)	5	1,7	3,42	2,96	4,6	5,25
Соя (*G. max* (L.))	6	0,96	1,67	1,11	3,77	5,95
Амброзия полыннолистная (*A. artemisiifolia* L.)	7	1,01	1,87	1,42	3,79	5,64
Дурнишник калифорнийский (*X. strumarium* L.)	8	0,38	0,96	0,45	2,78	4,98
Канатник теофраста (*A. theophrastii* Medik.)	9	0,76	1,58	0,92	3,61	5,26
Марь белая (*C. album* L.)	10	0,84	2,04	1,1	3,96	4,91
Щирица запрокинутая (*A. retroflexus* L.)	11	1,02	1,5	1,02	3,14	5,14
Осот полевой (*S. arvensis* L.)	12	0,89	1,76	1,1	3,46	5,58
Лисохвост мышехвостиковидный (*A. myosuroides* Huds.)	13	1,21	1,99	1,74	3,8	5,87
	14	2,01	3,68	4,8	5,96	5,46

Table 2. Fragment of spectral data on the state of plants in northern latitudes of Russia

Name of plants	Номера классов, k	Спектральная плотность энергетической яркости (СПЭЯ), %				
		450–520 нм	530–610 нм	625–680 нм	680–740 нм	800–1100 нм
		X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
Яровая пшеница (*T. aestivum* L.)	**1**	2,38	3,94	4,65	4,39	6,07
Пикульник обыкновенный (*Galeopsis tetrahit*)	**2**	6,67	7,24	6,20	6,00	5,80
Белая марь (*C. album* L.)	**3**	5,90	7,25	6,38	6,12	6,00
Полевой ярок (T*hláspi arvénse*)	**4**	0,96	1,67	1,11	3,77	5,95
Сумка пастушья (Capsella bursa-pastoris)	**5**	4,49	6,91	6,0	6,5	6,65
Звездчатка средняя (*Stellaria media* L.))	**6**	5,35	7,72	7,08	7,84	7,60
Горец развесистый (*Persicária lapathifólia*)	**7**	5,67	7,74	7,24	7,15	6,95
Дымянка аптечная (*Fumária officinális*)	**8**	7,12	8,96	8,24	8,12	7,42

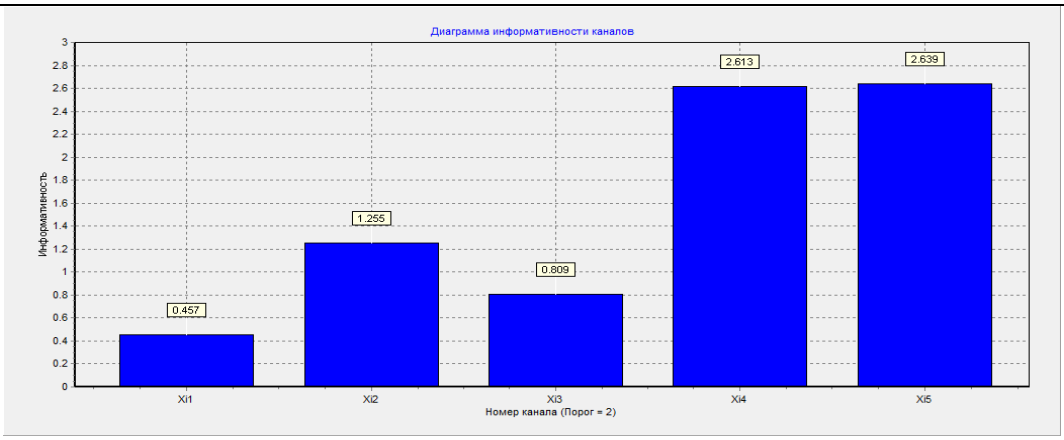


Рис. 1. Диаграмма информативности признаков для растений южных широт и порога чувствительности 2%

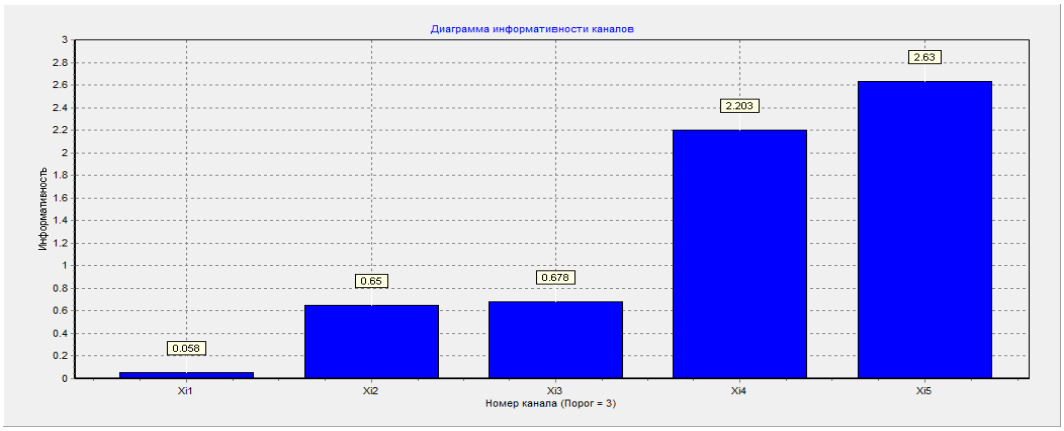


Рис. 2. Диаграмма информативности признаков для растений южных широт и порога чувствительности 3%

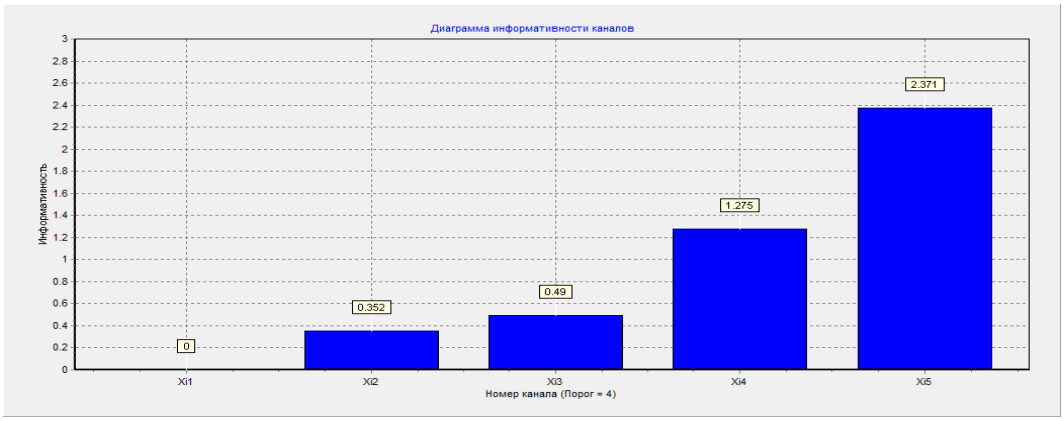


Рис. 3. Диаграмма информативности признаков для растений южных широт и порога чувствительности 4%

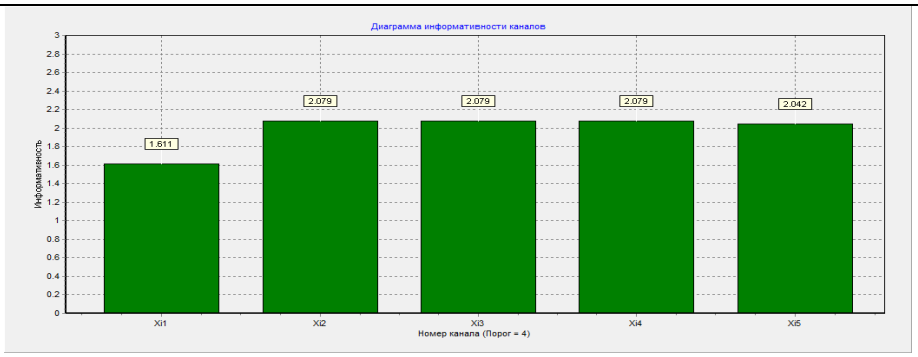


Рис. 4. Диаграмма информативности признаков для растений северных широт и порога чувствительности 4%

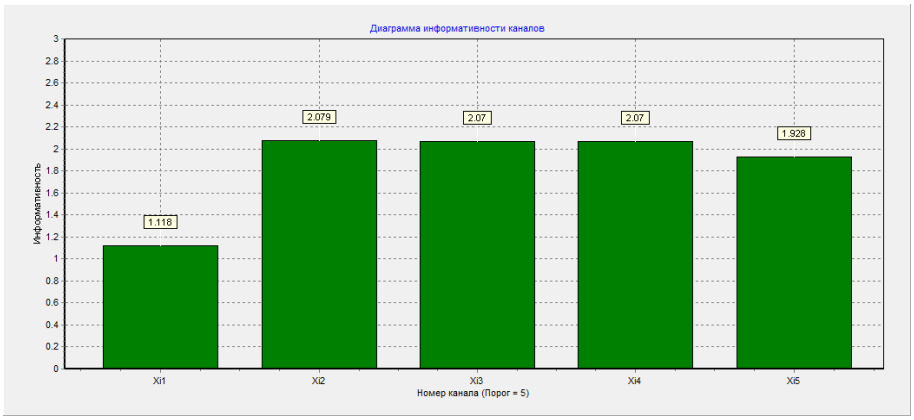


Рис. 5. Диаграмма информативности признаков для растений северных широт и порога чувствительности 5%

Отбор информативных признаков для построения моделей индексов в соответствии приведенным выше алгоритмом начинается с первых двух наиболее информативных каналов. Для растений южных широт это каналы x_4 – (680–740 нм), x_5 – (800–1100 нм). Для растений северных широт это каналы x_2 - (530–610 нм), x_4 – (680–740 нм). В таблице 3 приведены результаты оценки вероятности правильного распознавания классов для растений южных широт в зависимости от размерности вектора используемых признаков в модели индексов (5) для поля допуска ±10% от номера класса.

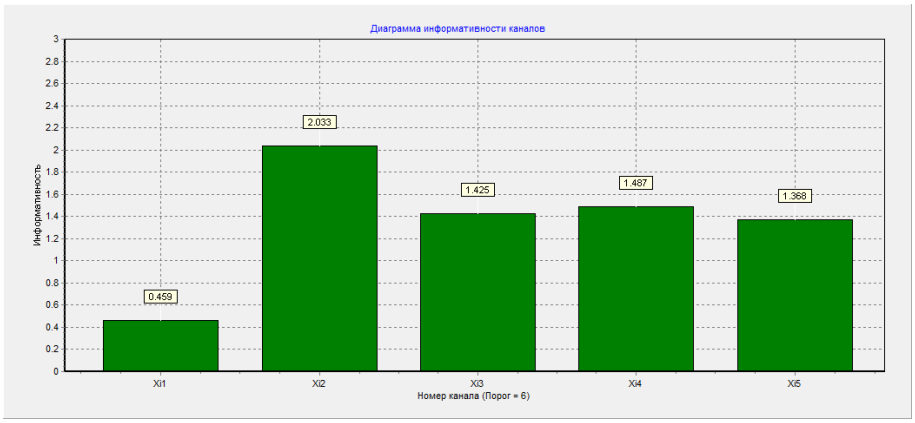


Рис. 6. Диаграмма информативности признаков для растений северных широт и порога чувствительности 6%

Таблица 3. Вероятности правильного распознавания классов в зависимости от числа используемых признаков

Номера классов	Число и состав признаков			
	2: x_4, x_4	3: x_4, x_4, x_2	4: x_4, x_4, x_2, x_3	5: x_4, x_4, x_2, x_3, x_1
	Вероятности правильной классификации			
1	0, 95	0, 95	0, 95	0, 95
14	0, 95	0, 95	0, 95	0, 95

Как видно из таблицы 3, вероятность правильного распознавания классов для рассматриваемого случая не зависит числа используемых информативных признаков. Поэтому для дальнейшего анализа мы используем модели индексов с первыми двумя признаками. На рис.7-10 показаны графики идентификации моделей индексов для первых и последних видов растений (классов), представленных в таблицах 1, 2. Результаты идентификации представлены в таблицах 4, 5.

Как видно из графиков рис. 7-10 и таблиц 4, 5 выбор наиболее информативных признаков и настройка параметров моделей индексов обеспечивают высокую надежность распознавания классов растений. Такими возможностями не обладают все используемые в настоящее время вегетационные и другие индексы. Сохранение этих свойств системы распознавания при изменениях спектральных характеристик растений необходима повторная идентификация параметров моделей индексов при смене фенологических фаз растений. Такая методика может быть распространена и на другие объекты почвенно-растительного покрова с другими наборами спектров отражения.

В заключении следует заметить, что предлагаемая методика применима только в попиксельной обработке данных ДЗЗ, когда предполагается, что в отдельном пикселе преобладает объект одного вида.

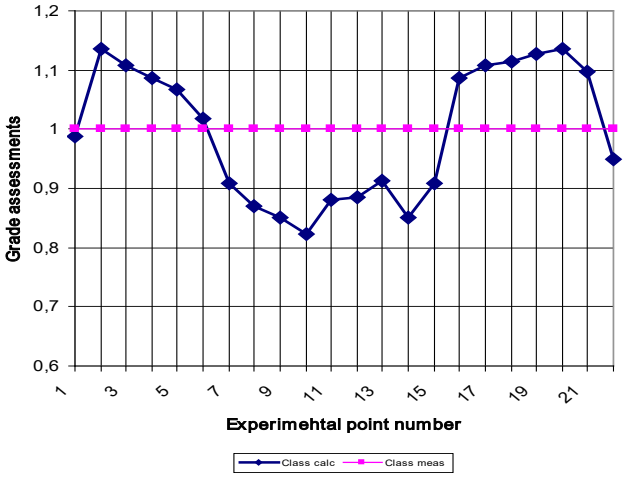


Рис. 7. Идентификация модели индекса 1-ого класса растений южных широт

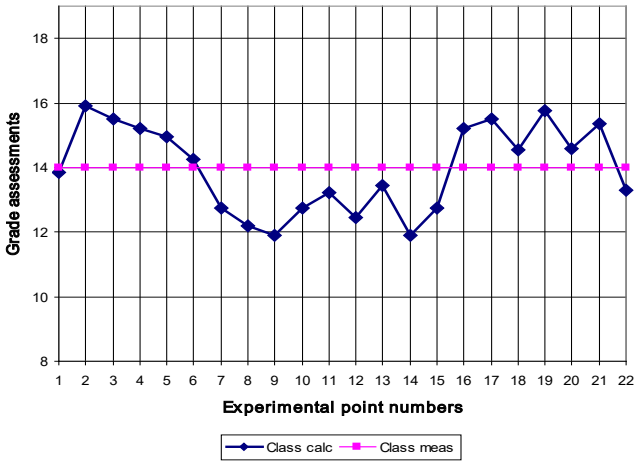


Рис. 8. Идентификация модели индекса 14-го класса растений южных широт

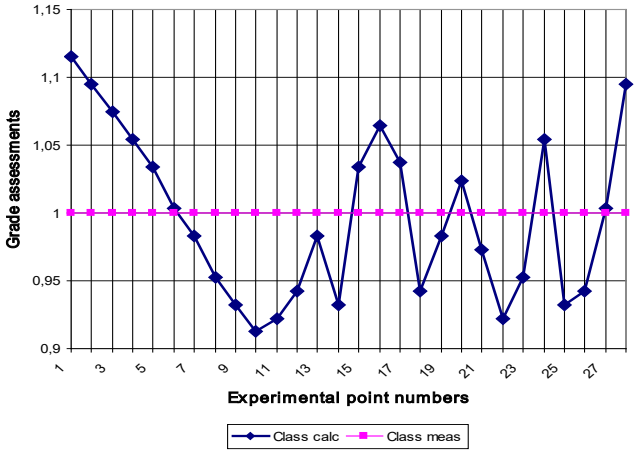


Рис. 9. Идентификация модели индекса 1-го класса растений северных широт

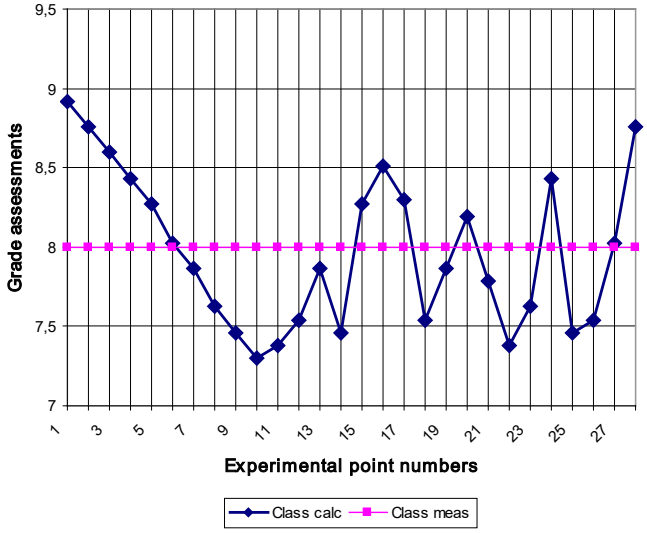


Рис. 10. Идентификация модели индекса 8-го класса растений северных широт

Таблица 4. Результаты идентификации моделей индексов для растений южных широт

№ класса	Значения параметров моделей		Среднеквадратическая ошибка
	b_1	**b_2**	**σ**
1	0,07175	0,09685	0,037
2	0,15193	0,19765	0,074
3	0,33588	0,37310	0,112
4	0,34083	0,48952	0,149
5	0,51534	0,68969	0,186
6	0,58559	1,30939	0,223
7	0,72659	1,46233	0,261
8	0,87877	2,52582	0,298
9	0,90715	2,05981	0,335
10	1,01760	1,96592	0,372
11	1,34589	2,80647	0,410
12	1,38494	2,71301	0,447
13	1,38991	2,64499	0,484
14	1,03964	1,67757	0,521

Таблица 5. Результаты идентификации моделей индексов для растений северных широт

№ класса	Значения параметров моделей		Среднеквадратическая ошибка
	b_1	**b_2**	
1	0,08456	0,08713	0,011
2	0,16562	0,16874	0,023
3	0,22744	0,20778	0,034
4	0,31158	0,30478	0,045
5	0,32315	0,33304	0,057
6	0,42514	0,43709	0,068
7	0,43551	0,47565	0,079
8	0,65740	0,61787	0,090

Заключение

Скалярная форма, отсутствие модельной и математической основы, а также обоснования спектрального состава не позволяет использовать современные вегетационные и другие подобные им индексы для оценивания количественных параметров состояния почвенно-растительного покрова. В тоже время оценивание большого числа таких неколичественных состояний, как вид растительности, болезни растений, стрессы физического и химического характера, повреждения и др. является чрезвычайно актуальной проблемой, решение которой позволяет принимать управляющие решения различного рода. По своему информационному содержанию оценивание неколичественных (счетных) состояний относится к процедурам распознавания образов или классов. В свою очередь отправным пунктом реализации процедуры распознавания образов является выявление наиболее информативных признаков, в пространстве которых могут быть построены решающие правила распознавания. При использовании средств оптического дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) такими признаками являются отдельные спектральные поддиапазоны, на которые разбивается весь спектральный диапазон, используемый средствами ДЗЗ. В этом случае индексами являются линейные решающие правила (ЛПР), число которых равно числу классов, а сами ЛПР представляют собой взвешенную линейную комбинацию наиболее информативных признаков, число которых в каждом ЛПР выбирается из условия обеспечения требуемой надежности

процедуры распознавания. При таком подходе полностью исключается эмпирический выбор спектрального состава индексов, а вся процедура их формирования может быть формализована и автоматизирована.

Список литературы

1. Андреев Г. Г., Бочаров В. П., Сазонов Н. В., Чабан Л. Н. Автоматизация тематической обработки космических снимков при оценке состояния сельскохозяйственных культур. Проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, № 5. 1986. С. 95–102.
2. Baret, F., Guyot, G., and Major, D. (1989) TSAVI: A vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI or APAR estimation, in 12-th Can. Symp. on Rem. Sens. and IGARSS 1990, Vancouver, Canada, July, pp. 10–14.
3. Clevers, J. G. P. W. (1988) The derivation of a simplified reflectance model for the estimation of leaf area index, Rem. Sen. of Env., vol 35., pp. 53–70.
4. Crippen, R. E. (1990) Calculating the Vegetation Index Faster, Rem. Sens. of Env., vol. 34., pp. 71–73.
5. Crist, E. P. and Cicone, R. C. (1984) Application of the tasseled cap concept to simulated thematic mapper data, Photogю Engю and Remю Sensю, vol. 50, pp. 343–352.
6. Elvidge, C. D. and Lyon, R. J. P. (1985) Influence of rock-soil spectral variation on the assessment of green biomass, Remю Sensю of Envю, vol. 17, pp. 265–269.
7. Эйхоф П. Основы идентификации систем управления. Оценка параметров и состояний. М.: Мир, 1975. 681 с.
8. Huete, A. R., Jackson, R. D. and Post, D. F. (1985) Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds, Rem. Sens. of Env., vol. 17, pp. 37–53.
9. Huete, A. R. (1988) A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI), Rem. Sensю of Envю, vol. 25, pp. 295–309.
10. Jackson, R. D. (1983) Spectral indices in n-space, Remote Sensing of Environment, vol. 13, pp. 409–421.
11. Jordan, C. F. (1969) Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor, Ecol., vol. 50, pp. 663–666.
12. J. Tu, R. Gonzalez. Principles of pattern recognition. M.: Mir, 1978.
13. Kaufman, Y. J., Tanre, D. (1992) Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS, in Proc. IEEE Int. Geos. and Rem. Sens. Symp., IEEE, New York, pp. 261–270.
14. Kauth, R. J. and Thomas, G. S. (1976) The tasseled cap-A graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat, Proceedings of the Symposium on Machine.
15. Kriegler, F. J., Malila, W. A., Nalepka, R. F., and Richardson, W. (1969) Preprocessing transformations and their effects on multispectral recognition, in Proceedings of the Sixth International Symposium on Remote Sensing of Environment, University of Michigan, Ann Arbor, MI, pp. 97–131.
17. Кашкин В.Б., Сухинин А.И. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений., М.: Логос, 2001.
18. Leprieur, C., Verstraete, M. M., Pinty, B., Chehbouni, A. (1994) NOAA/AVHRR Vegetation Indices: Suitability for Monitoring Fractional Vegetation Cover of the Terrestrial Biosphere, in Proc. of Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing, ISPRS, pp. 1103–1110.
19. Lillesand, T. M. and Kiefer, R. W. (1987) Remote Sensing and Image Interpretation, 2nd edition, John Wiley and Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore, 721 p.
20. Михайленко И. М. Основные задачи оценки состояния посевной и почвенной среды по данным космического зондирования. Экологические системы и приборы. 2011, №. 8. С. 17–25.

21. Pinty, B. and Verstraete, M. M. (1991) GEMI: A Non-Linear Index to Monitor Global Vegetation from Satellites, Veg., vol. 101, pp. 15–20.
22. Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A. R., and Kerr, Y. H. (1994) Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI), Rem. Sens. of Env., vol. 48, pp. 119–126.
23. Richardson, A. J. and Everitt, J. H. (1992) Using spectra vegetation indices to estimate rangeland productivity, Geo. Intern., vol. 1, pp. 63–69.
24. Richardson, A. J. and Wiegand, C. L. (1977) Distinguishing vegetation from soil background information, Phot. Eng. and Rem. Sens., vol. 43, pp. 1541–1552.
25. Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., and Deering, D. W. (1973) Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS, Third ERTS Symposium, NASA SP-351, vol. 1, pp. 309–317.
26. R. Duda, P. Hart. Pattern recognition and scene analysis. M.: Mir, 1976.
27. Te-Ming Tu, Chin-Hsing Chen, Jiunn-Lin Wu, and Chein-I Chang. A Fast Two-Stage Classification Method for High Dimensional Remote Sensing Data. – IEEE Trans. of Geos. & Rem. Sens., 1998, vol. 36, no. 1, pp. 182–191.
28. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. М.: Издательство иностранной литературы, 1963. 295 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АССИМИЛЯЦИИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛЬЮ ПРОДУКЦИОННОГО ПРОЦЕССА

Д. Ю. ЕРЁМЕНКО, С. А. МЕДВЕДЕВ, Е. Т. ЗАХАРОВА
ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт» (ФГБНУ АФИ)
Санкт-Петербург, conference.dzz@agrophys.ru

Аннотация. Для повышения точности динамических моделей продукционного процесса перспективной идеей выглядит использование данных дистанционного зондирования для оперативной коррекции модельных расчётов. Как правило, для этого используется индекс NDVI, который может быть как измерен в ходе дистанционного зондирования, так и вычислен по листовому индексу, который входит в состав выходных данных большинства динамических моделей продукционного процесса. Работа посвящена исследованию возможностей ассимиляции данных ДЗЗ методом минимальных корректирующих возмущений.

Ключевые слова. Динамическая модель продукционного процесса, ассимиляция данных, данные дистанционного зондирования, NDVI, LAI.

Введение

При использовании динамических моделей продукционного процесса сельскохозяйственных культур в системах поддержки принятия решений серьёзной проблемой является достоверность получаемых результатов. Фундаментальная причина недостаточной достоверности моделей заключается в том, что они могут не учитывать те процессы, которые оказывают решающее влияние на урожай. Более того, даже если модель сама по себе будет отражать все необходимые процессы, это неминуемо расширит состав входных данных для неё, и полноту этих данных можно обеспечить только в условиях контролируемого полевого опыта, который специально ставится с учётом специфики конкретной модели. В системах же поддержки принятия решений гарантировать полноту входных данных для сложных моделей невозможно. Поэтому в последнее время активно используется подход, связанный с корректировкой результатов модельных расчётов по данным спутниковых снимков дистанционного зондирования Земли (Delécolle et al, 1992; Jin et al, 2018). Эти данные, как правило, открыты и оперативно обновляются. Обычно в сельскохозяйственных задачах используется индекс NDVI, который коррелирует с листовым индексом посева.

Однако проблема в том, что листовой индекс в динамической модели – это не изолированный показатель, а некая функция от множества переменных модели, которая пересчитывается на каждом шаге. Поэтому просто изменить листовой индекс на определённом шаге модели, чтобы привести его в соответствие измеренному в конкретный день NDVI, недостаточно: это нарушит согласование переменных состояния модели друг с другом. В результате коррекция листового индекса на текущем шаге позволит, возможно, лишь более адекватно смоделировать фотосинтез на следующем шаге, после чего модель вновь вернется к исходному состоянию. Поскольку все показатели, от которых прямо или косвенно зависит листовой индекс, содержат больше информации, чем сам листовой индекс или NDVI, пересчитать их в ходе оперативной коррекции аналитическим путём невозможно.

Однако, поскольку проблема достоверности модельных расчётов тесно связана с проблемой невозможности обеспечения полноты данных в условиях применения динамической модели продукционного процесса для поддержки принятия решений при выращивании производственного посева, естественным решением выглядит варьирование входных данных, позволяющее добиться соответствия расчётных листовых индексов измеренным оптическим индексам, таким как NDVI. Дополнительным преимуществом данного решения является отсутствие вмешательства во внутреннюю логику модели, и, таким образом, разработанная методика оперативной коррекции модельных расчётов может быть применена к произвольной

динамической модели продукционного процесса. В наших предшествующих работах уже поднималась тема ассимиляции данных ДЗЗ динамическими моделями продукционного процесса сельскохозяйственных культур (Топаж, Митрофанов, 2017; Медведев, 2018), и настоящая работа представляет собой исследование предложенных методов на реальных данных.

Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследования использовались модели ORYZA (Li et al., 2017) и AGROTOOL (Poluektov et al., 2002). Для ассимиляции данных ДЗЗ применялся метод рекалибровки, суть которого сводится к повторным расчётам с изменениями во входных данных, при которых модельные результаты приближаются к измеренным данным ДЗЗ. Для изменений в исходных данных использовались азотные подкормки, распределённые по вегетационному сезону (Гурин и др., 20212), и дата сева.

Для работы с азотными подкормками использовалась следующая модель:

$$z_1 = \sum_{i=0}^{NDVI len} \left(NDVI(i)_{act} - NDVI(i)_{model}\right)^2 \rightarrow min \qquad (1)$$

где $NDVI_{act}$ — фактический временной ряд NDVI, рассчитанный по спутниковым снимкам, $NDVI_{model}$ — временном ряд NDVI, рассчитанный на основании модельного LAI при помощи модели PROSAIL (Barman, 2010).

$$z_2 = \sum_{i=dmin-5}^{dmax} fert(i) \rightarrow min \qquad (2)$$

где *dmin* — день начала модельных расчетов, *dmax* — день модельного сбора урожая, *fert* — вектор азотных подкормок, *fert(i)* — количество азотных подкормок в i-ый день цикла модельных расчетов.

Эти показатели подставлялись в матрицу, и осуществлялся поиск оптимального решения:

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -1 & \cdots & 0 \\ \vdots & & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} fert_1 \\ fert_2 \\ \vdots \\ fert_{dmax} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}; \qquad (3)$$

В качестве алгоритма ассимиляции используется метод рекалибровки посредством минимизации корректирующих возмущений (Топаж, Митрофанов, 2017). Алгоритм оптимизации реализован следующим образом:

1. определяется возможные даты внесения подкормок и размер вектора подкормок = N
2. вектор подкормок инициализируется нулями
3. запускается имитационная модель, с переданным на вход текущим вектором подкормок и прочими данными, необходимыми для расчетов
4. из модели загружаются измерения LAI для дат, для которых есть измеренные NDVI
5. при помощи PROSAIL по модельному LAI рассчитывается модельный NDVI
6. рассчитывается текущая оценка по оптимизационному критерию
7. из текущего вектора азотных подкормок создается N новых вариантов, в каждом из которых добавляется 5 единиц азотного удобрения в каждую доступную дату
8. выполняется шаги 3-6

9. если оценка по критерию не улучшилась происходит выход из цикла оптимизации, иначе возвращаемся к шагу 7.

Работа с датами сева осуществлялась по более простому алгоритму: перебирались все возможные даты сева, и среди них выбиралась та, для которой получалось минимальное значение по формуле 1. В отличие от азотных подкормок, дата сева представляет собой одно конкретное значение, и поэтому его можно вычислить таким способом.

Результаты и обсуждение

Результаты расчётов по модели ORYZA с использованием ассимиляции данных по азотным подкормкам показаны в таблице 1.

Таблица 1. Результаты ассимиляции данных моделью ORYZA по азотным подкормкам

Номер точки	Реальный урожай	Модельный урожай без ассимиляции данных ДЗЗ	Модельный урожай после ассимиляции данных ДЗЗ	Количество итераций при ассимиляции данных ДЗЗ	Результат ассимиляции данных ДЗЗ
4955	5456	3246	5022	10	Положительный
4937	2810	6354	7771	9	Отрицательный
4954	2261	3251	5116	10	Отрицательный
4923	2808	6414	6414	0	Нейтральный
4938	4566	6345	6345	0	Нейтральный

Из этих результатов видно, что поскольку при увеличении количества доступного азота в агроэкосистеме модель ORYZA всегда даёт прибавку урожая, использовать для коррекции модельных расчётов информацию о подкормках можно только в том случае, когда расчётный урожай получается ниже реального. При этом было получено достаточно хорошее соответствие модельного урожая расчётному (точка 4955). В случае если расчётный урожай ниже реального, ассимиляця данных либо вообще не проходит (точки 4923 и 4938), либо приводит к увеличению расхождения расчётного урожая от реального (точки 4937 и 4954). В принципе, результат, при котором ассимиляция вообще не проходит, с точки зрения поставленной задачи является вполне корректным, но то, что в ряде случаев ассимиляция данных ухудшает работу модели, говорит о том, что в реальной ситуации использования системы поддержки принятия решений, когда реальный урожай ещё неизвестен, апробированная методика ассимиляции данных неприменима.

При ассимиляции данных ДЗЗ по дате сева результаты получились похожие: лишь для точки 4954 наблюдалось сокращение расхождения между модельным и реальным урожаем после проведения ассимиляции данных (таблица 2). Кроме того, модель ORYZA в принципе мало чувствительна к дате сева, поэтому ассимиляция данных ДЗЗ по дате сева нигде не позволяет даже приблизиться к реальным результатам.

Таблица 2. Результаты ассимиляции данных моделью ORYZA по дате сева

Номер точки	Реальный урожай	Модельный урожай без ассимиляции данных ДЗЗ	Модельный урожай после ассимиляции данных ДЗЗ	Дата сева до и после ассимиляции данных ДЗЗ	Результат ассимиляции данных ДЗЗ
4923	2808	6565	6565	21.07 / 21.07	Нейтральный
4937	2810	6614	6686	02.07 / 28.07	Отрицательный
4938	4566	6537	6536,9	09.07 / 09.07	Нейтральный
4954	2261	3745	3602,9	05.07 / 14.07	Положительный
4955	5456	3649	3639,6	10.07 / 26.07	Отрицательный

Гораздо лучше ассимиляция данных ДЗЗ по дате сева работает при использовании модели AGROTOOL (Таблица 3).

Таблица 3. Результаты ассимиляции данных моделью AGROTOOL по дате сева.

Номер точки	Реальный урожай	Модельный урожай без ассимиляции данных ДЗЗ	Модельный урожай после ассимиляции данных ДЗЗ	Дата сева до и после ассимиляции данных ДЗЗ	Результат ассимиляции данных ДЗЗ
11921	3365	3084	2224	10.09 / 09.10	Отрицательный
11922	1339	3092	2138	10.09 / 09.10	Положительный
11923	4378	3079	3666	10.09 / 01.10	Положительный
11924	1957	3103	2562	10.09 / 09.10	Положительный
11925	3245	1462	2962	10.09 / 09.10	Положительный
11926	2110	1464	2964	10.09 / 09.10	Нейтральный

Здесь уже в большинстве рассмотренных точек ассимиляция данных приводит к увеличению точности модельных расчётов. Однако надо отметить, что в большинстве точек, где наблюдается положительный результат ассимиляции данных ДЗЗ, всё равно модель недостаточно чувствительна к дате сева, чтобы ей полностью откорректировать результаты модельных расчётов, а в точке 11926, наоборот, модель оказалась слишком чувствительной. Это, в принципе, логично, поскольку начальные условия произрастания растения, которые в ходе ассимиляции данных ДЗЗ считаются неизвестными и подлежащими корректировке, не обязательно являются дозами азотных подкормок и датой сева в реальной ситуации.

Выводы

На настоящий момент однозначно положительных результатов исследований не получено. Основной проблемой является недостаточное количество данных полевых опытов, которые бы позволили провести более масштабные исследования. Кроме того, необходимо разрабатывать другие методики ассимиляции данных ДЗЗ, например, по внутренним параметрам культуры. Агрофизический институт создавался как учреждение, предназначенное для коллаборации специалистов в разных науках, поэтому необходимо повышать уровень взаимодействия между отделами и лабораториями, чтобы совместно использовать информационные технологии и экспериментальные исследования для решения задач.

Благодарности

Авторы благодарят компанию Cntrl To Go за предоставленные данные об урожайности полей.

Список литературы / References

1. Гурин П. Д., Захарова Е. Т., Топаж А. Г. Алгоритм подбора оптимальных сроков внесения и уровня доз азотных удобрений и подкормок в рамках имитационной модели AGROTOOL // Тенденции развития агрофизики в условиях изменяющегося климата (к 80-летию Агрофизического НИИ). 2012. ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт». Санкт-Петербург. С. 494-496
2. Медведев С. А. Технология уточнения модельных прогнозов продуктивности путём ассимиляции данных дистанционного зондирования // Применение средств дистанционного зондирования Земли в сельском хозяйстве. 2018. ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт». Санкт-Петербург. С. 292–298.
3. Топаж А. Г., Митрофанов Е. П. Ассимиляция данных в имитационном моделировании экологических процессов методом минимизации корректирующих возмущений // Вестник

СПбГУ. Серия «Прикладная математика. Информатика. Процессы управления» 2017. Т. 13. Вып. 3, С. 326-338
4. Barman D., Sehgal V.K., Sahoo R.N., Nagarajan S. Relationship of bidirectional reflectance of wheat with biophysical parameters and its radiative transfer modeling using prosail // Division of Agricultural Physics, Indian Agricultural Research Institute, Pusa Campus. 2010. P. 35 – 44
5. Delécolle, R., Maas, S., Guérif, M., Baret, F., Remote sensing and crop production models: present trends. // ISPRS J. Photogramm. 1992. Vol. 47, 145–161.
6. Jin, X., Kumar, L., Li, Z., Feng, H., Xu, X., Yang, G., Wang, J., A review of data assimilation of remote sensing and crop models // Eur. J. Agron. 2018. Vol. 92, 141–152.
7. Li, T., Angeles, O., Marcaida, M. III, Manalo, E., Manalili, M. P., Radanielson, A., Mohanty, S. From ORYZA2000 to ORYZA (v3): An improved simulation model for rice in drought and nitrogen-deficient environments. // Agricultural and Forest Meteorology. 2017. P. 237-238, 246–256.
8. Poluektov, R.A., Fintushal, S.M., Oparina, I.V., Shatskikh, D.V., Terleev, V.V., Zakharova, E.T. Agrotool-A system for crop simulation // Archives of Agronomy and Soil Science. 2002. Vol. 48, Issue 6. P. 609-635; DOI: 10.1080/0365034021000041597

RESEARCH OF REMOTE SENSING DATA ASIMILATION EFFICIENCY IN CROP SIMULATION MODELS

D. Y. EREMENKO, S. A. MEDVEDEV, E. T. ZAKHAROVA
Agrophysical Research Institute, St. Petersburg, Russia, conference.dzz@agrophys.ru;

Abstract. To increase the precision of crop simulation models the idea of using of remote sensing data assimilation looks very attractive and perspective. This data can correct model calculations. Usually, NDVI index is used to do this, which can be either measured by remote sensing or calculated by the leaf index, which is included into the output data set of the most of the crop simulation models. Current work describes study of abilities of this method by minimal correction disturbances.

Keywords. Crop simulation model, data assimilation, distant sounding data, NDVI, LAI.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ИНДЕКСОВ ДЛЯ ДЕШИФРИРОВАНИЯ РАСТИТЕЛЬНЫХ ОСТАТКОВ НА ПРИМЕРЕ СТАВРОПОЛЬСКОГО КРАЯ

Н. Р. ЕРМОЛАЕВ, С. А. ЮДИН, В. П. БЕЛОБРОВ
ФГБНУ ФИЦ «Почвенный институт им. В.В. Докучаева», Москва, n.r.ermolaev94@gmail.com

Аннотация. Перспективной ресурсосберегающей технологией земледелия, внедряемой в России и мире, является прямой посев (no-till). Одно из базовых требований, необходимых для соблюдения технологии - сохранения растительных остатков на поверхности почвы. Растительные остатки формируют характерный облик поверхности сельскохозяйственных полей, который можно использовать для выделения хозяйств, применяющих прямой посев, аэрокосмическими методами. В рамках исследования проводится анализ возможности использования мульти временного спектрального индекса minNDTI как дешифровочного признака различных систем обработки почвы. Объектами исследования являются два хозяйства, распложённые в Буденовском районе Ставропольского края, использующие традиционную для региона систему обработки и технологии no-till. В августе 2019 года на территории Буденовского района проводились полевые работы в ходе которых производилась фотофиксация поверхности полей, покрытыми растительными остатками и открытой поверхности почв. Для группировки полей хозяйств по культурам, на основании годичной динамики NDVI за вегетационный сезон 2018-2019 для каждого хозяйства был проведен кластерный анализ методом K-means, и выделено по 3 группы для каждой обработки - для прямого посева: озимые, яровые и не зерновые яровые культуры, для традиционных технологий: озимые, яровые культуры и пары. На основании данных sentinel-2, при помощи платформы Google Earth Engine, были построены изображения NDTI за вегетационный период 2018-2019, и на их основании, построено мульти временное изображение minNDTI, а также получены значения NDTI актуальные на момент проведения полевых работ. Значения NDTI для прямого посева на момент проведения полевых работ составляет 0.06, для голой почвы 0.01. Медиана значений minNDTI при прямом посеве для озимых культур – 0.04, для яровых 0.03, для других культур – 0.03. При традиционных технологиях для озимых культурных медиана minNDTI 0.02, для яровых 0.01, для паров -0.001. Анализ показал статистически достоверные различия между обработками, так и между культурами для каждого типа обработки. Так же не обходимо отметить, что значения minNDTI согласуются с полученными полевыми значениями NDTI.

Ключевые слова. NDTI, прямой посев, ресурсосберегающее земледелие, google earth engine, управление растительными остатками, дистанционное зондирование

Введение

Деградация почв в следствии природных и антропогенных процессов остается одной из ключевых проблем для сельскохозяйственных регионов России. Решением данной проблемы является внедрение ресурсосберегающих технологий в производство. Распространённой ресурсосберегающей технологий является прямой посев. Технология прямого посева подразумевает отсутствие нарушения верхних почвенных горизонтов агрегатами сельскохозяйственной техники, а также сохранение растительных остатков на поверхности. Растительные остатки защищают почву от деградационных процессов [1, 2] и формируют характерный для прямого посева природно-антропогенный ландшафт. В зарубежной литературе используется понятие crop residue management (CRM) [3], что дословно переводится как управление растительными остатками. CRM является неотъемлемой частью сельскохозяйственного производства при применении прямого посева. Так как количество хозяйств, использующих данную технологию в России с каждым годом, растет, возникает задача разработки методик учета и управления растительными остатками. В зарубежной литературе [4, 5] применяется подход, при котором данные дистанционного зондирования земли валидируются с полевыми данными о состоянии растительных остатков. Для учета растительных остатков на основании данных дистанционного зондирования обычно используется спектральный индекс NDTI. Целью нашего исследования является анализ возможности применения спектрального индекса NDTI для выявления и учета растительных остатков разных групп сельскохозяйственных культур.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования являются поверхности производственных полей, на которых применяются разные технологии обработки – прямой посев (PP) (44°32'51.73"C, 44°10'33.30"B) и традиционная для региона технология (TT) (44°40'1.32"C, 44°17'48.31"B. Поля расположены на территории Буденовского района Ставропольского края. С точки зрения почвенно-климатического районирования Буденовский район относится к северо-западной подзоне засушливой зоны Ставропольского края. Наиболее распространёнными почвами являются тёмно-каштановые и каштановые. В пределах подзоны широко применяются зернопаровые севообороты, в частности и двухпольные севообороты (пар-озимая пшеница)[6]. Кроме зернопаровых севооборотов так же возделываются озимый и яровой ячмень, горох, сорго, просо, озимый рапс, кукуруза на силос, подсолнечник, многолетние травы.
Распространённым методом дешифрирования растительных остатков на основании аэрокосмических данных является использование спектрального индекса NDTI, а также его мульти временной разновидности minNDTI [7, 8].

$$NDTI = \frac{SWIR1 - SWIR2}{SWIR1 + SWIR2},$$

где SWIR1 – канал Sentinel-2 в диапазоне 1565-1655 нм электромагнитного спектра, SWIR2 – канал Sentinel-2 в диапазоне 2100-2280 нм электромагнитного спектра, NDTI – значение индекса. За счет отражательных и поглотительных особенностей растительных остатков в SWIR1 и SWIR2 диапазонах электромагнитного спектра, на основании данных NDTI, можно выделять открытую поверхность почвы, и растительные остатки, при этом значение NDTI для растительных остатков будет выше. При подборе данных для расчета индекса необходимо так же учитывать, что на значения NDTI в значительной степени влияют живые растения, а также влажная почва, завышая показатель NDTI до аномальных значений. Использование интегрального мультивременного индекса minNDTI позволяет минимизировать возможность попадания в итоговую выборку аномальных значений [9]. Поскольку распределения значений NDTI и minNDTI отличается от нормального, для характеристики объектов использовалась медиана, как наиболее информативная описательная статистика. Для сравнения групп между собой использовался непараметрический аналог дисперсионного анализа – H критерий Краскела-Уоллиса. Подбор, обработка и дальнейший анализ дистанционного зондирования проводились в среде jupyter notebook.

Результаты и обсуждение

В рамках полевых работ проводилась фотофиксация поверхностей при разных системах обработки. На основании данных sentinel 2 проводился расчет актуальных на момент проведения полевых работ значений NDTI. Для TT медиана значений NDTI составляет 0.01, для PP 0.06. На рисунке (рис. 1) приведены фотографии поверхностей при разных обработках. Кроме актуального значения, рассчитывался minNDTI. Для прямого посева значение мультивременного показателя - 0.03, для традиционной технологии 0.003.

Традиционная технология (ТТ) Прямой посев (РР)

Рис. 1. Внешний вид прямого посева и традиционной технологии

Сельскохозяйственные культуры имеют разную фито продуктивность, и как следствие после уборки сохраняется разный объем растительных остатков. Поскольку данные о культурах выращиваемых на полях хозяйств в сезон 2018-2019 гг. отсутствовали, нами осуществлена попытка самостоятельно выделить отдельные группы культурных растений, на основании данных дистанционного зондирования, имеющихся в открытом доступе. На основании данных динамики значений MODIS NDVI (MOD13Q1.006) был проведен кластерный анализ методом K-means. Мы считаем, что 3 группы для каждой выборки является оптимальным количеством кластеров. Для традиционной технологии были выделены: пары- значения вегетационного индекса не имеют ярко выраженных пиков за весь период наблюдений, озимые культуры – значения имеют два пика в осенний и весенне-летний периоды, и яровые культуры – значения имеют один пик в весенне-летний период. Для прямого посева выделены- озимые и яровые схожие по пикам с аналогами ТТ, и еще одна группа со смещённым летним пиком вегетации, к которой мы относим другие культуры, характерные для региона. На рис. 2 представлен график распределения значений индекса относительно друг друга и значений полей, которые были обследованы в рамках полевых работ.

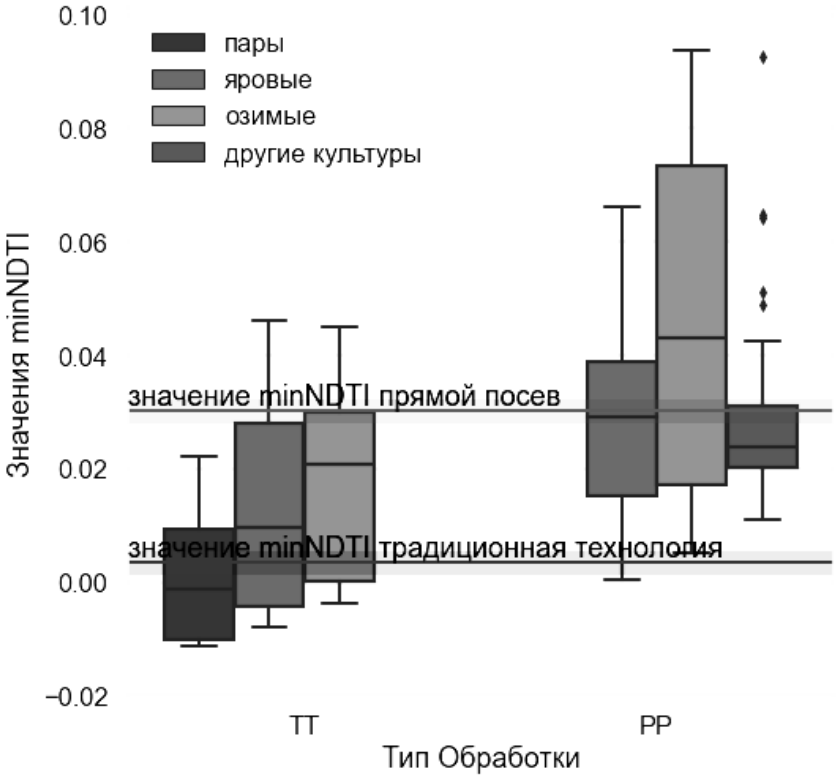


Рис. 2. Распределение значений minNDTI

Для каждой группы были рассчитаны значения minNDTI за период с 01.09.2018 по 01.09.2019 (таблица). Количественно значения индекса выше у РР. При проведении Н-теста для сравнения всех культур p – уровень значимости составляет 0.000, что говорит о статистически значимых различиях между выборками. При проведении внутригруппового тестирования для каждой технологии обработки уровень значимости для трех культур при прямом посеве составил 0.18, для традиционной технологии уровень значимости составил 0.0. Кроме этого Н-тест применялся по парно ко всем группам культур. Пары имеют статистически достоверные отличия от всех групп. Р-значение при сравнении озимых и яровых культур при традиционной обработке – 0.052, что при уровне $\alpha = 0.05$ не позволяет говорить о статистически достоверных различиях между выборками. Количественно медиана minNDTI для паров составляет -0.001, для озимых культур 0.02, для яровых 0.01. Можно предположить, что несмотря на уборку культур при традиционной технологии, на поверхности почвы все равно сохраняется часть растительных остатков, которые влияют на значения NDTI. При прямом посеве озимые и яровые отличаются от групп традиционной обработки.

Таблица. Медианальные значения minNDTI

	Группы	количество	медиана minNDTI
РР	другие культуры	41	0.024
	озимые	24	0.043
	яровые	85	0.029
	общее	150	0.027
ТТ	озимые	26	0.020
	пары	33	-0.001
	яровые	61	0.010
	общее	120	0.003
общее		270	0.021

Выводы

В рамках исследования было установлено что спектральный индекс NDTI и его мульти временная модификация minNDTI позволяет на качественном уровне выделять растительные остатки на поверхности почвы. Были установлены достоверные различия между значениями minNDTI при традиционной обработке и при прямом посеве. Кроме этого, на основании индекса были установлены различия между парами и другими культурами при применении традиционной технологии. Группы яровых культур и озимых при прямом посеве также имеют достоверные различия что позволяет говорить о возможности классификации культур на основании NDTI. На основании вышеизложенного можно утверждать, что индекс minNDTI является информативным показателем для разработки систем управления растительными остатками при применении прямого посева.

Список литературы / References

1. Дридигер В.К., Стукалов Р.С., Гаджиумаров Г.С. Влияние растительных остатков на накопление влаги и популяцию дождевых червей при возделывании полевых культур по технологии no-till // Новые методы и результаты исследований ландшафтов в Европе, центральной Азии и Сибири. 2018. с. 134–139.
2. Wilhelm W.W. et al. Crop and Soil Productivity Response to Corn Residue Removal: A Literature Review // Agron. J. 2004. Vol. 96, № 1. P. 1–17.
3. Reicosky D.C., Wilts A.R. Crop-Residue Management // Encycl. Soils Environ. 2004. Vol. 4. P. 334–338.

4. Quemada M., Craig S.T. Spectral indices to improve crop residue cover estimation under varying moisture conditions // Remote Sens. 2016. Vol. 8, № 8. P. 660.
5. Daughtry C.S.T. et al. Remote sensing of crop residue cover and soil tillage intensity // Handb. Environ. Chem. Vol. 5 Water Pollut. 2006. Vol. 91, № 1–2. P. 101–108.
6. Кулинцев В. Система земледелия нового поколения Ставропольского края. Ставрополь: АГРУС Ставропольског о гос. аграрного ун-та, 2013. 520 с.
7. Zheng B., Campbell J.B., de Beurs K.M. Remote sensing of crop residue cover using multi-temporal Landsat imagery // Remote Sens. Environ. Elsevier Inc., 2012. Vol. 117. P. 177–183.
8. Zheng B. et al. Remote sensing of crop residue and tillage practices: Present capabilities and future prospects // Soil Tillage Res. Elsevier B.V., 2014. Vol. 138. P. 26–34.
9. Beeson P.C., Daughtry C.S.T., Wallander S.A. Estimates of conservation tillage practices using landsat archive // Remote Sens. 2020. Vol. 12, № 16. P. 1–18.

USE OF SPECTRAL INDICES FOR DECODING OF CROP RESIDUES ON THE EXAMPLE OF STAVROPOL KRAI

N. R. ERMOLAEV, S. A. YUDIN, V. P. BELOBROV
Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, Russia. n.r.ermolaev94@gmail.com

Abstract. No-till is a promising conservation farming technology that is being introduced in Russia and the world. One of the basic requirements required to comply with the technology of preserving crop residues on the soil surface. Crop residues form the characteristic appearance of the surface of agricultural fields, which can be used to distinguish farms that use no-till, using aerospace methods. The study analyzes the possibility of using the multi-time spectral index minNDTI as a decoding feature of various tillage systems. The objects of the study are two farms located in the Budenovsky district of the Stavropol Territory, using the traditional processing system and no-till technology for the region. In August 2019, field work was carried out on the territory of the Budenovsky district, during which the surface of the fields covered with plant remains and the open surface of the soil were photofixed. To group the fields of farms by crop, based on the annual dynamics of NDVI for the growing season 2018-2019, a cluster analysis was carried out for each farm using the K-means method, and 3 groups were allocated for each treatment - for direct sowing: winter, spring and non-grain spring crops, for traditional technologies: winter, spring crops and pairs. Based on the sentinel-2 data, using the Google Earth Engine platform, NDTI images were constructed for the growing season 2018-2019, and on their basis, a multi-time minNDTI image was constructed, as well as NDTI values were obtained that were relevant at the time of field work. The NDTI values for direct sowing at the time of field work are 0.06, for bare soil 0.01. The median minNDTI values for no-till for winter crops are 0.04, for spring crops 0.03, and for non-cereal spring crops-0.03. With traditional technologies, the median minNDTI is 0.02 for winter crops, 0.01 for spring crops, and -0.001 for fallow crops. The analysis showed statistically significant differences between treatments and between crops for each type of treatment. It should also be noted that the minNDTI values are consistent with the obtained NDTI field values.

Keywords. NDTI, no-till, conservation agriculture, google earth Engine, **c**rop residue management, remote sensing.

ОЦЕНКА ВНУТРИПОЛЕВОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ С ПОМОЩЬЮ ВАРИОГРАММНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

О. А. МИТРОФАНОВА[1,2], В. П. ЯКУШЕВ[1], В. М. БУРЕ[1,2]
[1]ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт» (ФГБНУ АФИ), Санкт-Петербург, omitrofa@gmail.com;
[2]ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет» (ФГБОУ ВО СПбГУ), Санкт-Петербург, o.a.mitrofanova@spbu.ru

Аннотация. Современное точное земледелие основано на дифференцированных технологиях внесения агрохимикатов, а для их применения необходимо оценить уровень внутриполевой изменчивости. Ведь не всегда переход к таким более точным подходам целесообразен, если доля случайных вариаций агроэкологических параметров на обследуемой сельскохозяйственной территории велика, то дифференцированная подкормка не позволит скомпенсировать эту неоднородность. В работе представлен подход к решению этой проблемы, основанный на вариограммном анализе.

Ключевые слова. Внутриполевая изменчивость, вариограммный анализ, геостатистика, наггет-дисперсия.

Введение

Современное и перспективное направление растениеводства – точное земледелие, основывается на дифференцированной технологии внесения агрохимикатов, которая позволяет экономить финансовые и трудозатраты, увеличивая при этом урожайность и снижая вредное воздействие на экологию почв (Якушев, 2016). Для применения такого подхода необходимо провести оценку внутриполевой изменчивости агроэкологических параметров (в зависимости от вида применяемых агрохимикатов это могут быть характеристики почвы, посевов и т.п.).

Для решения задачи исследования пространственной вариабельности различных показателей на сельскохозяйственной территории выделяются несколько основных подходов:

– методы кластеризации (Gavioli et al., 2019; Ohana-Levi et al., 2019);
– методы машинного обучения (Chlingaryan, Sukkarieh, Whelan, 2018);
– геостатистические методы (Bakar et al., 2021; Landrum et al., 2015; Salas et al., 2021);
– ассимиляция методов (Diacono et al., 2013; Gaso et al., 2021);
– и др.

Следует отметить, что в качестве исходных данных используются как наземные данные, так и данные дистанционного зондирования (Gaso, Berger, Ciganda, 2019; Sahadevan, 2021), а также сенсоры (Anastasiou et al., 2019; Castrignano et al., 2018; Corredo et al., 2021).

В Агрофизическом научно-исследовательском институте (АФИ) в рамках выполнения проекта РФФИ предложено для оценки внутриполевой изменчивости агроэкологических параметров использовать вариограммный анализ (Якушев и др., 2020а). На основе решения этой задачи определяется также и целесообразность перехода к дифференцированной технологии внесения агрохимикатов (Якушев и др., 2020б).

Объекты и методы исследования

Исходными данными исследования являются спутниковые и аэрофотоснимки сельскохозяйственных территорий. Аэрофотосъемка осуществлялась на территории биополигона АФИ, расположенного в деревне Меньково Ленинградской области, с помощью беспилотной авиационной системы Геоскан-401, позволяющей в автоматизированном режиме оперативно получать мультиспектральные изображения высокого качества. Спутниковые снимки были получены с помощью бесплатного ресурса Sentinel-hub.

Наборы оптических показателей сельскохозяйственных растений $Z(x_i)$, полученные на основе исходных снимков, использовались для вариограммного анализа – хорошо изученного инструментария для описания статистической структуры исследуемой характеристики. На

первом этапе решения задачи выполнялись предварительная статистическая обработка данных, а также построение экспериментальной вариограммы (Демьянов, Савельева, 2010):

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

где *h* – расстояние между двумя точками (координаты, выраженные в десятичных градусах), *N*(*h*) – количество пар наблюдений на расстоянии *h*. Для простоты анализ проводился без учета направления. Далее строилась теоретическая модель вариограммы.

Рассматриваемый подход базируется на геостатистической модели описания внутриполевой изменчивости (Якушев и др., 2010):

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

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.

Далее рассмотрим предложенный подход к оценке внутриполевой вариабельности агроэкологических параметров.

Результаты и обсуждение

Исходя из геостатистической модели (1) оценивался уровень внутриполевой изменчивости в общей картине неоднородности поля. На основе полученной теоретической модели вариограммы осуществлялся переход к нормированной полудисперсии *v* путем деления обеих частей выражения вариограммы на значение порога с. В результате получили две основные аналитические характеристики: относительная наггет-дисперсия $\xi = c_0/c$, где c_0 – так называемый самородок; а также показатель доли случайной микрокомпоненты в общей изменчивости агроэкологического параметра $\theta = \frac{c_0}{\gamma}(h) = \frac{\xi}{v}(\mu)$, где μ – условно называется масштабом поля. На основе анализа величин нормированной вариограммы и аналитических характеристик оценивался уровень внутриполевой изменчивости, исходя из полученного результата принималось решение о целесообразности перехода к технологиям точного земледелия.

Были проведены два вычислительных эксперимента. Первый осуществляли на базе нескольких спутниковых снимков сельскохозяйственных полей хозяйства «Красносельское», полученных с помощью бесплатного ресурса Sentinel-hub. В результате уровень внутриполевой изменчивости оказался различным на этих территориях, что соответствовало визуально построенным картам распределения вегетационного индекса NDVI, уровень пестроты одного из полей был существенно выше, несмотря на то, что анализируемые участки находились рядом, геостатистический подход позволил определить, что эта неоднородность в большей степени не была связана со случайной вариабельностью, а значит представляется возможным ее сгладить дифференцированным применением агрохимикатов.

Второй эксперимент проводился на основе аэрофотоснимков одного и того же поля, расположенного на биополигоне АФИ, до подкормки растений и после. В результате удалось

подтвердить, что до внесения удобрений внутриполевая изменчивость имела высокий уровень, а после - возросла доля случайных вариаций, а следовательно, снизился уровень внутренней неоднородности.

Выводы

Таким образом, вариограммный анализ позволяет анализировать статистическую структуру агроэкологических параметров не только на основе наземных измерений, но и с помощью данных дистанционного зондирования, что существенно упрощает решение определенного круга задач. При этом геостатистический подход предоставляет возможности для оценки уровня внутриполевой изменчивости, что позволяет в дальнейшем принимать решение о целесообразности применения дифференцированной технологии внесения агрохимикатов.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-29-05184 мк.

Список литературы / References

1. Демьянов В. В., Савельева Е. А. Геостатистика: теория и практика. М.: ИПБРАЭ РАН, Наука, 2010. 327 с.
2. Якушев В. В. Точное земледелие: теория и практика. СПб.: ФГБНУ АФИ, 2016. 364 с.
3. 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. 2020а. Т. 17. № 2. С. 114-122.
4. Якушев В. П., Буре В. М., Митрофанова О. А., Митрофанов Е. П. Применение методов геостатистики для анализа целесообразности перехода к технологиям дифференцированного внесения агрохимикатов // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2020. Т. 16. № 1. С. 31-40.
5. 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. 52 с.
6. Anastasiou E., Castrignano A., Arvanitis K., Fountas S. A multi-source data fusion approach to assess spatial-temporal variability and delineate homogeneous zones: A use case in a table grape vineyard in Greece // Science of the total environment. 2019. Vol. 684. P. 155-163.
7. Bakar K. S., Jin H., Henderson B., Bramley R. G. V., Gobbett D. L., Ratcliff C. E. M. An algorithm to identify the appropriate size of a neighbourhood when analysing spatially distributed field experiments by local cokriging // Computers and electronics in agriculture. 2021. Vol. 188. 106328.
8. Castrignano A., Buttafuoco G., Quarto R., Parisi D., Viscarra Rossel R. A., Terribile F., Langella G., Venezia A. A geostatistical sensor data fusion approach for delineating homogeneous management zones in precision agriculture // Catena. 2018. Vol. 167. P. 293-304.
9. Chlingaryan A., Sukkarieh S., Whelan B. Machine learning approaches for crop yield prediction and nitrogen status estimation in precision agriculture: A review // Computers and electronics in agriculture. 2018. Vol. 151. P. 61-69.
10. Corredo L. P., Wei M. C. F., Ferraz M. N., Molin J. P. Near-infrared spectroscopy as a tool for monitoring the spatial variability of sugarcane quality in the fields // Biosystems engineering. 2021. Vol. 206. P. 150-161.
11. Diacono M., De Benedetto D., Castrignano A., Rubino P., Vitti C., Abdelrahman H. M., Sollitto D., Cocozza C., Ventrella D. A combined approach of geostatistics and geographical clustering for

delineating homogeneous zones in a durum wheat field in organic farming // NJAS – Wageningen journal of life sciences. 2013. Vol. 64-65. P. 47-57.
12. Gaso D. V., Berger A. G., Ciganda V. S. Predicting wheat grain yield and spatial variability at field scale using a simple regression or a crop model in conjunction with Landsat images // Computers and electronics in agriculture. 2019. Vol. 159. P. 75-83.
13. Gaso D. V., de Wit A., Berger A. G., Kooistra L. Predicting within-field soybean yield variability by coupling Sentinel-2 leaf area index with a crop growth model // Agricultural and forest meteorology. 2021. Vol. 308-309. 108553.
14. Gavioli A., de Souza E. G., Bazzi C. L., Schenatto K., Betzek N. M. Identification of management zones in precision agriculture: An evaluation of alternative cluster analysis methods // Biosystems engineering. 2019. Vol. 181. P. 86-102.
15. Landrum C., Castrignano A., Mueller T., Zourarakis D., Zhu J., de Benedetto D. An approach for delineating homogeneous within-field zones using proximal sensing and multivariate geostatistics // Agricultural water management. 2015. Vol. 147. P. 144-153.
16. Ohana-Levi N., Bahat I., Peeters A., Shtein A., Netzer Y., Cohen Y., Ben-Gal A. A weighted multivariate spatial clustering model to determine irrigation management zones // Computers and electronics in agriculture. 2019. Vol. 162. P. 719-731.
17. Sahadevan A. S. Extraction of spatial-spectral homogeneous patches and fractional abundances for field-scale agriculture monitoring using airborne hyperspectral images // Computers and electronics in agriculture. 2021. Vol. 188. 106325.
18. Salas E. A. L., Subburayalu S. K., Slater B., Dave R., Parekh P., Zhao K., Bhattacharya B. Assessing the effectiveness of ground truth data to capture landscape variability from an agricultural region using Gaussian simulation and geostatistical techniques // Heliyon. 2021. Vol. 7. e07439.

WITHIN-FIELD VARIABILITY ESTIMATION USING VARIOGRAM ANALYSIS OF REMOTE SENSING DATA

O. A. MITROFANOVA [1,2], V. P.[1] YAKUSHEV, V. M. BURE [1,2]
[1] *Agrophysical Research Institute, St. Petersburg, Russia, omitrofa@gmail.com;*
[2] *Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia, o.a.mitrofanova@spbu.ru*

Abstract. Modern precision farming is based on differentiated technologies for applying agrochemicals, and for their application it is necessary to assess the level of intra-field variability. After all, the transition to such more accurate approaches is not always advisable, if the proportion of random variations in agroecological parameters in the surveyed agricultural area is large, then differentiated feeding will not compensate for this heterogeneity. The paper presents an approach to solving this problem based on variogram analysis.

Keywords. Within-field variability, variogram analysis, geostatistics, nugget to sill ratio.

СПУТНИКОВАЯ ОЦЕНКА ТЕКСТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ ПО РАДАРНЫМ И ОПТИЧЕСКИМ ДАННЫМ АППАРАТОВ SENTINEL НА ПРИМЕРЕ НОВОСИБИРСКОЙ ОБЛАСТИ

Н. В. РОДИОНОВА[1], С. Я. КУДРЯШОВА[2], А. С. ЧУМБАЕВ[2]
[1] Фрязинский филиал Института радиотехники и электроника им. В.А. Котельникова РАН (ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН),
Фрязино, Московская область, rnv@ire.rssi.ru;
[2] Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (ИПА СО РАН),
Новосибирск, sya55@mail.ru;
[2] Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (ИПА СО РАН),
Новосибирск, chas30@mail.ru

Аннотация. В работе рассматривается использование радарных и оптических данных спутников Sentinel 1 и Sentinel 2 за 2019-2020 годы для оценки процентного содержания глины и влажности в верхнем слое почвы на примере черноземов и серых лесных почв Новосибирской области.

Ключевые слова. Радарные данные С-диапазона, коэффициент обратного рассеяния, мультиспектральные данные, коэффициент отражения, содержание глины в почве, влажность почвы.

Введение

На оптические свойства почвы влияют, в основном, ее минеральный состав, текстура, содержание органического вещества, влажность. Для дистанционного восстановления этих параметров используют различные группы спектральных индексов. По радарным данным можно восстановить шероховатость и диэлектрическую проницаемость почвы, которая зависит от влажности и текстуры почвы.

В данной работе рассматривается использование радарных данных спутника Sentinel 1 (S1) и оптических данных спутника Sentinel 2 (S2) за 2019-2020 годы для оценки содержания влажности и глины (Clay) в верхнем слое почвы (0-10 см) на примере черноземов и серых лесных почв Новосибирской области.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования являются почвы шести тестовых участков, расположенных в Новосибирской области (выделены красным прямоугольником на рис. 1 (вверху)). Детальная карта расположения черноземов и серых лесных почв с номерами тестовых площадок показана в нижней части рисунка 1. На участках были взяты образцы почв на глубине 0-10 см (данные сентября 2019 года), и в лабораторных условиях определен гранулометрический состав почв. В таблице 1 приведены координаты и измеренные значения механического состава образцов почв для двух из шести тестовых участков.

В работе использованы радарные данные S1 С-диапазона IW (interferometric wide swath) моды с поляризацией VV и VH, пространственным разрешением (ПР) 10 м и временным разрешением 12 дней. Угол обзора составляет 42.66° - 42.81°. Работа с изображениями S1 осуществлялась с помощью программы SNAP (https://sentinel.esa.int/web/sentinel/toolboxes/sentinel-1). Предварительная обработка данных включала выделение фрагмента с исследуемой областью и радиометрическую калибровку.

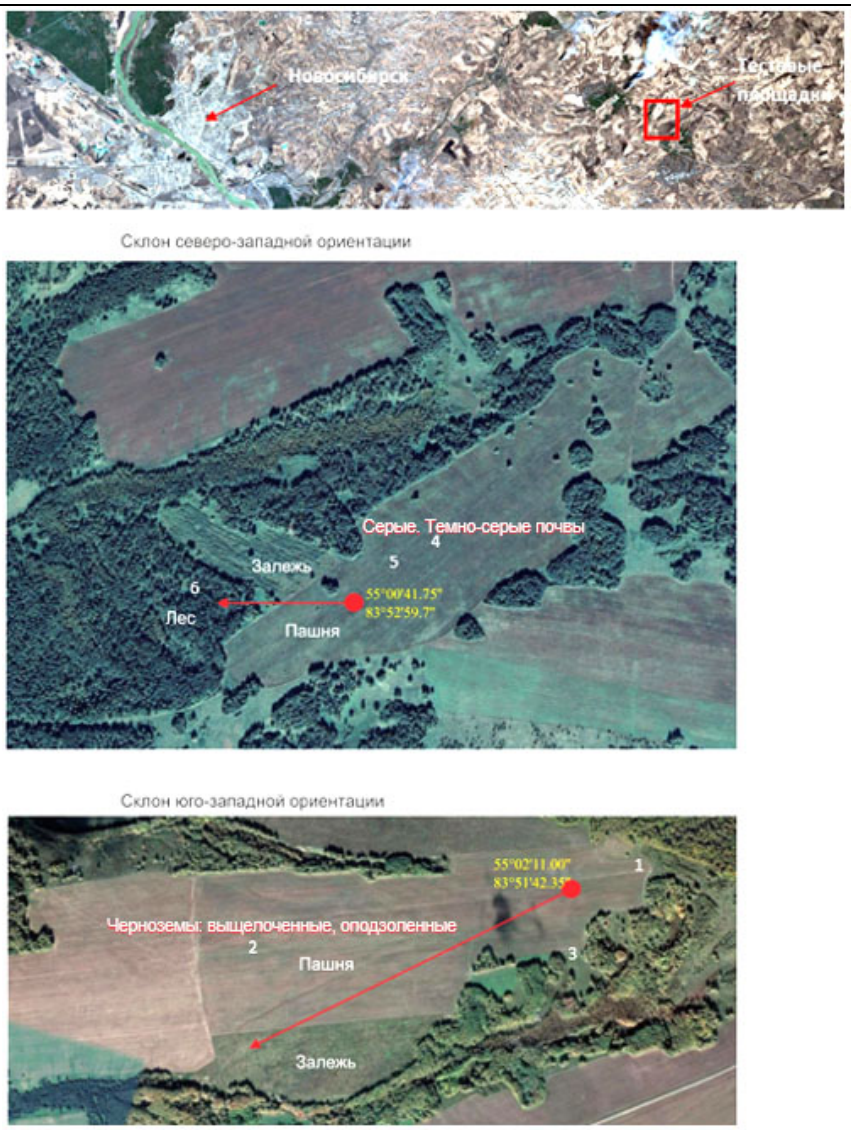


Рис. 1. Место расположения тестовых площадок

Таблица 1. Описание отдельных тестовых площадок

№ площадки	Координаты с.ш., в.д.	Глина, %	Песок, %	Ил, %
№1. Чернозем выщелоченный, несмытая пашня	55°02’12.3’’, 83°51’47.8’’	25.6	53.7	20.7
№4. Серая лесная почва, несмытая пашня	55°00’42.0’’, 83°53’01.1’’	22.9	54.8	22.3

Кроме радарных, в работе использованы мультиспектральные (МС) данные S2 с периодичностью съемки каждым спутником 10 дней. В МС камере 13 каналов с разным ПР от 10 до 60 метров. Использовались данные съемочной системы S2 с уровнем обработки L2A. Работа с изображениями S2 осуществлялась программой SNAP. Использованы безоблачные сеансы за апрель-май 2019 и 2020 годов.

Для спутниковой оценки содержания глины в почве накладываются ограничения на выбор МС изображений, связанные с выделением на изображениях сухих почв без растительности. В работе (Dematte et al., 2018) приведены условия, которые для каналов S2 даны в виде (Castaldi et al., 2019): 1) нулевая облачность, 2) *NDVI=(B8-B4)/(B8+B4)<0.35*, 3) разность коэффициентов отражения (КО) (B3-B2)>0 и (B4-B3)>0, 4) *NBR=(B11-B12)/(B11+B12)*<=0.05. Итого для исследуемой

территории выбраны снимки S2 L2A за 23.4.2019 и 22.4.2020, где требуемые условия выполнены для всех площадок, кроме площадки №6 (лес).

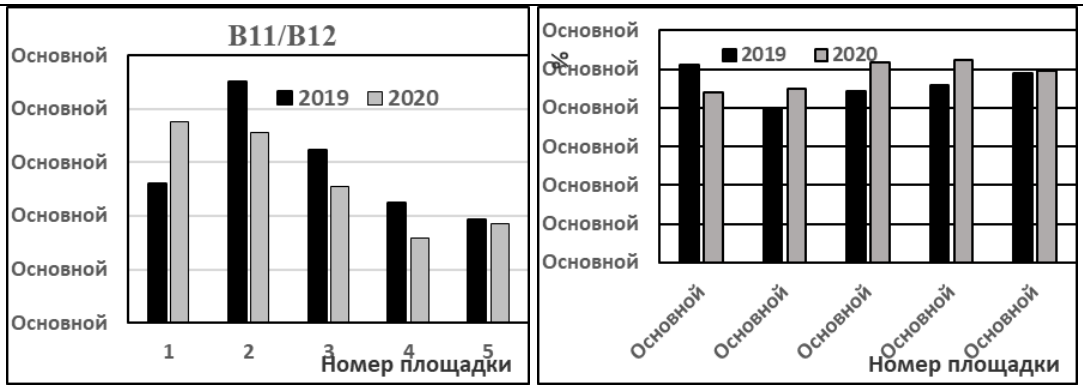
Результаты и обсуждение

Известно, что спектральный индекс глины *CI=SWIR1/SWIR2* (Clay Index), введенный в работе (Hengl, 2007), отличается сильной отрицательной корреляцией с содержанием глины в почве. На рисунке 2 (а) приведены графики значений CI=B11/B12 для сеансов S2 23.4.2019 и 22.4.2020, позволяющие сравнить изменения за год в содержании глины в верхнем слое почвы площадок №1-№5. Изменения за год не коснулись площадки №5, для площадок №2-№4 есть небольшое увеличение содержания глины, и небольшое уменьшение для площадки №1.

Используя регрессионную модель (Castaldi et al., 2019) с переменной в экспоненте CI, получаем формулы для количественной оценки процентного содержания глины в почве: *Clay(%)=802*exp (-2.69*CI)* – для черноземов, *Clay(%)=5123.6*exp(-4.29*CI)* – для серых лесных почв. Часть наземных измерений содержания глины в почве тестовых участков была использована для получения параметров экспоненты, а оставшаяся часть – для валидации. На рисунке 2 (б) приведены графики значений процентного содержания глины в почвах пяти тестовых участков (измеренные значения) и подсчитанные по формулам, приведенным выше, для 2020 года. Качественная оценка содержания глины в почвах тестовых участков по значению индекса глины не противоречит количественной оценке по регрессионной модели.

Для оценки влажности почвы в работе использованы три подхода: 1) оценка по оптическим данным, 2) по радарным данным и 3) совместно по оптическим и радарным данным. Для первого случая применена работа (Burapapol et al., 2016), где для оценки влажности почвы используется индекс NDDI (normalized difference drought index): $NDDI = \frac{NDVI-NDWI}{NDVI+NDWI}$, где $NDWI = \frac{B8A-B12}{B8A+B12}$ - (normalized difference wet index), B8A, B12 – спектральные каналы S2. Авторами показано, что бóльшие значения NDDI соответствуют меньшим значениям влажности почвы. График NDDI для исследуемых площадок с черноземами (площадки №1, №2, №3 (целина)) и серыми лесными почвами (№4, №5, №6 (лес)) показан на рисунке 3 (слева) для сеансов за апрель (20, 27, 30) и май (10, 12, 17) 2020 года. Выявилась сильная дифференциация значений NDDI для разных площадок для сеанса 20.4.2020 и группировка тестовых участков по близким значениям влажности почвы. Самой большой влажностью обладает почва площадки №6 (лес). Самой малой влажностью отличаются площадки №4, №5 (серые лесные почвы, пашня) и №3 (черноземы, целина). Между этими крайними значениями группируются площадки №1 и №2 (черноземы несмытые и смытые, пашня). При переходе от апреля к маю дифференциация площадок по значениям NDDI значительно уменьшается, приводя к близости значений для всех тестовых площадок.

Для количественной оценки влажности почвы по радарным данным в настоящее время есть много эмпирических и полуэмпирических моделей, применимость которых имеет ограничения на шероховатость поверхности, угол обзора и значение объемной влажности почвы до 35%. Наиболее известной является модель Dubois (Dubois et al., 1995). В работе (Baghdadi et al., 2016) предложена полу-эмпирическая модель на базе модели Dubois, дающая более точную оценку влажности почвы, но при тех же ограничениях на применимость.



(а) (б)

Рис. 2. Изменение значений индекса глины CI за год (а) и количественная оценка изменений значений процентного содержания глины в почвах тестовых площадок (б)

На основе совместного использования радарных данных Sentinel 1 и оптических данных Landsat 8 OLI и модели водяного облака (water cloud model) авторами (Bao et al., 2018) предложен новый метод восстановления поверхностной влажности почвы SSM (surface soil moisture) в условиях частичной растительности с высокой точностью (коэффициент корреляции R=0.911, СКО=0.053 см^3/см^3 между измеренной и полученной по модели SSM). Формула для определения объемной влажности почвы SSM в слое 0-5 см такова:

$$SSM = 0.539 + 0.044\sigma_{VV}^0 + \sigma_{VV}^0 sec\theta(-0.008 + 0.016NDWI + 0.031NDWI^2) + NDWI(0.444 + 2.964NDWI + 11.15NDWI^2 - 33.75NDWI^3)$$

где SSM измеряется в см^3/см^3, σ_{VV}^0 в дБ. Следует отметить (Bao et al., 2018), что данная модель игнорирует влияние шероховатости поверхности и типа растительности.

Для вычисления SSM использовались радарные данные за 23 апреля и 5 мая 2020 года, а оптические, соответственно, за 22 апреля и 10 мая 2020 года. На рисунке 3 (справа) показаны графики изменения SSM (см^3/см^3) для двух соседних дат радарной съемки 23 апреля и 5 мая 2020 года.

Полученные оценки влажности верхнего слоя почвы как качественные по оптическим данным (рис. 3 (слева)), так и количественные по радарным данным (не показаны из-за ограничения объема статьи) и при совместном использовании радарных и оптических данных (рис. 3 (справа)), показали их непротиворечивость, общие тренды и возможность дистанционно сравнить степень влажности верхнего слоя почвы для разных тестовых участков при отсутствии наземных измерений.

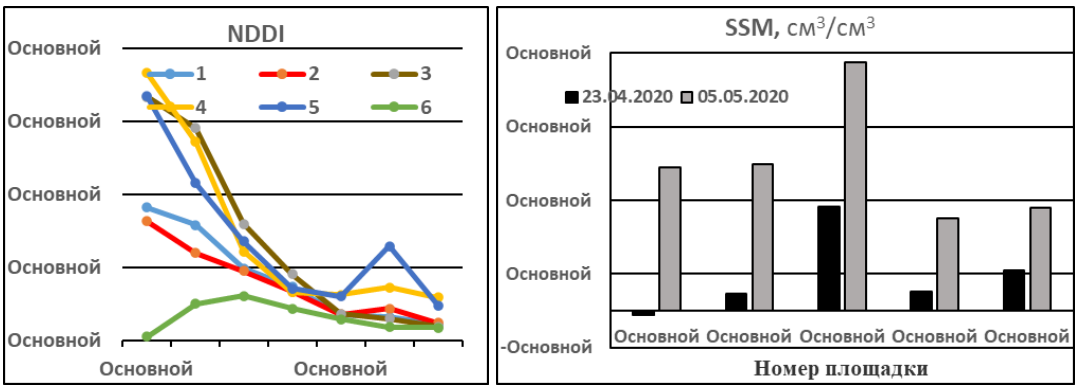


Рис. 3. Графики NDDI для исследуемых площадок за апрель, май 2020 года и графики изменения SSM (см^3/см^3) для соседних дат радарной съемки 23.4.20 и 5.5.20

Выводы

В работе сделана оценка процентного содержания глины и влажности верхнего слоя почвы шести тестовых участков Новосибирской области. Показаны вариации процентного содержания глины за год. Сделана оценка влажности верхнего слоя почвы тестовых участков на основе радарных и оптических данных, а также на основе их совместного использования.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме 0030-2019-0008 “Космос”, и в рамках государственного задания ИПА СО РАН.

Список литературы / References

1. Baghdadi N., Choker M., Zribi M., El Hajj M., Paloscia S., Verhoest N. E. C., Lievens H., Baup F. and Mattia F. A New Empirical Model for Radar Scattering from Bare Soil Surfaces//Remote Sens. 2016. Vol. 8. 920. P. 1-14. DOI: 10.3390/rs8110920.
2. Bao Y., Lin L., Wu Sh., Deng Kh. A. K., Petropoulos G. P. Surface soil moisture retrievals over partially vegetated areas from the synergy of Sentinel-1 and Landsat 8 data using a modified water-cloud model// Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation. 2018. Vol. 72. P. 76-85.
3. Burapapol K., Nagasawa R. Mapping Soil Moisture as an Indicator of Wildfire Risk Using Landsat 8 Images in Sri Lanna National Park, Northern Thailand//Journal of Agricultural Science. 2016. Vol. 8. No. 10. P. 107-119. ISSN 1916-9752 E-ISSN 1916-9760.
4. Castaldi F., Chabrillat S., Don A., van Wesemael B. Soil Organic Carbon Mapping Using LUCAS Topsoil Database and Sentinel-2 Data: An Approach to Reduce Soil Moisture and Crop Residue Effects// Remote Sensing. 2019. Vol.11. 18. P. 1-15. DOI: http://doi.org/10.3390/rs11182121
5. Demattêa, J.A.M., Fongaroa C. T., Rizzob R., Safanellia J. L. // Remote Sensing of Environment. 2018. 212. P. 161–175.
6. Dubois P. C., Van Zyl J., Engman T. Measuring soil moisture with imaging radars// IEEE Trans. GRS. 1995. Vol. 33. P. 915-926.
7. Hengl T. A Practical Guide to Geostatistical Mapping of Environmental Variables. 2007. EUR (Luxembourg). EUR. Scientific and technical research series (Vol. 22904). Publications Office. 2007. 143 p. ISBN 9279069047.

ASSESSMENT OF TEXTURE AND HUMIDITY CONTENT IN THE UPPER SOIL LAYER FROM RADAR AND OPTICAL DATA OF SENTINEL 1, 2 SATELLITES IN CONDITIONS OF THE NOVOSIBIRSK REGION

N. V. RODIONOVA[1], S. YA. KUDRYASHOVA[2], A. S. CHUMBAEV[2]
[1]*Institute of Radioengineering and Electronics, Fryazino, Russia, rnv@ire.rssi.ru;*
[2]*Institute of Soil Science and Agrochemistry, Novosibirsk, Russia, sya55@mail.ru;*
[2]*Institute of Soil Science and Agrochemistry, Novosibirsk, Russia, chas30@mail.ru*

Abstract. The paper considers the use of radar and optical data from the Sentinel 1 and Sentinel 2 satellites for 2019-2020 to estimate the percentage of clay and moisture in the upper layer of the soil on the example of chernozem and gray forest soils of the Novosibirsk region.

Keywords. C-band radar data, backscattering coefficient, multispectral optical data, reflection coefficient, soil clay content, soil moisture.

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ IoT СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ГИДРОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОЧВЫ И ЛОКАЛЬНЫХ МЕТЕОУСЛОВИЙ

Ю. И. БЛОХИН, А. В. БЕЛОВ, С. Ю. БЛОХИНА, А. В. ДВИРНИК
ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт» (ФГБНУ АФИ), Санкт-Петербург, blohin3k4@gmail.com

Аннотация. Мониторинг влажности почвы и её пространственно-временной динамики на большой площади по-прежнему остаётся сложной задачей. В настоящее время спутниковые методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) являются достаточно эффективным средством для крупномасштабного определения и мониторинга поверхностных характеристик почв с приемлемым временным и пространственным разрешением. Для калибровки и проверки достоверности полученных спутниковых данных о характеристиках почвы необходимы измерения *in situ* с помощью наземных информационно-измерительных систем. Системы на основе технологий интернета вещей (Internet of Things, IoT), и, в частности, беспроводных сенсорных систем, позволяют проводить оперативный сбор широкого набора разнородных данных о состоянии почв, посевов и метеоусловий. В последние годы предпринимаются значительные усилия по модернизации программно-аппаратных средств для расширения возможностей измерения и мониторинга влажности и температуры почвы различными IoT системами. Для оперативного мониторинга локальных метеоусловий, влажности и температуры почвы разработана аппаратная и программная архитектура IoT системы для измерения и стабильной передачи данных с различных типов датчиков и сенсорных узлов.

Ключевые слова. Интернет вещей, беспроводные сенсорные сети, оперативный сбор данных, температура почвы, влажность почвы, мониторинг метеоусловий.

Введение

Быстрое развитие технологий интернета вещей, наблюдаемое в последние годы, позитивно влияет на расширение возможностей оперативного сбора данных в интеллектуальном сельском хозяйстве [1, 2]. Переход от приблизительных оценок и предположений на основе нерегулярных полевых обследований к точным измерениям и математическим моделям на основе IoT-мониторинга способствует принятию рациональных решений, что в свою очередь приводит к повышению производительности и сокращению затрат, уменьшает вред для окружающей среды.

Технологии IoT открывают возможности для создания базовой инфраструктуры для подключения различных интеллектуальных объектов – датчиков в составе БСС, мобильных систем, БПЛА и сельскохозяйственной техники, а также для локального или удаленного сбора данных, облачного анализа информации и принятия решений, взаимодействия пользователей и автоматизации технологических операций [3].

Объекты и методы исследования

Беспроводные сенсорные сети (БСС), включающие различные сенсоры, применяются для проведения дистанционного мониторинга в составе современных IoT систем для сбора, обработки, временного хранения и передачи в базу данных разнородной информации [4]. БСС активно развиваются, в основном благодаря прогрессу в области микроэлектроники, и становятся одной из научных областей, которая, как ожидается, сыграет важную роль в создании среды интернета вещей, в которой сенсоры интегрированы в различное оборудование и измерительные системы для автоматизации и оптимизации большого количества процессов.

С ростом возможностей IoT систем для точного земледелия увеличивается и количество проблем, требующих решения, поскольку новые технологии все еще находятся в стадии разработки. Основной задачей является разработка специализированной аппаратной и программной архитектуры для IoT систем с учётом конкретных технических требований эксплуатации, которые обусловлены типом измеряемых параметров, быстродействием,

энергоэффективностью, надежностью, а также климатическими условиями и рельефом местности.

При разработке IoT системы учитывались различные факторы, влияющие на размещение и функционирование БСС на экспериментальном опытном полигоне Агрофизического научно-исследовательского института, где проводится комплексный мониторинг пространственной изменчивости агрофизических свойств почв и метеорологической информации, определяющих особенности управления технологиями возделывания сельскохозяйственных культур [5].

Структура БСС: автоматическая шестиканальная метеорологическая станция (IoT АМС), являющаяся координатором сети, и сенсорные узлы. IoT АМС оснащена солнечной батареей и аккумулятором с высокой разрядной характеристикой и эксплуатационной устойчивостью, обеспечивающих полную автономность системы, а также направленной антенной для усиления сигнала мобильного 4G интернета в диапазоне частот 1700–2700 МГц при удалении станции от вышек оператора на 10 км.

Экспериментальный образец сенсорного узла включает: скважинный влагомер почвы (двухканальный для пахотного слоя 0–20 см и/или пятиканальный для слоя 0–100 см), маршрутизатор, микроконтроллер, батарею питания и внешнюю антенну (рис. 1).

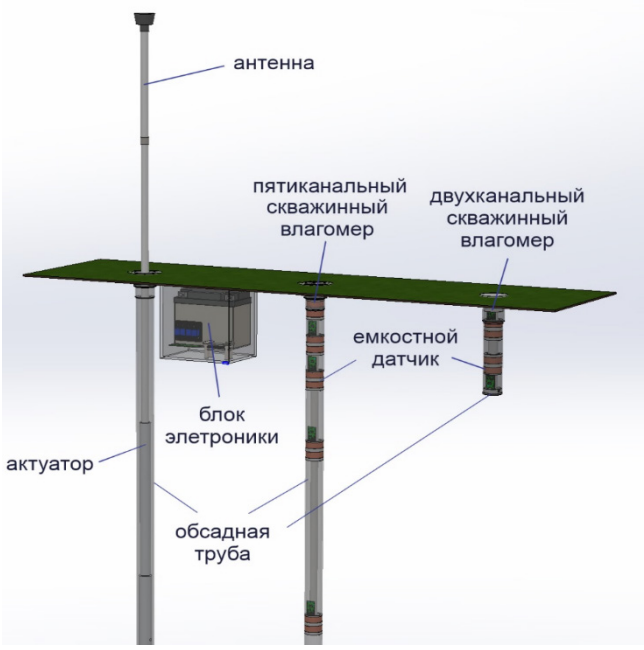


Рис. 1. Сенсорный узел БСС

Использование скважинных влагомеров в составе сенсорных узлов БСС является перспективным решением для мониторинга профиля влажности почвы. Однако для большинства скважинных влагомеров требуется подключение к контроллеру сенсорного узла, находящегося над поверхностью почвы, что, как правило, снижается энергоэффективность системы.

Результаты и обсуждение

Разработана аппаратная архитектура сенсорных узлов для размещения на поле под поверхностью земли в составе БСС для оперативного мониторинга влажности и температуры почвы. Предложенная конфигурация позволяет скрыто устанавливать узел на поле, не опасаясь повреждений от наземной техники и людей [6, 7].

Микроминиатюризация печатной платы емкостных датчиков скважинного влагомера позволила сократить интервал размещения датчиков до 10 см. 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, а также применения полуавтоматизированного метода трассировки плат с учетом обеспечения электромагнитной совместимости электронных компонентов.

Для повышения точности установки и качества при монтаже электронных компонентов на платы для влагомеров и контроллеров БСС использовали специальное технологическое оборудование: автоматический установщик компонентов QiHe TVM802A, трафаретный принтер PUHUI 300x240 и паяльный комплекс Quick 702 ESD, что позволило укомплектовать необходимое для БСС количество емкостных датчиков.

Разработана архитектура программного обеспечения БСС с использованием стандартных и доступных интерфейсов, языков программирования и библиотек компилируемых языков, высокой производительностью, масштабируемостью, простотой поддержки, возможностью расширения и повторного использования модулей. Разработанная архитектура с конкретными свойствами и функциональностью (рис. 2) осуществляет оперативный сбор, обработку и стабильную передачу данных с различных типов датчиков и сенсорных узлов.

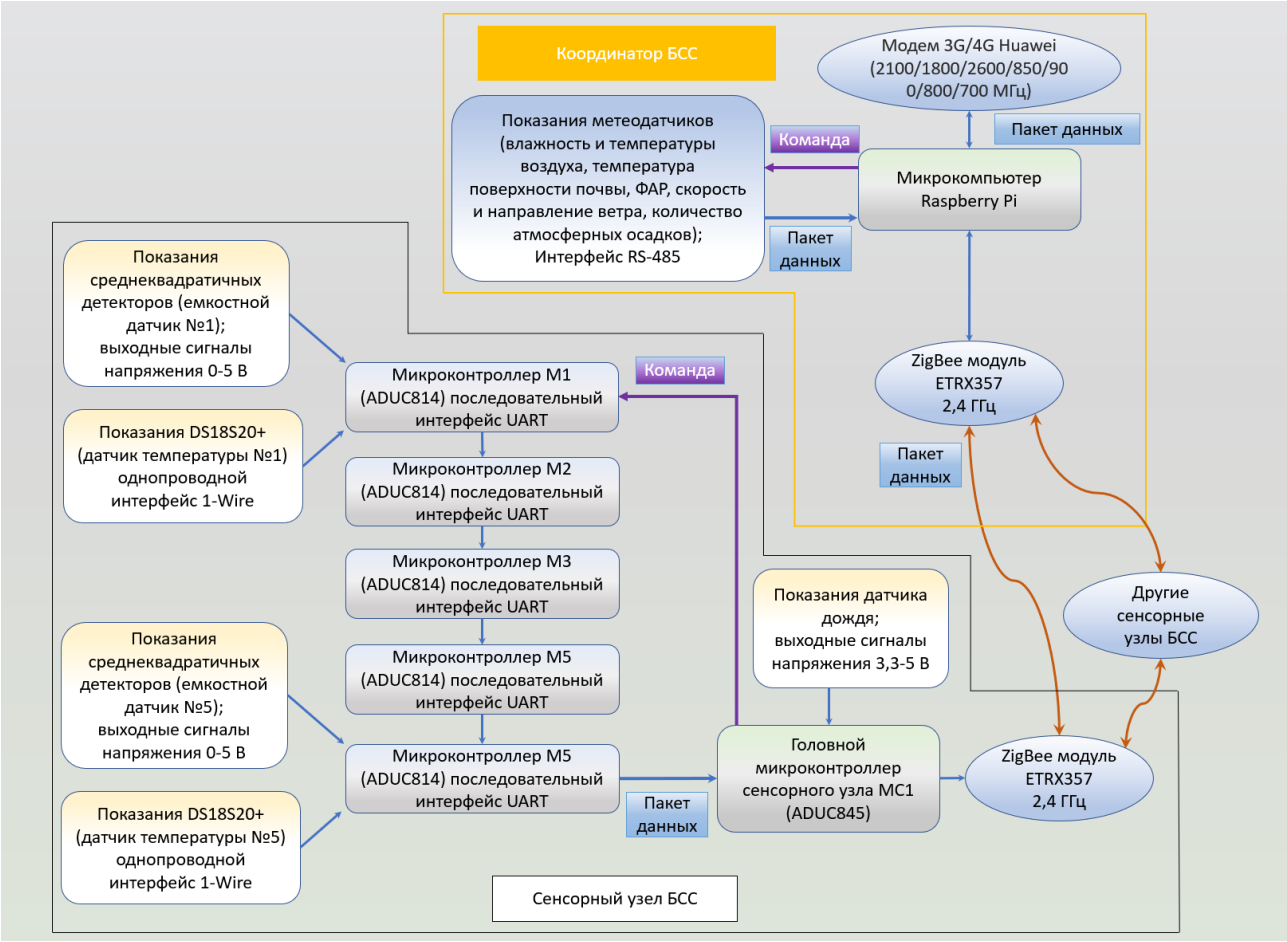


Рис. 2. Архитектура программного обеспечения IoT системы

Функционирование ПО осуществляется в следующей последовательности: головной микроконтроллер MC1 выходит из режима ожидания (сна) с периодичностью в один час, подключает датчики и актуатор антенны сенсорного узла к питанию от аккумулятора с помощью реле, отправляет запрос на микроконтроллер M1 (ADUC814, Analog Devices Inc.) первого канала измерения и ожидает получения пакета данных от M5, производит считывание данных с других датчиков. При получении команды запроса программа в микроконтроллере M1 производит

опрос первого канала скважинного влагомера, выполняется снятие показаний со среднеквадратичных детекторов и температурного датчика скважинного влагомера и передаёт их в виде пакета данных на вход микроконтроллера М2, который выполняет те же операции, добавляя показания второго канала измерений в пакет данных. Данная операция повторяется последовательно для всех микроконтроллеров емкостных датчиков в зависимости от количества каналов скважинного влагомера. Последний микроконтроллер, в данном случае М5, формирует финальный пакет данных для отправки на МС1.

Запись полученных данных производится во внутреннюю память МС1 ADUC485 (62 kB Flash). Полученный пакет данных передается на ZigBee модуль ETRX357HR-LRS-R8 сенсорного узла, на транзитные узлы и далее на координатор сети со скоростью около 200 kbps на расстояние до одного километра, при этом ZigBee модули сенсорных узлов автоматически выбирают наиболее подходящий узел сбора данных, используя информацию о качестве связи. После успешной передачи данных МС1 входит из режима сна. Время работы сенсорного узла, то есть опроса датчиков и передачи данных, составляет 2-3 мин в час, позволяя все оставшееся время оставаться в режиме ожидания и экономить заряд батареи. Использование Polling-механизма ZigBee сети (ожидание подтверждения успешности транзакции пакета данных) привело к снижению времени передачи данных в беспроводной сети.

Выводы

Меры по повышению энергоэффективности БСС привели к снижению среднего энергопотребления сенсорных узлов с 24,4 Вт до 5,2 Вт в час.

Разработанная программная и аппаратная архитектура IoT системы позволяет осуществлять дистанционный сбор данных в полевых условиях с высоким временным разрешением.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российской Федерации (Соглашение с Минобрнауки России № 075-15-2020-805 от 02 октября 2020) и при поддержке гранта РФФИ (проект № 19-29-05184 мк).

Список литературы / References

1. Villa-Henriksen A., Edwards G. T. C., Pesonen L., et al. Internet of Things in arable farming: Implementation, applications, challenges and potential. Biosystems Engineering. 2020. Vol. 191. P. 60–84.

2. Блохина С. Ю., Блохин И. Ю. Интеллектуальное земледелие на основе интернета вещей // Земледелие. 2020. № 7. С. 7–15.

3. Якушев В. П., Якушев В. В., Блохина С. Ю., Блохин Ю. И., Матвеенко Д. А. Информационное обеспечение современных систем земледелия в России // Вестник РАН. 2021. Т. 91. № 8. С. 755–768. DOI: 10.31857/S0869587321080090

4. Ojha T., Misra S., Raghuwanshi N. S. Wireless sensor networks for agriculture: The state-of-the-art in practice and future challenges. Computers and electronics in agriculture. 2015. Vol. 118. P. 66–84.

5. Блохин Ю. И., Белов А. В., Блохина С. Ю. Комплексная система контроля влажности почвы и локальных метеоусловий для интерпретации данных дистанционного зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. № 3. С. 87–95.

6. 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.

7. Yuri Blokhin, Svetlana Blokhina, Anna Dvirnik, Andrei Belov and Andrei Makushin. Information and measuring system for operational monitoring of soil moisture and temperature. International Scientific and Practical Conference “From Inertia to Develop: Research and Innovation Support to Agriculture” (IDSISA 2020). E3S Web Conf. 2020. Vol. 176. P. 04010.

INFORMATION AND MEASURING IOT SYSTEM FOR SOIL MOISTURE, TEMPERATURE AND LOCAL METEOROLOGICAL PARAMETERS MONITORING

YU. I. BLOKHIN, A.V. BELOV, S. YU. BLOKHINA, A. V. DVIRNIK
Agrophysical Research Institute, Saint Petersburg 195220, Russia
E-mails: blohin3k4@gmail.com

Abstract. Monitoring soil moisture is still a challenge: it varies strongly in space and time and at various scales while conventional sensors typically suffer from small spatial support. At present, satellite Earth remote sensing techniques provide an exceedingly powerful means for characterization and monitoring of large-scale near-surface soil properties at reasonable temporal and spatial resolutions. To determine the main properties of soil cover based on remote sensing data at global scale, in situ ground truth measurements based on information and measurement systems are required to calibrate and validate the obtained satellite information. Systems based on Internet of Things (IoT) technologies, and wireless sensor systems in particular, provide the rapid collection of a wide range of heterogeneous data on soil, crop and weather conditions. In recent years, significant efforts have been made to upgrade hardware and software to expand the capabilities of measuring and monitoring soil moisture and temperature by various IoT systems. For operational monitoring of local weather conditions, soil moisture and temperature, a hardware and software architecture of IoT system has been developed to measure and steady data transmission from different types of sensors and sensor nodes.

Keywords. Internet of Things, wireless sensor network, data collection, soil temperature, soil moisture, meteorological parameters monitoring.

ГЕОПРОСТРАНСТВЕННАЯ БАЗА ДАННЫХ В ЗАДАЧАХ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ

Е. П. МИТРОФАНОВ [1,2], О. А. МИТРОФАНОВА [1,2], А. Ф. ПЕТРУШИН [1]
[1] ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт» (ФГБНУ АФИ), Санкт-Петербург, mjeka89@gmail.com;
[2] ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет» (ФГБОУ ВО СПбГУ), Санкт-Петербург, e.mitrofanov@spbu.ru

Аннотация. В последние годы решение задач точного земледелия требует интеллектуального анализа больших объемов исходной информации. Большая часть современных агроэкологических данных имеет геопространственную привязку, кроме того, множество научно-исследовательских проектов реализуется с применение данных дистанционного зондирования. Такой объем разнородной информации требует эффективной систематизации, хранения и обеспечения удобного доступа к любому ее элементу. В Агрофизическом научно-исследовательском институте за годы экспериментальной работы накоплен внушительный архив опытных данных, в том числе и высокоточные мультиспектральные аэрофотоснимки. В связи с этим была разработана геопространственная база данных с использованием открытого и бесплатного программного обеспечения.

Ключевые слова. Геопространственная база данных, аэрофотоснимки, точное земледелие.

Введение

Современные исследования и подходы в области ТЗ основываются на междисциплинарных науках и используют большие объемы разнородных данных с географической привязкой (Karmas, Tzotsos, Karantzalos, 2016; Tian, Lin, Li, 2019). Технологии баз данных успешно зарекомендовали себя в качестве инструментария для внедрения информационных технологий в растениеводство. Прежде всего они позволяют хранить, структурировать и обрабатывать многолетние полевые данные, обеспечивая широкому кругу лиц доступ к информации (Franko et al., 2002; Martin et al., 2000; Radovic-Stojanovic, Zecevic, Kojcin, 2015). Традиционно в сельском хозяйстве они применяются для систематизации различных наземных измерений: характеристик почвы и растений, метеоданных и т.п. (Driemeier et al., 2016; Hanrahan et al., 2017; Munawar et al., 2020).

За годы проведения экспериментальных исследований на базе филиала Агрофизического научно-исследовательского института (АФИ), расположенного в д. Меньково Ленинградской обл., накоплен обширный массив разнородной информации, в том числе и пространственно-атрибутивной (Буре, Канаш, Митрофанова, 2017; Митрофанов, Петрушин, Митрофанова, 2018; Петрушин, Митрофанов, Митрофанова, 2016). Получено большое количество опытных данных, привязанных к полигонам с точными координатами GPS. При этом даже в рамках института эффективный обмен экспериментальной информацией для проведения исследований между научными группами не организован. В связи с чем возникла задача систематизации хранения опытных данных и обеспечения доступа к ним.

Объекты и методы исследования

Для создания геопространственной базы данных была использована свободная объектно-реляционная система управления базами данных PostgreSQL с пространственным расширением PostGIS для реализации стандартизованного типа данных geometry и соответствующих функций, удовлетворяющих спецификациям OGC (открытых ГИС).

Выбор инструментов обоснован возможностью поддержки большого числа ГИС-пакетов, в том числе и свободных, например, QuantumGIS, uDIG, 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).

Помимо традиционной экспериментальной информации (агрохимия, метеоданные и т.п.) с привязкой к координатам предложенная база данных должна содержать и аэрофотоснимки сельскохозяйственных полей биополигона АФИ. Аэрофотосъемка проводится с 2003 года с применением беспилотного летательного аппарата самолетного типа собственной разработки, а с 2015 для этих целей используется беспилотная авиационная система Геоскан-401, позволяющая получать мультиспектральные изображения высокого качества.

Результаты и обсуждение

На рисунке представлена общая схема разработанной геопространственной базы данных. Представленная база содержит информацию об экспериментальных данных, на основе которых можно выделить несколько тематических разделов. В базе реализуется 7 таблиц:

- Orto_photo – содержит предобработанные аэрофотоснимки, разбитые на отдельные каналы (спектры).
- Crop rotation – список проводимых мероприятий на полигоне в одном сезоне.
- number_pole– список местной интерпретации полигона.
- meteo_data – метеоданные, получаемые на ближайшей метеостанции.
- weather guide – справочник погодных явлений.
- Agrochemistry– агрохимические показатели.
- directory_agrochemistry– справочник агрохимических показателей.

На данном этапе осуществляется наполнение базы, сейчас она содержит более элементов. Отработаны простые и сложные запросы для обеспечения удобного поиска и доступа к необходимой информации. Ведется работа над разработкой графического интерфейса для дальнейшего внедрения и пользовательской работы с базой.

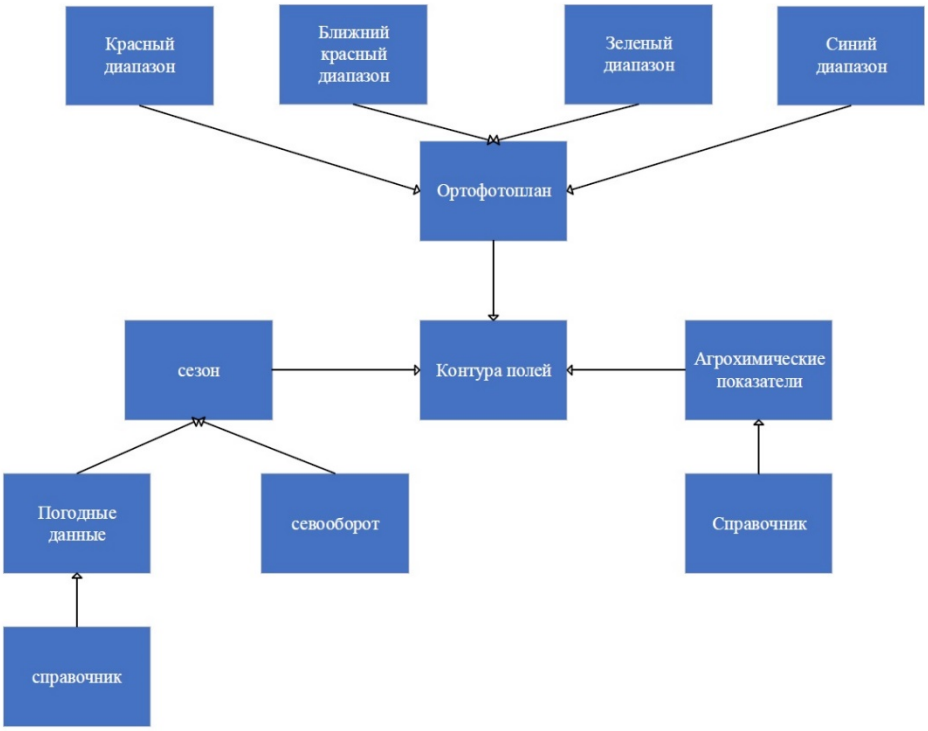


Рис. Общая схема геопространственной базы данных

Выводы

Решение поставленной задачи позволило эффективно систематизировать, хранить и обеспечить доступ к разнородной геопространственной экспериментальной информации. В дальнейшем эта

разработка войдет в основу разрабатываемого веб-сервиса, позволяющего в удобной форме исследователям обмениваться информацией и хранить опытные данные.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 19-29-05184 мк).

Список литературы / References

1. Буре В. М., Канаш Е. В., Митрофанова О. А. Анализ характеристик цвета растений по аэрофотоснимкам с различными факторами качественных показателей // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления, 2017. Т. 13, № 3. С. 278-285
2. Митрофанов Е. П., Петрушин А. Ф., Митрофанова О. А. Использование данных аэрофотосъемки для обоснования прецизионных агроприемов применения агрохимикатов // Применение средств дистанционного зондирования Земли в сельском хозяйстве, 2018. С. 212-217.
3. Петрушин А. Ф., Митрофанов Е. П., Митрофанова О. А. Цифровая модель рельефа местности для мониторинга мелиоративных сооружений // Агроэкосистемы в естественных и регулируемых условиях: от теоретической модели к практике прецизионного управления. Материалы Всероссийской научной конференции (с международным участием), 2016. С. 447-451.
4. Driemeier C., Ling L. Y., Sanches G. M., Pontes A. O., Graziano Magalhaes P. S., Ferreira J. E. A computational environment to support research in sugarcane agriculture // Computers and Electronics in Agriculture, 2016, vol. 130, pp. 13-19. https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.10.002
5. Franko U., Schramm G., Rodionova V., Korschens M., Smith P., Coleman K., Romanenkov V., Shevtsova L. EuroSOMNET – a database for long-term experiments on soil organic matter in Europe // Computers and Electronics in Agriculture, 2002, vol. 33, issue 3, pp. 233-239, https://doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00009-1
6. Hanrahan L., Geoghegan A., O'Donovan M., Griffith V., Ruelle E., Wallace M., Shalloo L. PastureBase Ireland: A grassland decision support system and national database // Computers and Electronics in Agriculture, 2017, vol. 136, pp. 193-201. https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.01.029
7. Karmas A., Tzotsos A., Karantzalos K. (2016) Geospatial Big Data for Environmental and Agricultural Applications. In: Yu S., Guo S. (eds) Big Data Concepts, Theories, and Applications. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-27763-9_10
8. Martin F., Baggett T., Wolfe T., Mita R. Using sampling theory to build a more universal forest vegetation database // Computers and Electronics in Agriculture, 2000, vol. 28, issue 2, pp. 119-132, https://doi.org/10.1016/S0168-1699(00)00122-8
9. Munawar A. A., Yunus Y., Devianti, Satriyo P. Calibration model's database of near infrared spectroscopy to predict agricultural soil fertility properties // Data in Brief, 2020, vol. 30, 105469. https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.105469
10. Radovic-Stojanovic J., Zecevic A., Kojcin Z. Series of agriculture in the statistical office of the Republic of Serbia database // Economics of Agriculture, 2015, vol. 62, issue 3, pp. 831-848, DOI: 10.5937/ekoPolj1503831S.
11. Tian S., Lin L., Li Y. Modeling of big data database based on agricultural basic geographic information // 2019 Chinese Automation Congress (CAC), 2019, pp. 1448–1451, DOI: 10.1109/CAC48633.2019.8996592

GEOSPATIAL DATABASE FOR PRECISION AGRICULTURE PROBLEMS

E. P. MITROFANOV [1,2], O. A. MITROFANOVA [1,2], A. F. PETRUSHIN [1]
[1] *Agrophysical Research Institute, St. Petersburg, Russia, mleka89@gmail.com;*
[2] *Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia, e.mitrofanov@spbu.ru*

Abstract. In recent years, solving the problems of precision farming requires the intellectual analysis of large volumes of initial information. Much of today's agroecological data is geospatially referenced, and many research projects are being implemented using remote sensing data. Such a volume of heterogeneous information requires efficient systematization, storage and easy access to any of its elements. Over the years of experimental work, the Agrophysical Research Institute has accumulated an impressive archive of experimental data, including high-precision multispectral aerial photographs. In this regard, a geospatial database was developed using open source and free software.

Keywords. Geospatial database, aerial imagery, precision agriculture.

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТИ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ ЗАТРАЧЕННОЙ НА СУММАРНОЕ ИСПАРЕНИЕ РАСТИТЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ С КОМПЛЕКСНЫМ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ДЗЗ И МЕТЕОСТАНЦИЙ.

Л. В. КОЗЫРЕВА, А. В. ДОБРОХОТОВ
ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт» (ФГБНУ АФИ), Санкт-Петербург, 4ludak@gmail.com

Аннотация. Скрытый поток тепла играет важную роль в процессах энергетического взаимодействия в системе почва-растение-приземный слой воздуха и определяется как остаточный член энергетического баланса. В данной работе использован алгоритм расчета скрытого потока тепла с учетом стратификации приземного слоя атмосферы, позволяющего проводить непрерывный мониторинг испарения с выбранным временным шагом. Алгоритм метода основан на уравнении энергетического баланса с параметризацией скрытого и явного потоков тепла. Входными данными алгоритма являются температура и влажность воздуха, скорость ветра, атмосферное давление, температура растительного покрова и радиационный баланс, а также высота растительности и проективное покрытие, или индекс листовой поверхности Модель SEBAL позволяет оценить пространственное распределение скрытого потока тепла по данным дистанционного зондирования Земли в момент пролета спутник. Метод определения части солнечной энергии затраченной на суммарное испарение посевов основан на точном расчете всех составляющих энергетического баланса: радиационного баланса, потока тепла в почву, явного потока тепла. Построены карты части энергии, затраченной на испарение и пространственного распределения суммарного испарения с подстилающей поверхности. Приведена регрессионная зависимость части солнечной энергии затраченной на суммарное испарение растительной поверхности

Ключевые слова. Скрытый поток тепла, часть энергии затраченной на испарение, алгоритмы, информационная база данных, данные ДЗЗ, тематические карты, регрессионная зависимость.

Введение

Между земной поверхностью и атмосферой постоянно происходит обмен энергией, движением и водой через турбулентные потоки тепла (H) и скрытые потоки тепла (LE). LE можно определить как поток тепла от поверхности Земли в атмосферу, который включает испарение влаги с поверхности. Скрытый поток тепла является важным механизмом энерго- и массообмена между гидросферой, биосферой и атмосферой. Совместно с осадками и поверхностным стоком, LE контролирует доступность и распределение воды на поверхности земли, является связующим звеном между энергетическим и водным балансами поверхности.

При моделировании энергетического баланса используются отношения потоков: показатель как доля энергии, затрачиваемая на испарение (EF) и остальная доля энергии, не идущая на испарение (NEF) [Sugita, M., 1991]. К этим комплексным показателям был проявлен особый интерес, потому что они связаны с доступной энергией, которая является основным фактором, управляющим потоками LE и H.

Объекты и методы исследования

Отношения EF и NEF выражены следующими зависимостями [Shuttleworth, 1989]:

$$\mathrm{EF} = \frac{\lambda \mathrm{ET}}{\mathrm{Rn\text{-}H\text{-}G}}, \qquad (1)$$

Rn – радиационный баланс, H – явный поток тепла, G – поток тепла в почву

$$NEF = 1 - EF\ . \qquad (2)$$

EF изменяется в пределах от 0,0 до 1,0, равная нулю, означает, что поверхность очень сухая и эвапотранспирация не происходит. С другой стороны, EF, равное 1,0 означает, что поверхность очень влажная и имеет место максимально возможная эвапотранспирация. EF является, своего рода, индикатором того, сколько доступной энергии тратится на эвапотранспирацию, другими

словами, на транспирацию с растительности и испарение с почвы. Понятно, что пока в наличии имеется доступная влага, энергия будет затрачиваться на испарение, в то время как, когда влаги не остается, доступная энергия будет направлена на процесс турбулентного теплообмена H, и EF будет приближаться к 0. В общем и целом, когда влажность поверхности почвы высока, EF имеет тенденцию к росту, пока поток LE является наиболее существенным путем для диссипации тепла, в то время как сухая почва способствует ограничению LE, следовательно, EF увеличивается. Отсюда понятно, почему EF связан с некоторыми измерениями состояния насыщения почвы, и таким образом имеет потенциал, который, согласно многим исследователям, используется в качестве индикатора засухи [Shuttleworth, W. J., 1989].

Проведено исследование зависимости части солнечной энергии, используемой на испарение (evaporative fraction (EF)), с сельскохозяйственных полей с различными сельскохозяйственными культурами от объемной влажности почвы в слое 0- 10 см. Данные для расчета получены с помощью автоматизированного мобильного полевого агрометеорологического комплекса (АМПАК). Объемная влажность почвы измерена с помощью диэлектрического датчика влажности 10HS (фирмы Decagon Devices, Inc., USA) в слое 0÷10 см. Реальная эвапотранспирация (ET_r) определяется как остаточный член уравнения теплового баланса:

$$\lambda ET_r = Rn - H - G\,. \qquad (3)$$

Энергия, затраченная на испарение (EF), определяется по формуле (1), с использованием алгоритмов (рис. 1) и выполняемых по специально разработанным компьютерным программам [Козырева, Доброхотов и др., 2015].

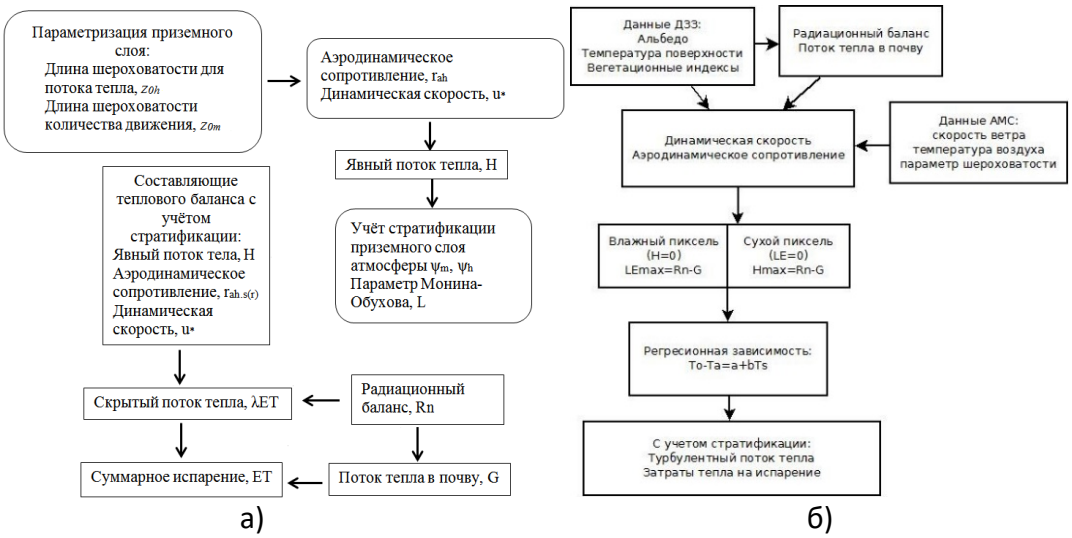


Рис. 1. Блок-схемы расчетов
а) суммарного испарения с параметризацией сельскохозяйственного поля;
б) пространственного распределения скрытого потока тепла модель SEBAL

Пространственное распределение составляющих энергетического баланса на сельскохозяйственном поле, возможно, получить математическим описанием процессов, происходящих на конкретной подстилающей поверхности и данных с космического снимка, необходимых для комплексного расчета наземных и спутниковых данных на каждом пикселе искомых величин (рис. 1). В энергобалансовой модели (SEBAL) используются входные данные, полученные со снимка спутника: отражательная способность в оптических каналах и яркостная температура, а также наземные: скорость ветра, температура воздуха, влажность воздуха. Изображение спутникового снимка показывает мгновенные значения во время пролета спутника, т.е. в модели определяется мгновенное пространственное распределение всех

составляющих энергетического баланса. Основная составляющая – эвапотранспирация (ET) определяется для каждого пикселя методом остаточного члена в уравнении энергетического баланса [Allen, et.al.,2007, Akylas et., al.,2005]

Данные для вычислений составляющих энергетического баланса и части энергии затраченной на испарение на сельскохозяйственных полях были выбраны из информационной базы данных автоматизированного мобильного полевого агрометеорологического комплекса для модельных расчетов энерго- и массообмена на сельскохозяйственном поле [Козырева, Ефимов и др, 2016] База данных содержит хранилища данных, таблиц, содержащих экспериментальные данные и параметры эксперимента, такие как место проведения эксперимента, параметры эксперимента и заметки об условиях проведения эксперимента. Таблицы объединены программным интерфейсом для доступа к информационной базе данных (системой запросов SQL) – оформленным в виде пакета классов на языке Python, который предоставляет функциональность для манипуляции данными. База данных предназначена для валидации и верификации моделей энерго- и массообмена на сельскохозяйственном поле. Может использоваться для изучения составляющих теплового и водного балансов для мониторинга микроклимата сельскохозяйственных полей, для выявления опасных метеорологических явлений. Может служить источником наземной информации при анализе данных дистанционного зондирования Земли. База данных представляет совокупность метеорологических, актинометрических и почвенных измерений автоматизированным мобильным полевым агрометеорологическим комплексом, данных о месте проведения измерений, о расположении датчиков измерительного комплекса и др.

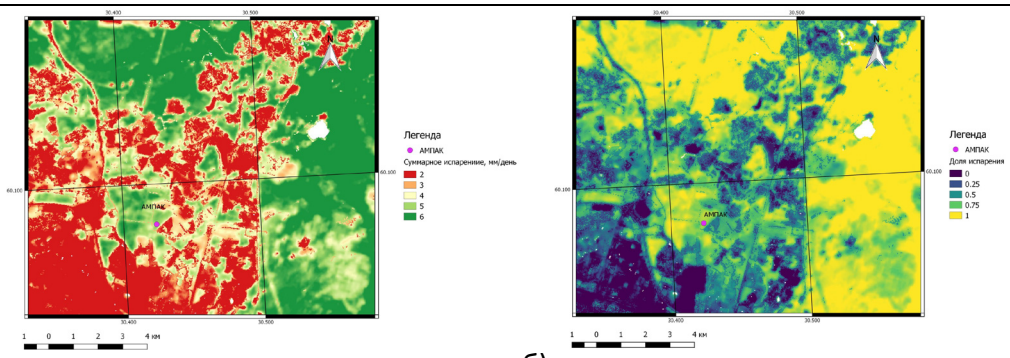
Результаты и обсуждение

Полевые эксперименты проведены в 2016 году в безоблачные дни 5, 15, 31 мая. синхронно с пролетом спутника LANDSAT 8 в географической координате (60°5'9" с. ш., 30°25'34" с. ш.), ООО «Бугры». Температура и влажность воздуха, атмосферное давление, скорость ветрового потока, радиометрическая температура и радиационный баланс растительной поверхности были измерены автоматизированным мобильным полевым агрометеорологическим комплексом АМПАК с временным интервалом 90 секунд. Результаты расчетов по наземным данным и по данным дистанционного зондирования представлены в таблице.

Показана возможность комплексного использования данных АМПАКа и данных дистанционного зондирования. Построены электронные тематические карты

Таблица. Сравнение наземных значений с результатами дистанционного зондирования

Дата эксперимента	06.05.2016		15.05.2015		31.05.2015	
Тип данных	АМПАК	ДЗЗ	АМПАК	ДЗЗ	АМПАК	ДЗЗ
Температура поверхности, С°	23,5	23,6	22,5	20,2	21,1	21
Аэродинамическое сопротивление с/м	88,8	90,3	84,4	93,9	28,1	25,1
	48	47,3	36,4	21,6	-34,5	58
Скрытый поток тепла, Вт/м^2	324,7	311,2	375	351,5	378	342
Часть энергии, затраченная на испарение	0,87	0,87	0,91	0,94	1,1	0,86
Суммарное испарение за час, мм/час	0,47	0,45	0,55	0,51	0,55	0,49
Суммарное испарение за день, мм/день	4,37	4,22	5,3	4,92	5,71	5,01
Суммарное испарение за день, мм/день	4,37	4,22	5,3	4,92	5,71	5,01



а) б)

Рис. 3. Тематические карты поля с многотравьем в Ленинградской области, поселение Бугры
а) суммарное испарение б) часть энергии затраченной на испарение

Получена регрессионная зависимость объемной влажности почв в зоне корней растений в слое (0-10 см) от части солнечной энергии, затраченной на испарение с растительной поверхности сельскохозяйственного поля с использованием данного метода вычисления части энергии, затраченной на испарение и информационную базу данных автоматизированного мобильного полевого агрометеорологического комплекса. На рисунке 4 представлена зависимость объемной влажности почвы от комплексного показателя окружающей среды.

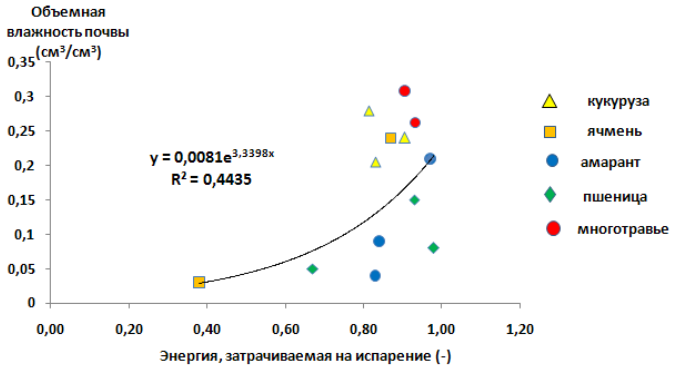


Рис. 4. Зависимость энергии, идущей на испарение (EF), от объемной влажности почвы

Выводы

Для автоматизации мониторинга пространственного распределения составляющих энергетического баланса на сельскохозяйственном поле и связи с влажностью почв в зоне корней был разработан программный интерфейс, использующий комплексно инструменты ГИС GRASS с языком программирования Python, а также алгоритмы расчета энергетических и радиационных характеристик подстилающей поверхности.

Список литературы

1. Sugita M., Brutsaert W. Daily evaporation over a region from lower boundary layer profiles measured with radiosondes //Water Resources Research. 1991. Т. 27. №. 5. С. 747-752
2. Shuttleworth W. J. et al. FIFE: the variation in energy partition at surface flux sites //IAHS Publ. 1989. Т. 186. № 6.
3. Козырева Л.В., Доброхотов А.В., Ситдикова Ю.Р., Ефимов А.Е. Методика оценки составляющих водного и теплового балансов в системе «почва – растение - приземный слой воздуха» с учетом стратификации приземного слоя, неоднородности подстилающей поверхности с использованием данных дистанционного зондирования Земли и наземной калибровки

автоматизированным мобильным полевым агрометеорологическим комплексом (АМПАК). СПб: АФИ, 2015. 48 с.
4. Allen R.G., Tasumi M., Trezza R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (metric) –model. J. of irrigation and drainage engineering, 2007, july/august, pp. 380-393.
5. Akylas E., Tombrou M. Interpolation between Businger-Dyer formulat and free convection forms: a revised approach. Boundary - Layer Meteorology, 2005, vol. 115, pp. 381-398.
6. Козырева Л.В., Ефимов А.Е., Доброхотов А.В., Максенкова И.Л., Бартенев Д.Л. Свидетельство о регистрации базы данных RU 2017620487, 02.05.2017. Заявка № 2016621605 от 05.12.2016.

L. V. KOZYREVA, A. V. DOBROKHOTOV
FSBSI «Agrophysical Research Institute» (FSBSI AFI),
St. Petersburg, 4ludak@gmail.com

Annotation. Latent heat flux plays an important role in the processes of energy interaction in the soil-plant-ground air layer system and is defined as the residual member of the energy balance. In this work, an algorithm for calculating the latent heat flux is used, taking into account the stratification of the surface layer of the atmosphere, which allows continuous monitoring of evaporation with a selected time step. The algorithm of the method is based on the energy balance equation with parameterization of latent and explicit heat fluxes. The input data of the algorithm are air temperature and humidity, wind speed, atmospheric pressure, vegetation temperature and radiation balance, as well as vegetation height and projective cover, or leaf surface index. The SEBAL model makes it possible to estimate the spatial distribution of the latent heat flux from the Earth remote sensing data at the time of the satellite flyby. The method for determining the part of solar energy spent on the total evaporation of crops is based on an accurate calculation of all components of the energy balance: radiation balance, heat flux into the soil, apparent heat flux. Maps of the part of the energy spent on evaporation and the spatial distribution of total evaporation from the underlying surface have been constructed. The regression dependence of the part of the solar energy spent on the total evaporation of the plant surface is given.

Keywords. Latent heat flux, part of the energy spent on evaporation, algorithms, information database, remote sensing data, thematic maps, regression dependence.

УДК 330.15:631.6

ЗЕЛЕНАЯ ЭКОНОМИКА – ПЛАТФОРМА ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИРОДОСБЕРЕГАЮЩИХ И МОНИТОРИНГОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ЕАЭС

В. В. МЕЛИХОВ[1], Л. Н. МЕДВЕДЕВА[1], А. Л. ФЕДОРОВ[2]
[1]ФГБНУ Всероссийский научно-исследовательский институт орошаемого земледелия, ул. Тимирязева, 9, Волгоград, 400002. E-mail: vniioz@yandex.ru;
[2]Администрация Котельниковского городского поселения Волгоградской области, ул. Ленина, д. 9, Волгоградская область, Котельниково,.404354 E-mail: kgp.volganet@mail.ru

Аннотация. В статье представлены материалы, раскрывающие перспективы развития зеленой экономики в Евразийском экономическом Союзе (ЕАЭС), применения природосберегающих и мониторинговых технологий в сельском хозяйстве и мелиорации. Выдвинута аргументация продвижения модели зеленой экономики, применения технологий, уменьшающих последствия изменения климата, сокращения природных ресурсов, находящихся в пользовании человечества. Обосновано, на основе построения аналитико-информационного модуля с агрометеорологическим, экологическим, водным, почвенным и растительным блоками, регулярное проведение мониторинговых наблюдений за состоянием природных и орошаемых агроландшафтов с целью предотвращения изменения состава почв, растительного и животного мира; водными объектами с последующем обеспечением восстановительных функций и рационального природопользования. Рассмотрены варианты инженерно-технических и экономических решений размещения возобновляемых источников энергии (ВИЭ) на оросительных системах и природных водоемах. Предложена технология оздоровления природных и искусственных водоемов на основе использования *Chlorella vulgaris*, восстановительных функций экобиоценозов. Показана необходимость продвижения зеленых технологий на основе применения механизма государственно-частного партнерства, изменения стимулов привлечения предпринимателей к производству продукции на основе природосберегающих технологий и согласования интересов стран – участниц Евразийского экономического Союза.

Ключевые слова: зеленая экономика, ЕАЭС, сельское хозяйство, мелиорация, мониторинг, альголизация.

Введение

Евразийский экономический союз (ЕАЭС) – это крупный региональный рынок (182,6 млн. человек, или более 3% мирового населения), располагающийся на 15% обитаемой территории, обладающий мощной минерально-сырьевой базой, значительным промышленным и сельскохозяйственным потенциалом. Членами Союза являются республики: Армения, Беларусь, Казахстан, Киргизия, Российская Федерация. К основным факторам, оказывающим влияние на динамизм ЕАЭС, можно отнести: изменение климата, рост численности населения, повышение уровня жизни, увеличение спроса на качественные продукты питания (ЕЭК, 2021). В 2020 году рейтинге Global Food Security Index (GFSI, 2020) по индексу глобальной продовольственной безопасности Россия заняла 24 место, Беларусь –23, Казахстан – 32. Пандемия COVID-19 внесла свои коррективы в экономические процессы, протекающие в ЕАЭС, в частности, было инициировано подписание Соглашения о внедрении электронных навигационных пломб в обеспечении беспрепятственного перемещения товаров между странами ЕАЭС; разработаны программа импортозамещения и применения зеленых инвестиций; инициировано создание цифровой платформы по учету выбросов парниковых газов (ЕЭК, 2021). Развитие зеленой экономики потребует трансформации экономических стимулов, совершенствование моделей участия предпринимателей в международных цепочках добавленной стоимости, изменение привычного уклада жизни людей (Селищева, 2018; Мировой рынок зеленых технологий,2021). Необходимо отметить, что впервые о зеленой экономики заговорили в 90-х годах XX века. В докладе группы специалистов для правительства Соединенного Королевства Великобритании и Северной Ирландии впервые прозвучал термин «зеленая экономика», как вектор развития общества (Pearce, Markandya, Barbier, 1989). В 2009 году в докладе ООН «Глобальный зеленый новый курс» были обозначены цели, задачи и направления внутренней политики государств по

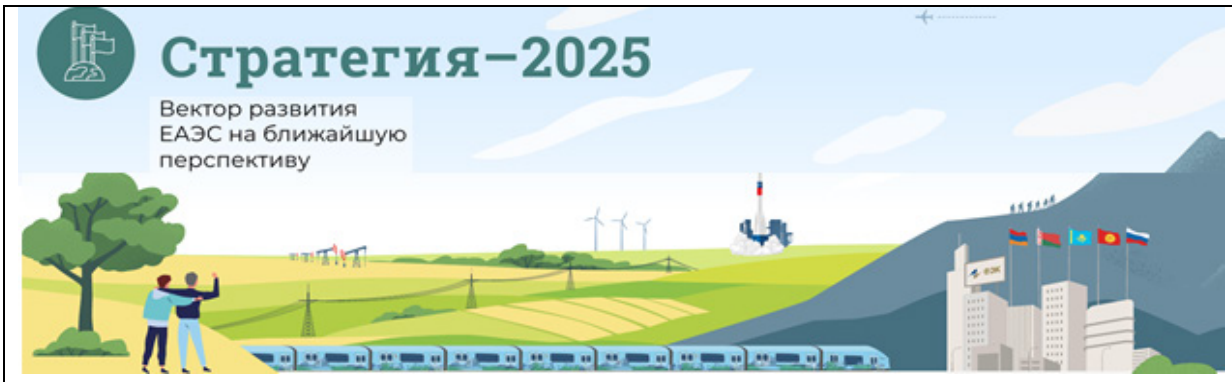
развитию новой модели экономики (United Nations Official, 2018). Зачастую зеленую экономику определяют как инструментарий для достижения устойчивого развития общества, но общего мнения о модели и времени перехода на зеленую экономику у специалистов и ученых – нет (Зеленая экономика, 2021; Эмиров Н.Д., 2019)) (таблица 1).

Таблица 1 – Относительная аргументация о необходимости перехода на модель зеленой экономики

За продвижение модели зеленой экономики	Против продвижения зеленой экономики
Переход к зеленой экономике снижает риски от глобальных угроз: изменение климата, истощение полезных ископаемых, дефицита водных ресурсов. Преодоление глобального экологического кризиса за счет наращивания зеленых инвестиций и внедрение природосберегающих технологий, создание мощностей по производству электроэнергии за счет возобновляемых источников энергии (ВИЭ), рост объемов производства органических продуктов. Предотвращение последствий климатических изменений на планете с помощью зеленых инвестиций	Следствием роста зеленых инвестиций станет рост издержек производства, снижение конкурентоспособности национальных экономик. Усилится вмешательство государств в экономику, увеличится штат чиновников, начнется рост цен на продукты питания, ускорится сокращение рабочих мест в производстве Усилится торможение экономического развития, будут вводиться меры торгового протекционизма, например, установление квот или нормативов использования продукции

Для стран ЕАЭС переход к стандартам зеленой экономики усложняется тем, что основной вклад в экономический рост вносят добывающая и обрабатывающие производства, которые являются основой коричневой экономики (Храмков, 2009). В принятой «Стратегия – 2025» определены основные подходы к развитию зеленой экономики (ЕЭК, 2021; О стратегии экологической безопасности, 2017) (таблица 2).

Таблица 2 – Стратегические направления развития ЕАЭС до 2025года на основе зеленых технологий



Внедрение инноваций и цифровизация экономики	Стимулирование научно - технических исследований	Цифровое администрирование
Кросс-отраслевые цифровые экосистемы (транспорт, труд, промышленность) Цифровые транспортные коридоры, проекты в телемедицине Единый реестр производителей семян Единый портал туризма и образования	Использование инструментов ЕАБР для стимулирования технологий Внедрение моделей циркулярной экономики Стратегическая программа НТП Формирование баз НИОКТР Гибкие механизмы целевого развитию	Устранение барьеров на пути развития конкуренции Развитие трансграничной электронной торговли Сокращение контрафактной продукции Упрощение доступа к услугам

Источник: составлено авторами

Материал и методы

При подготовке статьи использовались аналитические и статистические материалы сайта Евразийского экономического союза – http://www.eaeunion.org/; российские и зарубежные исследования по применению зеленых технологий в сельском хозяйстве и мелиорации. С помощью методов экономико-прогностического и расчётно-конструктивного моделирования рассмотрены перспективы применения зеленых технологий в сельском хозяйстве и мелиорации, сохранении водных ресурсов (Водная стратегия, 2009). В работе использованы результаты многолетних мониторинговых исследований ФГБНУ ВНИИОЗ по оптимизации земледелия на орошаемых агроландшафтах (Мамин В.Ф., Комарова О.П., 2017). В частности, при построении аналитико-информационного модуля использовались данные агрометеорологического, экологического, водного, почвенного и растительного блоков. Из агрометеорологического блока данные контроля температурным режимом воздуха и почвы, количеством осадков; экологического – показатели загрязнения атмосферного воздуха. Доказательная база эффективности использования микроводоросли *Chlorella vulgaris* для оздоровления природных и искусственных водоемов получена из материалов исследования, изложенных в статье «Внедрение природосберегающих технологий - экологический императив в развитии регионов» (Медведева Л.Н., 2019). На основе изучения статистических и аналитических материалов были составлены таблицы, характеризующие развитие сельского хозяйства в ЕАЭС (Сельское хозяйство ЕАЭС, 2019) (таблицы 3, 4).

Таблица 3 – Доля сельского, лесного и рыбного хозяйства в валовой добавленной стоимости экономики, %

Страны	2015год	2017год	2019год
Армения	17,2	15,0	12,0
Беларусь	6,3	7,7	6,8
Казахстан	4,7	4,5	4,5
Кыргызстан	14,1	12,5	12,1
Россия	3,9	3,6	3,4
ЕАЭС	4,2	3,9	3,7

Источник: бюллетень ЕАЭС

На основе принятых программ по развитию мелиорации в странах ЕАЭС разработан прогноз увеличения мелиорированных земель до 2030года

Таблица 4 – Мелиорированные земли в странах ЕАЭС, по годам

Наименование	Мелиорированные земли		
	1991 году	2016 году	2030 году (прогноз)
Россия, млн. га	11,009	9,1	17,5
Беларусь, тыс. га	3423,6	3442,5	3631,5
Казахстан, млн. га	2,3	2,1	2, 14
Армения, тыс. га	286,3	208,1	233,6
Киргизия, тыс. га	836,6	798,9	864,6

Источник: бюллетень ЕАЭС, исследования ФГБНУ ВНИИОЗ

Важными для экономики стран ЕАЭС являются водные ресурсы, среди которых трансграничные реки, вызывающие много споров между пользователями (Wolf A.T., Stahl K, Macomber M.F, 2003; водная стратегия, 2009). Например, Сырдарья, Чу и Талас, протекающие по территории Казахстана и Кыргызстана; Урал, Ишим, Иртыш и Тобол, относящиеся к России и Казахстану; Днепр, Уща, Полота и Синяя, входящие в юрисдикцию Белоруссии и России (таблица 5).

Таблица 5 – Состояние водных ресурсов ЕАЭС, 2019 год

Наименование	Речной сток км^3 /год	Подземный сток км^3 / год	Удельная водообеспеченность, м^3/чел
Россия	4258,6	787	29944
Беларусь	57,9	15,8	5800
Казахстан	26,06	16,4	5041
Кыргызстан	44,1	13,0	8480
Армения	7,7	4,0	2945

Источник: материалы ЕАЭС

В мировой экономике ВИЭ используются достаточно интенсивно и практически достигли паритета цен в сравнении с традиционными источниками энергии. Основные виды ВИЭ по странам ЕАЭС в таблице 6.

Таблица 6 – Основные виды возобновляемых источников энергии ЕАЭС, %

Страны	ГЭС	СЭС	ВЭС	другое	Итого
Армения	1317	2,6	2,85	-	1322,45
Беларусь	95,4	152,4	81,6	50,8	380,2
Казахстан	142	58	100	-	300
Кыргызстан	45,18	-	-	-	45,18
Россия	48000	175	45,9	-	48220,9

Источник: бюллетень ЕАЭС

Результаты исследования и обсуждение результатов

Водные ресурсы являются ключевым фактором устойчивого развития стран ЕАЭС, важным элементом жизнеобеспечения населения. Российская ассоциация водоснабжения и водоотведения совместно с Евразийской Экономической Комиссией ведут исследования по разработке технологической платформы: «Рациональное и эффективное водопользование», имеющей целью создание высококачественного оборудования для водоподготовки и очистки сточных вод, проведения мониторинга за водными и биологическими ресурсами (Данилов-Данильян В.И., 2010). Для АПК переход на ресурсосберегающие технологии означает и переход на органическое земледелие и комплексные мелиорации (Ванеева П.Д., 2019). В странах ЕАЭС площади, занятые под органическое сельскохозяйственное производство, составляют более миллиона га (Сельское хозяйство ЕАЭС, 2019). Стимулом к развитию сельского хозяйства станет дальнейшее развитие мелиорации (Shchedrin V. N., 2018). Мелиорация это сложные, дорогостоящие ресурсо-, энергоемкие мероприятия, направленные на подачу (отвод) воды к сельскохозяйственным землям. Требуют дальнейшего решения вопросы по: укреплению материально-технической базы мелиоводхозов, совершенствованию технологий подачи воды, применению инновационных методов повышения плодородия почв и продуктивности сельскохозяйственных растений, использования механизма государственно-частного партнерства. Проблема повышения устойчивости орошаемых агроландшафтов обостряется с каждым годом, что обусловлено отсутствием действенной системы управления агроландшафтами и контроля за эколого-мелиоративным состоянием. Основой для построения устойчивого состояния почвенного плодородия и сбалансированных взаимоотношений между элементами орошаемых агроландшафтов является познание средообразующих и средотрансформирующих процессов. Такой подход даёт возможность определить тренд процессов, их скоростные характеристики, что позволяет более точно назначать приёмы мелиоративного воздействия (Кирюшин В.И., 2005). Орошаемый массив, типичный для Волго-Донского междуречья, находящийся в составе землепользования ФГБНУ ВНИИОЗ является объектом мониторинга (Мамин В.Ф., Комарова О.П., 2017). Решая задачу определения

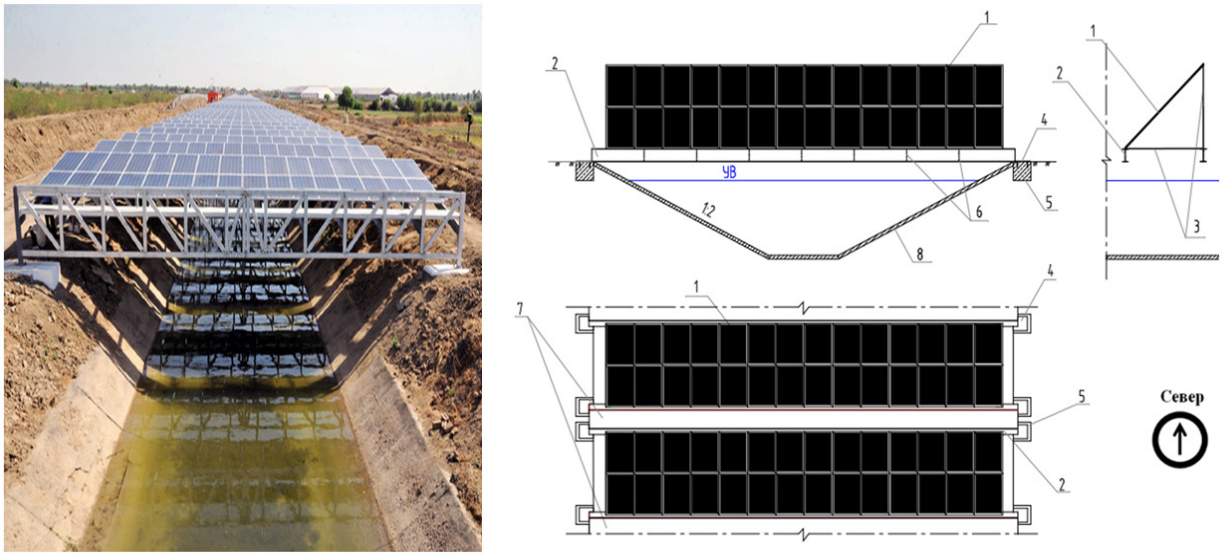
экологически обоснованной водной нагрузки на единицу поливной площади с учётом качества оросительных вод, ученые НИИ проводят постоянный мониторинг и отслеживают процессы, протекающие в светло-каштановых старопахотных почвах. Было замечено, что поступление техногенных загрязнителей в почву при выполнении агротехнологических операций не превышает допустимых концентраций, что не вызывает опасных трансформационных процессов в почве.

Рисунок 1 – Размещение объектов мониторинга ОПХ «Орошаемое», 2018 год
Источник: фото ФГБНУ ВНИИОЗ

Доказано, что продуктивное долголетие почв Волго-Донского междуречья может обеспечиваться оптимизационной технологий возделывания культурных растений при строгой регламентировании уровня техногенной нагрузки. Загрязнение водных ресурсов является одной из важнейших проблем XXI века, а проблема массового «цветения» воды стала весьма актуальной. Учеными ФГБНУ ВНИИОЗ при проведении мониторинга экспериментальных и контрольных заливов Волгоградского водохранилища были обстоятельно изучены гидрохимические и гидробиологические показатели воды, состояние бентоса. Было установлено, что присутствие штамма Chlorella vulgaris ИФР №С-111 в экспериментальных заливах, снижает активность синезеленых водорослей, создает благоприятные условия для формирования кормовой базы (Медведева Л.Н., 2019). Микроводоросли, являясь неотъемлемой частью природных экосистем, представляют собой источник разнообразных ценных и уникальных биоорганических соединений, они богаты белками, витаминами, микроэлементами и биологически активными веществами. Выделяя в окружающую среду активные вещества, они оказывают регуляторное воздействие на другие организмы биоценоза, в частности, сдерживают рост синезеленых водорослей (Шилькрот Г.С.,1975; Медведева Л.Н., 2019). Показано, что перспективный и экологически безопасный метод предотвращения «цветения» воды с помощью вселения штамма Chlorella vulgaris ИФР №С-111, требует адаптации к каждому конкретному водному объекту, находящемуся в постоянном движении и преобразовании под воздействием многочисленных внешних и внутренних факторов (Медведева Л.Н., 2019) (рисунок 2).

Рисунок 2 – Вселение штамма *Chlorella vulgaris* ИФР №С-111 в заливы Волгоградского водохранилища, 2018г од
Источник: фото ФГБНУ ВНИИОЗ

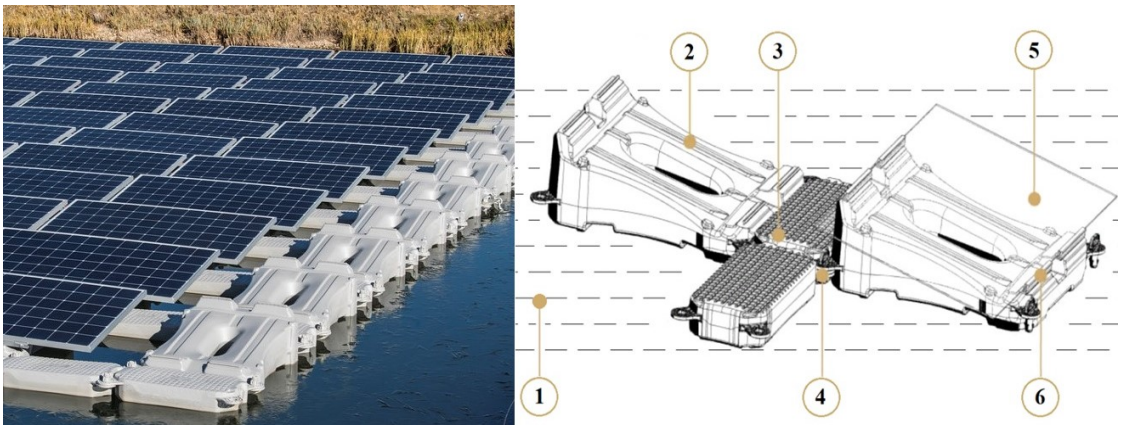
Алгоритм биологической реабилитации водоёмов основан на вселении в водоем штамма Chlorella vulgaris ИФР № С-111, который проявляет хорошо выраженные антагонистические свойства к альгофлоре, бактериям, грибам, дрожжам и инфузориям. В течение суток наступает лизис грибов, дрожжей, синезелёных водорослей, которые погибая, осаждаются на дно. Евразийская экономическая комиссия рассматривает вопросы повышения энергоэффективности агропромышленного комплекса на основе применения ВИЭ (Горбунова О.И., 2019) По итогам 2017 года доля ВИЭ в энергобалансе Армении составляла – 32,5%, в Беларуси – 4%, в Казахстане, Кыргызстане и России – 1,3, 0,1 и 19% (с учетом макси ГЭС) соответственно. В среднем по странам Европейского союза показатель энергоемкости ВВП равняется – 3,7 МДж /долл., то в Киргизии, Казахстане и Беларуси он составляет 8,56; 7,6 и 7,06 МДж /долл. соответственно, а в России – 8,19 МДж /долл. В рамках ЕАЭС имеются значительные возможности для расширения использования ВИЭ энергобалансах, снижения энергоемкости продукции до 35 млрд. долл. США в год (ЕЭК, 2021). Мелиоративный комплекс высокоэнергоемкий, в России ежегодно используется: 276104805 кВт энергии, затрачивается – 6150188 тыс. руб. (в том числе на орошение – 270168649 кВт/ч; на осушение – 5936156 кВт/ч). Использование ВИЭ на объектах мелиорации будет способствовать снижению затрат, повышению рентабельности сельскохозяйственных организаций, привлечению инвестиций, а также решению глобальных вопросов – обеспечению продовольственной и экологической безопасности, снижению выбросов углекислого газа (Макаров, 2020). Первый вариант использования ВИЗ на объектах мелиорации – размещение солнечных панелей на Пригородной оросительной системе Краснодарского края. Общая площадь орошения Пригородной оросительной системы составляет – 23940 га, из них орошается – 5888 га. Годовое потребление электроэнергии головной насосной станции (ГНС) оросительной системы составляет – 5754910 кВт час, затраты на электроэнергию для ГНС – 27313,3 тыс. руб. в год (ФГБУ «Управление Кубаньмелиоводхоз», 2019). На рисунке 3 представлена схема размещения солнечных панелей на магистральном канале Пригородной оросительной системы Краснодарского края (Колбачев, 2018; Белых, 2018).



1 – солнечная панель (направление на юг, угол размещения 45°); 2 – двутавр 35Б1; 3 – крепление панелей (сигма профиль); 4 – закладная деталь МИ1-22; 5 – бетонный фундамент; 6 – поперечное ребро двутавра; 7 – технологический переход (деревянный мостик); 8 – бетонная облицовка канала

Рисунок 3 – Вариант размещения солнечных панелей над оросительным каналом

Расчет ежегодного объема денежных средств, который возникнет при замене стандартного энергоснабжения гибридным (+ ВИЭ) составляет: по стоимости – 0,09 у. е. (1 у. е. = 62 руб., 2019 год). При применении солнечных панелей КСМ-200 (производитель Россия) внутренняя норма доходности (IRR) составила 3,95 %, а при использовании CHN 200W-72M (производитель Китай) – 6,94 %. Расчет себестоимости электроэнергии, произведенной солнечными панелями по методу Levelised Cost of Energy – LCOE показал, что в первом случае она будет на уровне 0,10 у. е. за кВт, а во втором – 0,07 у.е. за кВт. *Второй вариант* – размещение солнечных панелей на водной поверхности Краснодарского водохранилища. Воды водохранилища используются для полива рисовых полей и предотвращения возможных наводнений. При размещении солнечных панелей на водной глади позволяет решить ряд задач: не уменьшить испарение, обеспечить получение энергии для нужд сельхозтоваропроизводителей и ФГБУ «Управление Кубаньмелиоводхоз» (Белых, 2018) (рисунок 4).



1 – водоем; 2 – первичный поплавок для поддержки модуля солнечной панели; 3 – вторичный поплавок для обслуживания и плавучести;4 – модуль соединения; 5 – модуль площадка для монтажа солнечной панели; 6 – крепление для фиксации солнечной панели и первичного поплавка.

Рисунок 4 – Проект модуля размещения солнечных панелей на водной глади Краснодарского водохранилища

Выводы

Исследование показывает, что зеленая экономика все больше становится стратегическим фактором развития стран ЕАЭС. Использование ВИЭ на объектах мелиорации является одним из перспективных направлений применения зеленых технологий. На Евразийском мелиоративном форуме (2018 год) были обозначены задачи развития мелиоративного комплекса стран – ЕАЭС: гармонизация правовой базы и обмен опытом в области мелиоративного и водохозяйственного строительства; объединение усилий по эксплуатации мелиоративных систем и гидротехнических сооружений; развитие кооперации в управлении водохозяйственными комплексами. Механизм государственно-частного партнерства позволяет аккумулировать средства инвесторов на строительство объектов мелиорации, применение ВИЭ. Требуется проведение экономических обоснований для дальнейшего применения ВИЭ в водохозяйственном комплексе стран ЕАЭС; разработка инженерных решений при выборе типа ВИЭ с целью замещения части классической энергии. Востребованными являются: процесс альголизации водоемов, мониторинг за состоянием орошаемых агроландшафтов.

Список литературы

1. Агроэкологическая оценка земель, проектирование адаптивно-ландшафтных систем земледелия и агротехнологий /Под ред. академика РАСХН В. И. Кирюшина и академика РАСХН А. Л. Иванова. ФГНУ «Росинформагротех». М.: 2005. 794 с.
2. Мамин В.Ф., Комарова О.П. Методологические подходы к ведению долговременного мониторинга орошаемых агроландшафтов / ВНИИОЗ. Волгоград, 2017. С.145-150
3. Белых Д. В., Рыжаков А. Н., Кузьмичев А. А. Использование солнечной энергии на объектах мелиорации (на примере Пригородной оросительной системы Краснодарского края) // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2018. № 2(70). С. 168-181.
4. Водная стратегия Российской Федерации на период до 2025 года. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 27 августа 2009 года №1235-р. [Электронный ресурс]. – URL: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/2069399/ (дата обращения: 15.04.2021).
5. Горбунова О.И., Каницкая Л.В. Развитие методов оценки эко-эффективности как основное требование реализации принципов «зеленой экономики» // Вопросы инновационной экономики. 2019. № 2. С. 419-434. DOI: 10.18334/vinec.9.2.40609
6. Данилов-Данильян В.И., Хранович И.Л. Управление водными ресурсами. Согласование стратегий водопользования / М.: Научный мир, 2010. 232с.
7. Евразийская экономическая комиссия [Электронный ресурс]. – URL: http:// eaeunion.org (дата обращения 20.05.2021)
8. Зеленая экономика [Электронный ресурс]. – URL: wwf.ru/what-we-do/green-economy/ (дата обращения 21. 06.2021).
9. Макаров И.Н., Дробот Е.В., Левчегов О.Н. Зеленая экономика, цифровые технологии и наноинструментарий: основные базисы трансформации производственных систем в Евразийском экономическом союзе // Экономические отношения. 2020. Т. 10. № 3. С. 719-742.
10. Медведев А.В., Ванеева П.Д. Методологический подход в обосновании рационального использования водных ресурсов в сельском хозяйстве // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2019. № 2 (74). С. 115-124.
11. Медведева Л. Н., Фролова М.В., Московец М.В., Медведев А.В. Внедрение природосберегающих технологий – экологический императив в развитии регионов // Вестник Волгоградского государственного университета. 2019. №4. С. 126-140.

12. Мировой рынок зеленых технологий вырастет к 2025 году до 5,9 трлн евро. Renen. ru. [Электронный ресурс]. – URL: http://renen.ru/the-global-market-of-green- technologies-will-g row-to-eur-59-trillion-by-2025 (дата обращения: 23.05.2021).
13. О Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года. Указ Президента Российской Федерации от 19.04.2017 № 176. [Электронный ресурс]. – URL: http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102430636&rdk (дата обращения: 15.03.2021).
14. Селищева Т.А. Зеленая экономика как модель устойчивого развития стран ЕАЭС // Проблемы современной экономики. 2018. № 3(67). С. 6-12.
15. Сельское хозяйство ЕАЭС в 2019 году [Электронный ресурс]. – URL: http://мниап.рф/analytics/Selskoe-hozajstvo-EAES-v-2017-godu/ (дата обращения 23.04.2021)
16. ФГБУ «Управление Кубаньмелиоводхоз» [Электронный ресурс]. – URL: http://www.kmvh.ru/ (дата обращения 04.05.2021)
17. Храмков А. «Зеленая экономика» для Казахстана. Ждем, когда созреет. Centrasia.ru. [Электронный ресурс]. URL: http://www.centrasia.ru/newsA.php?st=1356541500 (дата обращения: 21.05.2021).
18. Шилькрот Г.С. Причины антропогенного эвтрофирования водоемов // Итоги науки и техники. Общая Экология. Биоценология. Гидробиология. Т. 2. Антропогенное эвтрофирование водоемов. М.: ВИНИТИ. 1975. С. 61-96.
19. Экстерналии мелиоративного парка в области использования возобновляемых источников энергии / Шедрин В.Н., Колбачев Е.Б., Пахомова А.А., Медведева Л.Н., Белых Д.В., Куприянов А.А., Медведев А.В. // Друкеровский вестник, 2018. № 4 (24). С. 106-126.
20. Эмиров Н.Д., Салтыкова А.С. Особенности внедрения концепции зеленой экономики в странах ЕАЭС // Актуальные проблемы международных отношений в условиях формирования мультиполярного мира. 2019. С. 407-412.
21. EIU Global Food Security Index (GFSI) (eiu.com) [Электронный ресурс]. – URL: https://foodsecurityindex.eiu.com/Index (дата обращения 30.04.2021)
22. Pearce DW, Anil Markandya, Edward B. Barbier Blueprint for a Green Economy / January 1989, DOI: 10.4324/9780203097298
23. Shchedrin V. N., Vasilyev S. M., Kolganov A. V., Medvedeva L. N., Kupriyanov A. A. Meliorative institutional environment: The area of state interests // Espacios, 2018. Vol. 39. № 12. P. 28.
24. United Nations Official Document. www.un.org. Available at: https://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E (accessed 23 August 2018).
25. Wolf A.T., Stahl K, Macomber M.F. Conflict and cooperation within international river basins: the importance of institutional capacity / Water Resources Update, 125, 2003. P.31- 40.

References

1. Agroekologicheskaia otsenka zemel', proektirovanie adaptivno-landshaftov sistem zemledeliia i agrotekhnologii / Pod red. akademika RASKhN V. I. Kiriushina i akademika RASKhN A. L. Ivanova. FGNU «Rosinformagrotekh». M.: 2005. 794 p.
2. Mamin V.F., Komarova O.P. Metodologicheskie podkhody k vedeniiu dolgovremennogo monitoringa oroshaemykh agrolandshaftov / VNIIOZ. Volgograd, 2017. pp. 145-150
3. Belykh D. V., Ryzhakov A. N., Kuz'michev A. A. Ispol'zovanie solnechnoi energii na ob"ektakh melioratsii (na primere Prigorodnoi orositel'noi sistemy Krasnodarskogo kraia) // Puti povysheniia effektivnosti oroshaemogo zemledeliia. 2018. № 2(70), pp. 168-181.

4. Vodnaia strategiia Rossiiskoi Federatsii na period do 2025 goda. Rasporiazhenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 27 avgusta 2009 goda №1235-r. [Elektronnyi resurs]. – URL:https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/2069399/ (data obrashcheniia: 15.04.2021).
5. Gorbunova O.I., Kanitskaia L.V. Razvitie metodov otsenki eko-effektivnosti kak osnovnoe trebovanie realizatsii printsipov «zelenoi ekonomiki» // Voprosy innovatsionnoi ekonomiki. 2019. № 2,pp. 419-434. DOI: 10.18334/vinec.9.2.40609
6. Danilov-Danil'ian V.I., Khranovich I.L. Upravlenie vodnymi resursami. Soglasovanie strategii vodopol'zovaniia / M.: Nauchnyi mir, 2010. 232 p.
7. Evraziiskaia ekonomicheskaia komissiia [Elektronnyi resurs]. – URL: http:// eaeunion.org (data obrashcheniia 20.05.2021)
8. Zelenaia ekonomika [Elektronnyi resurs]. – URL: wwf.ru/what-we-do/green-economy/ (data obrashcheniia 21. 06.2021)
9. Makarov I.N., Drobot E.V., Levchegov O.N. Zelenaia ekonomika, tsifrovye tekhnologii i nanoinstrumentarii: osnovnye bazisy transformatsii proizvodstvennykh sistem v Evraziiskom ekonomicheskom soiuze // Ekonomicheskie otnosheniia. 2020. T.10. № 3, pp. 719-742.
10. Medvedev A.V., Vaneeva P.D. Metodologicheskii podkhod v obosnovanii ratsional'nogo ispol'zovaniia vodnykh resursov v sel'skom khoziaistve // Puti povysheniia effektivnosti oroshaemogo zemledeliia. 2019. № 2 (74), pp. 115-124.
11. Medvedeva L. N., Frolova M.V., Moskovets M.V., Medvedev A.V. Vnedrenie prirodosberegaiushchikh tekhnologii – ekologicheskii imperativ v razvitii regionov // Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriia. Ekonomika. Ekologiia. 2019. №4. S.126-140
12. Mirovoi rynok zelenykh tekhnologii vyrastet k 2025 godu do 5,9 trln evro. Renen. ru. [Elektronnyi resurs]. – URL: http://renen.ru/the-global-market-of-green- technologies-will-g row-to-eur-59-trillion-by-2025 (data obrashcheniia: 23.05.2021).
13. O Strategii ekologicheskoi bezopasnosti Rossiiskoi Federatsii na period do 2025 goda. Ukaz Prezidenta Rossiiskoi Federatsii ot 19.04.2017 № 176. [Elektronnyi resurs]. – URL: http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102430636&rdk (data obrashcheniia: 15.03.2021).
14. Selishcheva T.A. Zelenaia ekonomika kak model' ustoichivogo razvitiia stran EAES // Problemy sovremennoi ekonomiki. 2018. № 3 (67), pp. 6-12.
15. Sel'skoe khoziaistvo EAES v 2019 godu [Elektronnyi resurs]. – URL: http://mniap.rf/analytics/Selskoe-hozajstvo-EAES-v-2017-godu/ (data obrashcheniia 23.04.2021)
16. FGBU «Upravlenie Kuban'meliovodkhoz» [Elektronnyi resurs]. – URL: http://www.kmvh.ru/ (data obrashcheniia 04.05.2021)
17. Khramkov A. «Zelenaia ekonomika» dlia Kazakhstana. Zhdem kogda sozreet. Centrasia.ru. [Elektronnyi resurs]. URL: http://www.centrasia.ru/newsA.php?st=1356541500 (data obrashcheniia: 21.05.2021).
18. Shil'krot G.S. Prichiny antropogennogo evtrofirovaniia vodoemov // Itogi nauki i tekhniki. Obshchaia Ekologiia. Biotsenologiia. Gidrobiologiia. T. 2. Antropogennoe evtrofirovanie vodoemov. M.: VINITI. 1975, pp. 61-96.
19. Eksternalii meliorativnogo parka v oblasti ispol'zovaniia vozobnovliaemykh istochnikov energii / Shedrin V.N., Kolbachev E.B., Pakhomova A.A., Medvedeva L.N., Belykh D.V., Kupriianov A.A., Medvedev A.V. // Drukerovskii vestnik, 2018. № 4 (24), pp. 106-126.
20. Emirov N.D., Saltykova A.S. Osobennosti vnedreniia kontseptsii zelenoi ekonomiki v stranakh EAES // Aktual'nye problemy mezhdunarodnykh otnoshenii v usloviiakh formirovaniia mul'tipoliarnogo mira. 2019, pp. 407-412.
21. EIU Global Food Security Index (GFSI) (eiu.com) [Elektronnyi resurs]. – URL: https://foodsecurityindex.eiu.com/Index (data obrashcheniia 30.04.2021)

22. Pearce DW, Anil Markandya, Edward B. Barbier Blueprint for a Green Economy / January 1989, DOI: 10.4324/9780203097298
23. Shchedrin V. N., Vasilyev S. M., Kolganov A. V., Medvedeva L. N., Kupriyanov A. A. Meliorative institutional environment: The area of state interests // Espacios, 2018. Vol. 39. № 12. P. 28.
24. United Nations Official Document. www.un.org. Available at: https://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E (accessed 23 August 2018).
25. Wolf A.T., Stahl K, Macomber M.F. Conflict and cooperation within international river basins: the importance of institutional capacity / Water Resources Update, 125, 2003, pp. 31-40.

GREEN ECONOMY – A PLATFORM FOR APPLYING ENVIRONMENTAL AND MONITORING TECHNOLOGIES IN THE EAEU

V. V. MELIKHOV[1], L.N. MEDVEDEVA[1], A. L. FEDOROV [2]
[1] FSBSI "All-Russian Research Institute of Irrigated Agriculture, 9 Timirjazeva St, Volgograd, Russian Federation, 400002. E-mail: vniioz@yandex.ru;
[2] Kotelnikovsky urban settlement of the Kotelnikovsky municipal district of the Volgograd region, Lenin street, 9, 404354. E-mail: кgp.volganet@mail.ru

Annotation. The article presents materials that reveal the prospects for the development of a green economy in the Eurasian Economic Union (EEU), the use of nature conservation and monitoring technologies in agriculture and land reclamation. The argumentation is put forward for promoting the model of a green economy, the use of technologies that reduce the effects of climate change, and the reduction of natural resources in the use of mankind. Based on the construction of an analytical and information module with agrometeorological, ecological, water, soil and plant blocks, regular monitoring of the state of natural and irrigated agricultural landscapes in order to prevent changes in the composition of soils, flora and fauna; water bodies with the subsequent provision of recovery functions and rational use of natural resources. Variants of engineering, technical and economic solutions for the placement of renewable energy sources (RES) on irrigation systems and natural reservoirs are considered. The technology of healing natural and artificial reservoirs based on the use of Chlorella vulgaris and the regenerative functions of ecobiocenoses has been proposed. The necessity of promoting green technologies through the use of the mechanism of public-private partnership, changing the incentives for attracting entrepreneurs to the production of products based on environmentally friendly technologies and harmonizing the interests of the countries participating in the Eurasian Economic Union is shown

Keywords: green economy, EEU, agriculture, land reclamation, monitoring, algolization,

ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОЧВ ПОД ПЛОДОВЫЕ НАСАЖДЕНИЯ

И. А. ДРАГАВЦЕВА[1], Н. Н. СЕРГЕЕВА[1], А. В. КЛЮКИНА[1], И. Ю. САВИН[2]
[1] ФГБНУ «Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия» (ФГБНУ СКФНЦСВВ), Краснодар, iadared63@yandex.ru;
[2] ФГБНУ ФИЦ «Почвенный институт им. В.В. Докучаева», Российский университет дружбы народов, Москва, savin_iyu@esoil.ru;

Аннотация. Принцип соответствия между биологическими требованиями плодовых культур и почвенными условиями лежит в основе рационального размещения садовых массивов. Физико-химические свойства почв обуславливают функциональное состояние многолетних растений, долговечность и продуктивность насаждений, определяя эффективность отрасли в целом. В этой связи актуальными являются вопросы изучения и оценки почвенно-экологических условий современными методами учета и систематизации данных об уровне плодородия и наличии лимитирующих факторов на основе информационных технологий. В статье представлены результаты анализа с использованием спутниковых данных на территории Краснодарского края содержания и глубины залегания в почвах карбонатов и легкорастворимых солей – лимитирующих факторов произрастания плодовых культур. Прогноз оптимального размещения плодовых культур в зависимости от почвенных условий проведен с помощью ГИС, основанных на структурированных базах пространственно координированных данных, спутниковых изображений, сопряженных со специальным программным обеспечением и техническими средствами для ввода, хранения и многоцелевого анализа. С помощью ГИС и дешифрирования спутниковых данных были созданы компьютерные карты, отражающие свойства почв по каждому показателю. Проведена систематизация почвенно-ресурсных данных Краснодарского края по показателю садопригодности. Представлены результаты работы на примере выявления зон и микрозон с повышенным содержанием $CaCO_3$ и легкорастворимых солей послойно на глубине до 1 м в масштабе региона. Построены компьютерные карты для экологически точного и экономически оправданного размещения плодовых пород.

Ключевые слова. Геоинформационное картирование, почвы, плодовые культуры, лимитирующие факторы, спутниковые технологии

Введение

Прецизионный характер современных агротехнологий требует широкого использования данных дистанционного зондирования, нацеленного на принятие оптимизированных решений. Почвенные условия юга России отличаются значительным генетическим разнообразием почвообразующих пород, обусловленным глубокими различиями в истории формирования поверхности, контрастностью рельефа, широким диапазоном климатических условий [1]. Оценка ресурсного потенциала и рациональное использование земельного фонда под монокультуру сада, учитывающая большое число взаимосвязанных факторов, в настоящее время может успешно осуществляться с помощью географических информационных систем (ГИС), сопряженных с дистанционными технологиями получения информации [2-7]. Имеющиеся структурированные и актуализированные по спутниковым данным базы данных ГИС позволяют моделировать интегральные экологические карты оптимального размещения плодовых культур в зависимости от физико-химических свойств почв. Актуальность и перспективы практического использования геоинформационного картографирования обусловили основную цель настоящей работы – в условиях Краснодарского края выявить границы оптимума по критериям «содержание и глубина залегания СаСО3», «содержание легкорастворимых вредных солей» в соответствии с биологическими требованиями плодовых культур [3].

Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследований были рассмотрены аккумулирующие кальций почвы Краснодарского края, среди которых преобладают черноземы обыкновенные (по классификации 1977 г., агрочерноземы карбонатные сегрегационные по классификации 2004 г.)

[9,10], распространенные на обширной территории равнинной части и в предгорной зоне, используемые под монокультуру сада. При выборе анализируемых показателей руководствовались основными лимитирующими факторами садопригодности данного подтипа почв (по данным Почвенного института им. В.В. Докучаева) [8]. Анализировали параметры содержания и глубину залегания СаСО3, и содержание легкорастворимых вредных солей с использованием компьютерной системы, включающей современные пространственно-координированные базы данных, интегрированные с данными дистанционного зондирования и имитационного моделирования на основе ГИС.

Первый этап исследований был связан с геосистемным анализом содержания и глубины залегания карбонатов, содержания легкорастворимых солей в почвах региона. Итоговая оценка перспектив размещения плодовых насаждений дана с учетом лимитирующих факторов [8]. Компьютерное моделирование основывалось на уточненной по космическим снимкам почвенной карте исследуемой территории масштаба 1:200000. Исходная почвенная карта была векторизована и введена в базу данных ГИС. После этого, была проведена корректировка границ исходной карты при использовании в качестве подложки композиты спутниковых сцен Landsat 5 TM [11]. Композиты создавались с использованием каналов 3,4 и 7 Landsat. Данная комбинация каналов оказалась наиболее информативной для региона исследований для детектирования засоления и карбонатности почв, которое проводилось в интерактивном режиме.

Результаты и обсуждение

На рисунке 1 показан пример корректировки границ почвенных выделов при использовании композитов Landsat 5 TM в качестве подложки. Как известно, высокая карбонатность и засоленность почв приводят к достаточно сильной осветленности поверхности почв и изменению растительного покрова [12]. Это позволяет скорректировать границы почв с высоким содержанием карбонатов и солей в поверхностном горизонте почв. Необходимо отметить, что корректировались не все границы почвенной карты, а только те из них, которые оконтуривают выделы с карбонатными и засоленными почвами. Поэтому в наших исследованиях речь не шла о полной корректировке почвенной карты, как это принято в картографии почв [11]. После корректировки границ, к выделам векторной почвенной карты была привязана атрибутивная информация о карбонатности и засоленности почв. Основным источником информации послужили данные легенды исходной почвенной карты, а также информация из научных публикаций и других карт, имеющихся на территорию исследований (например, карты засоления почв СССР [13], БД «Деградация почв России» [14], Карты вторичного засоления почв России [15] и т.п.). Также широко использовались среднемасштабные почвенно-мелиоративные карты из архива ФИЦ «Почвенный институт им. В.В. Докучаева».

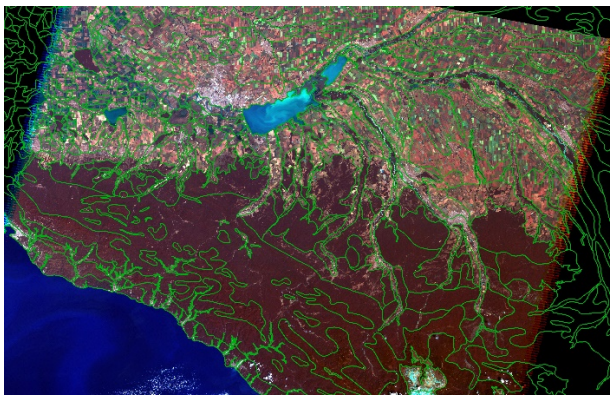


Рисунок 1 – Пример границ почвенных выделов на центральную часть Краснодарского края, скорректированных по композитам Landsat (показаны зеленым цветом)

На рисунке 2 представлены векторные карты карбонатности и засоленности почв региона исследований.

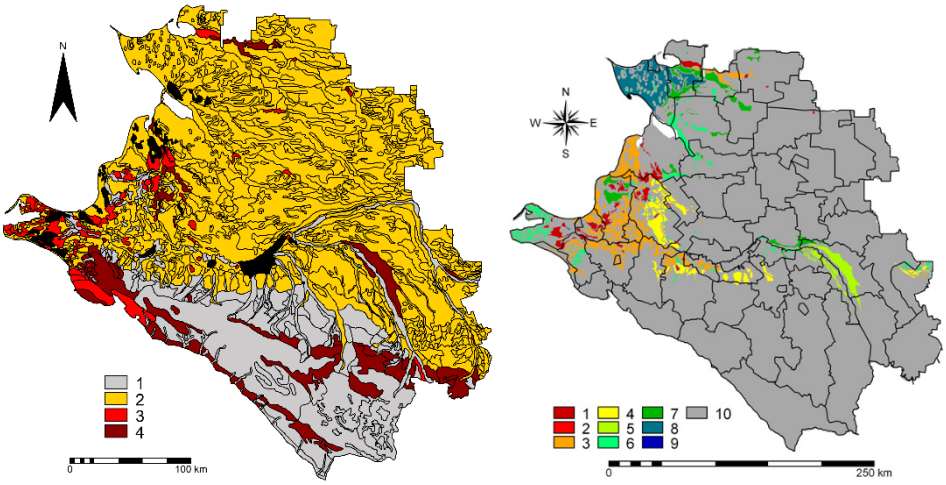


Рисунок 2 – Карты карбонатности (слева, 1 – нет карбонатов в профиле почв, 2 – низкое содержание карбонатов, 3 – среднее содержание, 4 – высокое содержание) и засоленности (справа, 1 – почвы, засоленные в слое 0-1 метр, занимают более 75% от площади контура; 2 - почвы, засоленные в слое 0-1 метр, занимают 50-75% от площади контура; 3 - почвы, засоленные в слое 0-1 метр, занимают 25-50% от площади контура; 4 - почвы, засоленные в слое 0-1 метр, занимают 10-25% от площади контура; 5 - почвы, засоленные в слое 0-1 метр, занимают 1-10% от площади контура; 6 - почвы, засоленные в слое 1-2 метра, преобладают в контуре; 7 - почвы, засоленные в слое 1-2 метра, встречаются локально в контуре; 8 - почвы, засоленные в слое 2-5 метров, преобладают в контуре; 9 - почвы, засоленные в слое 2-5 метров, встречаются локально в контуре; 10 – в контуре нет засоленных почв) почв Краснодарского края

Представлены лишь два параметра, характеризующие карбонатность и засоленность почв. В базе данных ГИС дополнительно отражены и такие свойства почв, как тип засоления, а также глубина залегания солей, глубина залегания карбонатов, степень засоления почв. Полученные карты более точно отражают такие важные для оценки садопригодности свойства почв, как карбонатность и засоленность, чем все существующие до этого источники информации.

Полученные результаты НИР в виде карт, способствовали объективной оценке садопригодности черноземных почв по критериям карбонатности и засоления, позволили разработать сценарий размещения плодовых культур и прогнозировать потенциальную урожайность растений различного породно-сортового состава.

Необходимо отметить, что точность и актуальность карт была обеспечена использованием спутниковых данных Landsat 5 TM. Для анализа спутниковых данных был использован самый простой способ дешифрирования, основанный на интерактивном экспертном анализе изображений. Использование более сложных подходов, основанных на методах попиксельного анализа изображений [16] для решения поставленной задачи на территории, сильно освоенной с сельскохозяйственном отношении, оказалось более сложным и трудоемким из-за пестроты изображения полей с различными сельскохозяйственными культурами.

Выводы

Оценка ресурсного потенциала земель для развития плодоводства требует актуальной и точной информации о состоянии почв и земель. В настоящее время получение такой информации на большие территории невозможно без использования спутниковых данных.

Детектирование засоленности и карбонатности почв, как основных факторов, лимитирующих продуктивность плодовых культур на территории Краснодарского края, по спутниковым данным Landsat 5 TM, позволяет проводить оперативно и объективно обновление данной информации, содержащейся на традиционно составленной почвенной карте.

В условиях пестроты растительности на сельскохозяйственных полях, использование интерактивного экспертного дешифрирования является более надежным способом, чем попиксельная классификация изображений.

Обновленная почвенная карта автоматически становится частью базы данных ГИС, которая служит основой для анализа ресурсного потенциала земель.

Визуализация большого количества данных ГИС в виде компьютерных моделей (картограмм) является максимально информативным и наглядным средством для разработки «оптимальной модели» сценария размещения плодовых насаждений без ограничений, связанных с потенциальными эдафическими рисками.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Программы стратегического академического лидерства РУДН.

Список литературы / References

1. Почвы Краснодарского края, их использование и охрана. (ред. Вальков В.Ф.) Издательство: СКНЦ ВШ, 1995 г. 193 стр.
2. Драгавцева И. А., Савин И. Ю., овечкин С. В. Ресурсный потенциал земель Краснодарского края для возделывания плодовых культур. Краснодар: СКЗНИИСиВ. 2005. 138 с.
3. Dragavtsev V.A., Dragavtseva I. A., Savin I.Yu., Morenets A.S. Geographical Estimation of Agroclimatic Resources of the North Caucasus for the Cultivation of Fruit Trees // European Agrophysical Journal. 2015. Vol. 2(2). P. 34-46. Doi: http://dx.doi.org/10.17830/j.eaj.2015.02.034.
4. Сергеева Н.Н., Савин И.Ю., Трунов Ю.В., Драгавцева И.А., Моренец А.С. Многолетняя динамика параметров плодородия черноземов под яблоневыми садами // Бюллетень почвенного института им. В.В. Докучаева. 2018. № 93. С. 21-39. DOI: 10.19047/0136-1694-2018-93-21-37
5. Классификация и диагностика почв России / сост. Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
6. Savin I.Y., Ovechkin S.V. On the updating of medium-scale soil maps / Eurasian Soil Science. 2014. Т. 47. № 10. С. 987-994.
7. Караванова Е.И., Кириллова Н.П. Отражательная способность и цвет почв. М.:Русайнс. 2020. 200с.
8. Stolbovoi V.S., Savin I.Y.u, Sheremet B.V., Sizov V.V., Ovechkin S.V. 1999 The geoinformation system on soil degradation in Russia Eurasian Soil Science 32(5) 589-593.
9. Savin I., Avetyan S., Shishkonakova E. Secondary salinization of soils in Russia / IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Т. 690. С. 012024.
10. Al-doski J., Shattri B.M., Helmi Zulhaidi Mohd Shafri. Image Classification in Remote Sensing / Journal of Environment and Earth Science. Vol. 3, No.10, 2013. Pp. 141-147.

GEOGRAPHIC INFORMATION MODELING USING SATELLITE DATA FOR EFFICIENT SOIL USE UNDER FRUIT PLANT

I. A. DRAGAVTSEVA [1], N. N. SERGEEVA [1], A. V. KLYUKINA [1], I. YU. SAVIN [2]
[1] Federal State Budget Scientific Institution «North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making», Krasnodar, Russia, iadared63@yandex.ru
[2] Federal State Budget Scientific Institution «V.V. Dokuchaev Soil Institute», Moscow, Russia, savin_iyu@esoil.ru;

Abstract. The principle of conformity between the biological requirements of fruit crops and soil conditions underlies the rational placement of garden arrays. Physico-chemical properties of soils cause the functional state of perennial plants, durability and productivity of plantations, determining the efficiency of the industry as a whole. In this regard, issues of studying and evaluating soil and environmental conditions are relevant to modern methods of accounting and systematization of data on the level of fertility and the availability of limiting factors based on information technologies. The article presents the results of the analysis using satellite data on the territory of the Krasnodar region of the content and depth of the occurrence in the soils of carbonates and easily soluble salts - the limiting factors of growing fruit crops. The forecast of the optimal placement of fruit crops depending on the soil conditions was carried out using GIS based on structured bases of spatially coordinated data, satellite images associated with special software and technical means for entering, storing and multipurpose analysis. With the help of GIS and decrypt satellite data, computer maps were created, reflecting the soil properties for each indicator. The systematization of soil and resource data of the Krasnodar Territory was carried out in terms of surprise. The results of the work are presented on the example of the detection of zones and microscone with an elevated content of SAS3 and easily soluble salts in layers at a depth of 1 m in the scale of the region. Computer cards are built for an ecologically accurate and economically justified placement of fruit breeds.

Keywords. Geoinformation mapping, soils, fruit crops, limiting factors, satellite technologies.

АВТОРСКИЙ УКАЗТЕЛЬ

Артемов Д. В., *59*
Беленков А. И., *59*
Белобров В. П., *164*
Белов А. В., *183*
Блеканов И. С., *141*
Блохин Ю. И., *183*
Блохина С. Ю., *183*
Буре В. М., *174*
Василенко Е. В., *35, 39*
Васильев Т. А., *64*
Волкова Е. В., *39*
Воробьев Н. И., *137*
Воропаев В. В., *94*
Глазунов Г. П., *132*
Гольтяпин В. Я., *126*
Григорьева О. В., *24*
Груздев В. Н., *24*
Двирник А. В., *183*
Доброхотов А. В., *192*
Драгавцева И. А., *208*
Дроздова И. В., *24*
Дубровин К. Н., *80*
Дунаева Е. А., *146*
Евдокимова М. В., *132*
Ерёменко Д. Ю., *164*
Ермолаев Н. Р., *169*
Ермолаева О. С., *20*
Ершов Е. А., *141*
Захаренко В. А., *68*
Захарова Е. Т., *164*
Захарян Ю. Г., *51*
Зейлигер А. М., *20*
Иванов А. И., *84*
Иванова Ж. А., *84*
Иванцова Н. Н., *64*
Ирмулатов Б. Р., *51*
Кирсанов А. Д., *51*
Клещенко А. Д., *46*
Клюкина А.В., *208*
Козырева Л. В., *192*
Комаров А. А., *51*
Кудряшова С. Я., *178*
Кузнецов А. Ю., *24*
Лысов А. К., *8*
Маджид С. М., *30*
Матвеенко Д. А., *94*
Медведев С. А., *164*
Медведева Л.Н., *197*
Мелихов В. В., *197*
Метечко Л. Б., *99*
Митрофанов Е. П., *56*, *188*
Митрофанова О. А., *56*, *174*, *188*
Михайленко И. М., *151*
Молин А. Е., *141*
Музылев Е. Л., *39*
Огородников С. С., *132*
Павлюшин В. А., *8*
Пасько О. А., *30*
Перевертин К. А., *64*
Петрушин А. Ф., *56*, *188*
Пищик В. Н., *137*
Прохоров И. С., *99*
Пухальский Я. В., *137*
Разумилов Е. С., *141*
Родионова Н. В., *178*
Савин И. Ю., *208*
Савицкая О. В., *46*
Сергеева Н. Н., *208*
Смук В. В., *71*
Сорокин А. Е., *99*
Старцева З. П., *39*
Степанов А. С., *80*
Тарасова Л. Л., *35*
Токарева О.С., *30*
Федоров А. Л., *197*
Фесенко М. А., *90*
Хомяков Д. М., *15*
Чумбаев А. С., *178*
Шилин Б. В., *24*
Шпанев А. М., *71*, *90*
Щеголихина Т. А., *126*
Юдин С.А., *164*
Яковлев А. С., *132*
Якушев В. В., *51*, *137*
Якушев В. П., *3*, *137*, *174*

СОДЕРЖАНИИЕ

ПЛЕНАРНАЯ СЕКЦИЯ

Дистанционное зондирование: от задач к масштабируемости результатов в современном земледелии
Якушев В. П. 3

Фитосанитарное проектирование агроэкосистем и дистанционное зондирование
Павлюшин В. А., Лысов А. К. 8

Цифровые технологии в агрономии России: настоящее и ближайшее будущее
Хомяков Д. М. 15

Методы, масштабы и данные дистанционного зондирования в моделях роста и развития агрофитоценозов
Зейлигер А. М., Ермолаева О. С. 20

Дистанционные исследования аномалий спектральных характеристик растений как ранних индикаторов стресса
Григорьева О. В., Груздев В. Н., Дроздова И. В., Шилин Б. В., Кузнецов А. Ю. 24

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ В СИСТЕМАХ МОНИТОРИНГА АГРОЭКОСИСТЕМ

Оценка состояния растительности территории Центрального Ирака по данным дистанционного зондирования Земли
Токарева О. С., Пасько О. А., Маджид С. М. 30

Детектирование сильных рос по данным дистанционного зондирования Земли
Василенко Е. В., Тарасова Л. Л. 35

Использование спутниковых данных разных спектральных диапазонов при оценке влагообеспеченности засушливых сельскохозяйственных регионов
Музылев Е. Л., Старцева З. П., Волкова Е. В., Василенко Е. В. 39

Оценка урожайности озимой пшеницы на основе комплексирования наземных и спутниковых данных для отдельных районов Северо-Кавказского и Приволжского УГМС
Клещенко А. Д., Савицкая О. В. 46

Использование данных дистанционного зондирования для управления продуктивностью пшеницы в условиях аридной зоны (на примере Северного Казахстана)
Комаров А. А., Ирмулатов Б. Р., Якушев В. В., Кирсанов А. Д., Захарян Ю. Г. 51

Программный комплекс обнаружения и выделения внутриполевой изменчивости по мультиспектральным снимкам и оптическим критериям
Петрушин А.Ф., Митрофанова О.А., Митрофанов Е.П. 56

Диагностика засоренности и меры борьбы с борщевиком сосновского на труднодоступных участках Московской области
Беленков А.И., Артемов Д.В. 59

Использование спутниковых снимков свекловичных полей для оптимизации учёта заражённости почв свекловичной цистообразующей нематодой
Перевертин К. А., Иванцова Н. Н., Васильев Т. А. 64

Развитие дистанционных методов мониторинга фитосанитарного состояния агроэкосистем России при использовании пестицидов (состояние и перспективы)
Захаренко В. А. 68

Методология изучения пространственной гетерогенности фитосанитарного состояния агробиоценозов средствами геоинформационных систем
Шпанев А. М., Смук В. В. 71

Использование беспилотных летательных аппаратов в растениеводстве
Щеголихина Т. А. 76

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ТОЧНОМ ЗЕМЛЕДЕЛИИ И ОПЫТНОМ ДЕЛЕ

Моделирование сезонной динамики NDVI и LAI сельскохозяйственных культур юга Дальнего Востока (на примере сои)
Степанов А. С., Дубровин К. Н. 80

Дистанционное зондирование в задачах современного полевого экспериментирования
Иванов А. И., Иванова Ж. А. 84

Информативность вегетационного индекса (NDVI) при оценке состояния агроценоза и прогноза урожайности ярового ячменя с подсевом многолетних трав
Фесенко М. А., Шпанев А. М. 90

Организация полевых опытов по формированию опорной информации для интерпретации аэрокосмических снимков
Матвеенко Д. А., Воропаев В. В. 94

Аэрокосмический мониторинг в решении задач современного точного земледелия
Метечко Л. Б., Сорокин А. Е., Прохоров И. С. 99

Современные БПЛА для обследования земель сельскохозяйственного назначения
Гольтяпин В. Я., Щеголихина Т. А. 126

СИСТЕМЫ, МОДЕЛИ, МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ, КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ

Определение оптимальных концентраций N, P, K в черноземе выщелоченном для категории земель сельскохозяйственного назначения на основе теоретической модели доза – ответ по материалам дистанционного зондирования Земли
Глазунов Г. П., Яковлев А. С., Евдокимова М. В., Огородников С. С. 132

Конфигурация облачной научно-исследовательской аграрной платформы с элементами искусственного интеллекта
Воробьев Н. И., Якушев В. П., Якушев В. В., Пищик В. Н., Пухальский Я. В. 137

Мониторинг азотного питания зерновых культур на основе нейросетевых технологий
Блеканов И. С., Молин А. Е., Разумилов Е. С., Ершов Е. А. 141

Сравнительная оценка биопродуктивности различных агротехнологий
Дунаева Е. А. 146

Развитие индексной парадигмы в дистанционном зондировании почвенно-растительного покрова
Михайленко И. М. 151

Исследование эффективности ассимиляции данных дистанционного зондирования динамической моделью продукционного процесса
Ерёменко Д. Ю., Медведев С. А., Захарова Е. Т. 164

Использование спектральных индексов для дешифрирования растительных остатков на примере Ставропольского края
Ермолаев Н. Р., Юдин С. А., Белобров В. П. 169

Оценка внутриполевой изменчивости с помощью вариограммного анализа данных дистанционного зондирования
Митрофанова О. А., Якушев В. П., Буре В. М. 174

Спутниковая оценка текстуры и влажности почвы по радарным и оптическим данным аппаратов Sentinel на примере Новосибирской области
Родионова Н. В., Кудряшова С. Я., Чумбаев А. С. 178

Информационно-измерительная IoT система мониторинга гидротермических показателей почвы и локальных метеоусловий
Блохин Ю. И., Белов А. В., Блохина С. Ю., Двирник А. В. 183

Геопространственная база данных в задачах точного земледелия
Митрофанов Е. П., Митрофанова О. А., Петрушин А. Ф. 188

Метод определения части солнечной энергии затраченной на суммарное испарение растительной поверхности с комплексным использованием данных ДЗЗ и метеостанций.
Козырева Л. В., Доброхотов А. В. 192

Зеленая экономика – платформа для применения природосберегающих и мониторинговых технологий в ЕАЭС
Мелихов В. В., Медведева Л. Н., Федоров А. Л. 197

Геоинформационное моделирование с использованием спутниковых данных для эффективного использования почв под плодовые насаждения
Драгавцева И. А., Сергеева Н. Н., Клюкина А.В., Савин И. Ю. 208

Авторский указатель 213

ISBN 978-5-905200-47-2

Материалы III Всероссийской научной конференции с международным участием
«**Применение средств дистанционного зондирования Земли в сельском хозяйстве»**
ФГБНУ АФИ, Санкт-Петербург, Россия**,** 16–17 сентября 2021 г.

Технический редактор: А. Ю. Цивилёв

Подписано в печать 22.09.2021
Подготовлено к печати в ФГБНУ АФИ
195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., д. 14.