

Автоматизация процесса обнаружения и выделения границ внутриполевой изменчивости по аэрокосмическим снимкам и оптическим критериям

В. П. Якушев, А. Ф. Петрушин, В. В. Якушев, С. Ю. Блохина,
Ю. И. Блохин, Д. А. Матвеев, Е. П. Митрофанов

*Агрофизический научно-исследовательский институт
Санкт-Петербург, 195220, Россия
E-mails: vyakushev@agrophys.ru, sblokhina@agrophys.ru*

Обоснованное применение технологий точного земледелия невозможно без количественной оценки диапазона внутриполевой вариабельности факторов продуктивности на возделываемых сельскохозяйственных землях. Степень варьирования внутриполевой изменчивости определяет эффективность и целесообразность использования дифференцированного подхода к возделыванию культур на конкретном сельскохозяйственном поле. Наиболее эффективным, масштабируемым и экономически выгодным направлением количественной оценки внутриполевой изменчивости представляются методы дистанционного зондирования. Коллективом авторов осуществлена программная реализация базового алгоритма обнаружения и выделения границ внутриполевой изменчивости по аэрокосмическим снимкам и оптическим критериям посевов, а также его апробация в специализированных полевых исследованиях. Разработана модульная схема управления формированием базы знаний, базы данных и процессом расчёта оптических индексов по заданным критериям и аэрокосмическим снимкам изучаемых сельскохозяйственных территорий. Программный модуль базы данных оснащён графическим интерфейсом на языке Паскаль в программной среде Rad Studio 11 и содержит различные таблицы и справочники. На основе этих данных осуществляется расчёт и наполнение базы знаний значениями различных оптических индексов, характеризующих физиологическое состояние посевов в основные фазы развития с указанием диапазона допустимых и критических величин возможных стрессовых факторов.

Ключевые слова: точное земледелие, дистанционное зондирование, оптические критерии растений, дефицит азота и воды, внутриполевая изменчивость, алгоритм выделения границ

Одобрена к печати: 28.11.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-161-162

Введение

Основная цель точного земледелия заключается в оптимизации управления посевами с учётом пространственной и временной изменчивости параметров, влияющих на рост и развитие сельскохозяйственных культур, путём дифференциации норм технологического воздействия (Матвеев и др., 2020; Якушев и др., 2019а; Karydas et al., 2020). Технологии дифференцированного применения сельскохозяйственных ресурсов (воды, удобрений, средств защиты растений) способствуют повышению урожайности при одновременном снижении негативного влияния сельскохозяйственной деятельности на окружающую среду (Gavioli et al., 2019; Gu et al., 2020; Khan et al., 2020), однако эффективность и целесообразность их использования определяется степенью варьирования внутриполевой изменчивости (Damian et al., 2020). Первым шагом к внедрению технологий дифференцированного внесения становится поиск наиболее актуальной информации для определения внутриполевой изменчивости, понимание, как обрабатывать или классифицировать данные для выделения однородных зон и определять их оптимальное количество на поле (Breunig et al., 2020; Fridgen et al., 2004). Однородные зоны, или зоны управления (ЗУ, *англ.* management zone) — более общий термин, предложенный Р. М. Ларком (*англ.* R. M. Lark) и Дж. В. Стаффордом (*англ.* J. V. Stafford) (Lark, Stafford, 1997), представляют собой участки сельскохозяйственного поля с относительно однородными показателями урожайности, физическими характеристиками почвы, обеспечен-

ностью питательными элементами и другими ландшафтными или почвенными условиями (Haghverdi et al., 2015). Разграничение сельскохозяйственного поля на ЗУ является основой большинства методов точного земледелия.

Для выделения зон управления применяется несколько подходов: на основе карт урожайности сельскохозяйственных культур (Damian et al., 2017), характеристик почвы (Gili et al., 2017; Rossi et al., 2018), данных дистанционного зондирования (ДДЗ) (Breunig et al., 2020; Damian et al., 2020; Fontanet et al., 2020; Georgi et al., 2018; Jin et al., 2017), вегетационных индексов (Cammarano et al., 2020; Easterday et al., 2019; Hong et al., 2019) или же сочетания этих подходов и наборов данных (De Benedetto et al., 2013; Derby et al., 2007; Shaddad et al., 2016; Yao et al., 2014). Для получения объективной информации о состоянии сельскохозяйственных земель и посевов, выявления различных отклонений в их развитии, а также прогнозирования возможных потерь урожая из-за неблагоприятных (стрессовых) факторов активно используются данные дистанционного гиперспектрального зондирования (Денисов и др., 2021; Lu et al., 2020; Mulla, 2013). Предикторы для выделения зон управления должны иметь пространственную корреляцию с урожайностью (Gavioli et al., 2016).

Радиация, отражённая от посева, несёт полную информацию о биохимическом составе, физиологическом состоянии растений и позволяет по оптическим показателям оценить реакцию возделываемой сельскохозяйственной культуры на действия различных стрессоров. При этом обычно наблюдаемая пространственная неоднородность оптических характеристик агрофитоценозов связана с различиями в содержании воды, питательных элементов и других свойствах почвы, а также с особенностями технологий, применяемых при возделывании сельскохозяйственных культур (нормы и сроки внесения удобрений, степень засорённости посевов и т. д.). Объективно существующая вариабельность оптических характеристик физиологического состояния посевов, наличие латентных признаков, невозможность точного предсказания метеорологических условий, а также трудности учёта других факторов, оказывающих значимое воздействие на агроценоз, определяют необходимость разработки новых количественных подходов, алгоритмов и методов изучения внутрислоевого изменчивости условий формирования урожая и выделения границ неоднородности для задач точного земледелия.

Выбор методов и алгоритмов выделения ЗУ для технологий точного земледелия, как правило, сложен и зависит от качества входных данных и необходимости их предварительной обработки (Breunig et al., 2020; Santos, Saraiva, 2015). Объективно трудно создать автоматический метод определения ЗУ без недостатков с точки зрения точности и применимости, так как интерпретация и анализ полученных результатов часто становятся сложной задачей для сельхозпроизводителей (Garg et al., 2022). Цель настоящей работы состоит в программной реализации разработанного базового алгоритма выявления границ внутрислоевого изменчивости по ДДЗ (Якушев и др., 2019б) и обнаружения типа стресса в условиях полевых опытов с тестовыми площадками, на которых моделируются дефицит азотного питания и различная водообеспеченность посевов.

Объекты полевых исследований

Объектом исследования служили посева яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Дарья. Растения выращивали на поле Меньковского филиала Агрофизического научно-исследовательского института (АФИ) (Ленинградская обл., Гатчинский р-н) в 2022 г. Всего было заложено 12 тестовых площадок (по шесть на участках поля с различной водообеспеченностью) площадью 100 м². На рис. 1 и 2 (см. с. 153) представлены спектральные характеристики тестовых площадок. Дозы азота варьировали от 0 (удобрения не вносили) до 200 кг/га с шагом 40 кг/га. Спектральные характеристики диффузного отражения листьев определяли *in situ* в течение вегетационного периода с помощью оптоволоконной спектрорадиометрической системы (Ocean Insight, США) в диапазоне от 350 до 1000 нм с шагом 0,3 нм. Во время основных фаз развития яровой пшеницы (кущение, выход в трубку, колошение, цветение)

ние) проводили дистанционную фотосъёмку посевов. Цифровые изображения в диапазоне от 400 до 1000 нм получали с высоты 80 м с помощью гиперспектральной камеры Pika-L (Resoson, США), установленной в качестве полезной нагрузки на беспилотном воздушном судне Matrice 600 Pro (DJI, Китай). Пространственное разрешение полученных данных составило 3 см/пиксель, а спектральное разрешение — 2,14 нм. Для формирования полётного задания использовалось программное обеспечение UGCS Pro (англ. Universal Ground Control Software). При обработке оптических характеристик посевов были рассчитаны вегетационные индексы: нормализованный разностный вегетационный индекс (англ. Normalized Difference Vegetation Index — NDVI) и индексы отражения, характеризующие активность фотосинтетического аппарата, а именно содержание хлорофилла (англ. Chlorophyll Reflection Index — ChIRI), фотохимическую активность фотосинтетического аппарата (англ. Photochemical Reflectance Index — PRI), содержание воды (англ. Water Ratio Index — WRI), антоцианов (англ. Anthocyanins Reflection Index — ARI) и флавоноидов (англ. Flavonoids Reflectance Index — FRI).

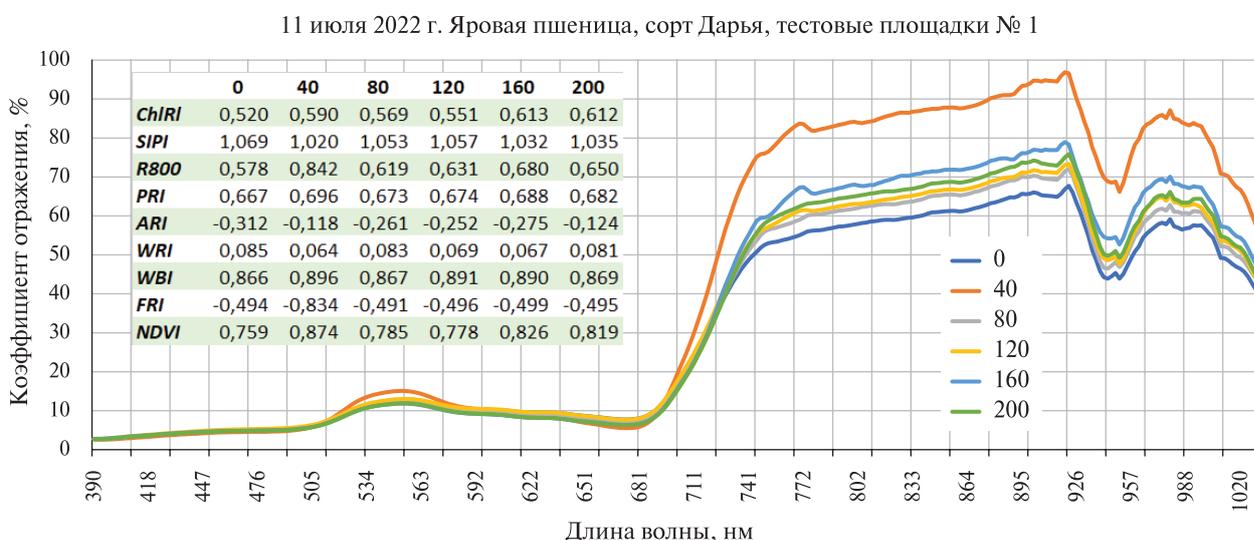


Рис. 1. Спектральные характеристики тестовых площадок с разным фоном азотного питания (кг/га) и оптимальной водообеспеченностью



Рис. 2. Спектральные характеристики тестовых площадок с разным фоном азотного питания (кг/га) и дефицитом влаги

Перечисленные выше индексы применялись для дистанционной оценки физиологического состояния пшеницы и выявления участков посева, в которых сложился дефицит азотного питания при формировании сомкнутого растительного покрова, когда обычно применяемые вегетационные индексы, например NDVI, не дают надёжных результатов (Якушев и др., 2022). Их комплексное применение повышает надёжность оценки потребности растений в удобрении за счёт анализа неспецифических и специфических изменений оптических характеристик растений, возникающих при дефиците азота и воды.

Программная реализация базового алгоритма

На *рис. 3* представлена концептуальная блок-схема базового алгоритма по обнаружению и выделению границ внутрислоевого изменчивости по оптическим критериям (индексам отражения) и аэрокосмическим снимкам для обоснования применения дифференцированных технологий точного земледелия. Основное отличие разработанного алгоритма заключается в том, что за счёт использования базы знаний (БЗ), помимо выделения однородных зон, определяется воздействующий на посев стрессор. В БЗ накапливаются формализованные сведения о формулах расчёта различных оптических показателей (индексов отражения) по тем или иным спектральным диапазонам, а также систематизируются и сохраняются значения соответствующих величин, характеризующих физиологическое состояние посевов сельскохозяйственных культур в оптимальных и стрессовых условиях. В базе данных (БД) содержатся данные дистанционного зондирования, на основе которых осуществляется расчёт значений оптических показателей посевов по заданным критериям, содержащимся в БЗ.

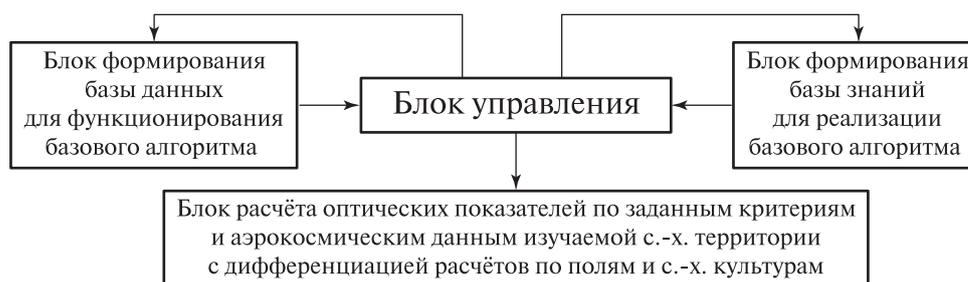


Рис. 3. Концептуальная блок-схема реализации базового алгоритма

Для программной реализации алгоритма по формализации и хранению в БЗ сведений о спектральных диапазонах и формулах расчёта различных оптических критериев и их характеристик была разработана структура базы данных (*рис. 4*, см. с. 155).

В таблице «Сенсоры» сохраняются названия сенсоров, количество оптических каналов, характеристика охватываемого спектрального диапазона, разрешение получаемых снимков и текстовое описание сенсора, а в таблице «Оптические каналы» хранится подробное описание каждого спектрального канала сенсора, включающее наименование канала, границы спектра, ширину и пространственное разрешение канала.

В таблице «Оптические критерии» содержатся машинное и обычное описания используемых критериев. При описании математической формулы расчёта критерия формируется машинная запись, где в квадратных скобках указываются границы используемых при расчёте критерия спектральных каналов, которые записываются через двоеточие. Такая запись позволяет в автоматическом режиме выбирать из базы данных конкретные оптические каналы сенсора, которые используются для расчёта оптического критерия. Для примера рассмотрим запись оптического критерия содержания хлорофилла (*таблица*).

При выборе пользователем интересующего критерия из базы данных автоматически выбираются те сенсоры, по комбинации каналов которых возможно посчитать этот критерий. Например, представленное в *таблице* описание индекса содержания хлорофилла указывает,

что необходимо найти те сенсоры, значения оптических диапазонов каналов которых позволяют получить оптический критерий, т. е. необходимо выбрать те каналы, значения которых охватывают спектральный диапазон 440–450, 700–710 и 745–755 нм. Для Sentinel-2 это каналы B1, B5 и B6 соответственно, для Landsat-8 требуемые спектральные каналы отсутствуют. Таким образом, при расчёте оптического критерия содержания хлорофилла из базы данных изображений будут выбраны только те каналы сенсоров, которые позволят рассчитать значение критерия.

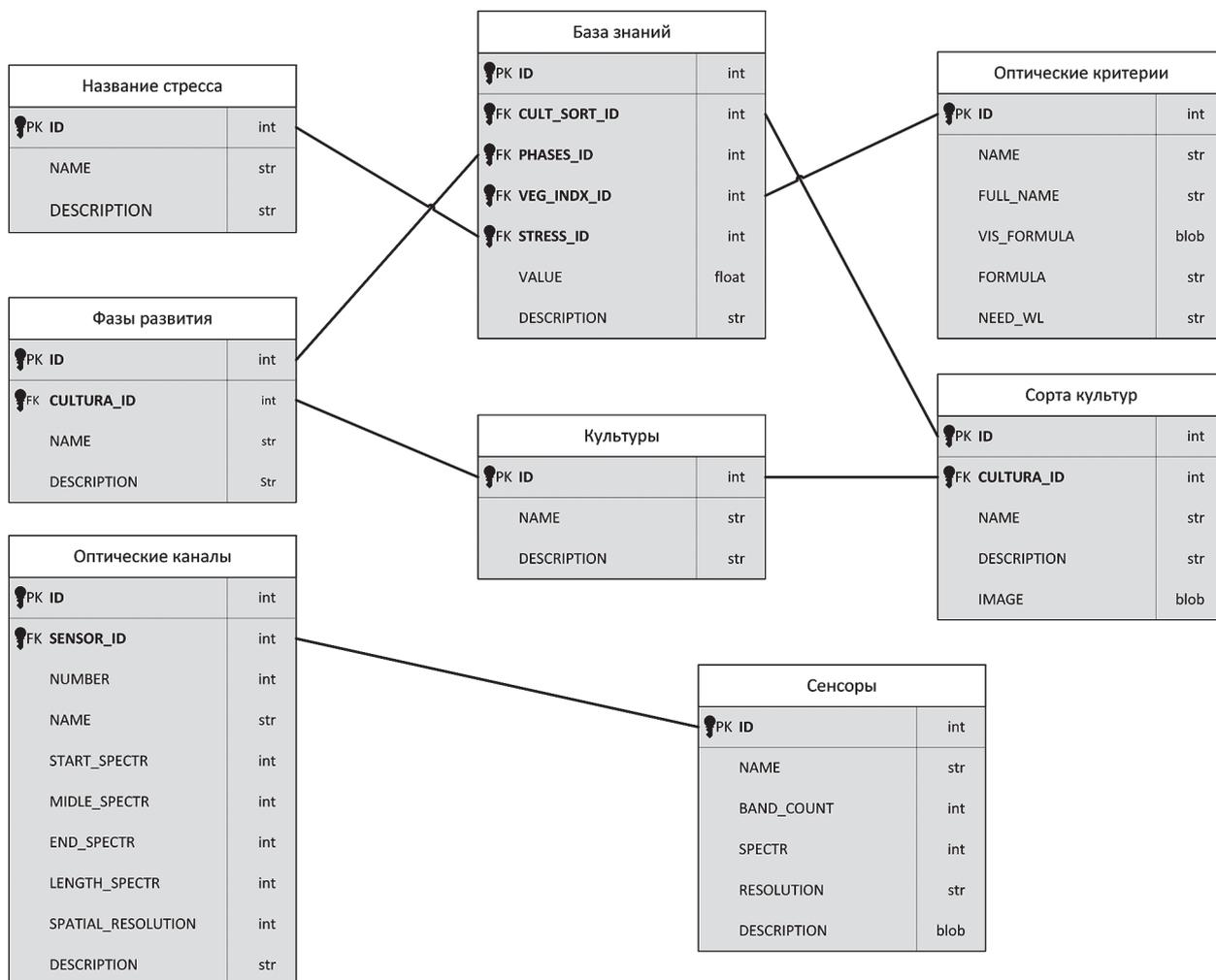


Рис. 4. Структура базы данных

Описание оптического критерия в БД

Короткое название критерия	ChIRI
Полное название критерия	Содержание хлорофилла
Графическое представление формулы	$ChIRI = \frac{(R_{750} - R_{705})}{(R_{750} + R_{705} - 2R_{445})}$
Машинная запись формулы	$\frac{[750;10] - [705;10]}{[750;10] + [705;10] - 2[44;10]}$
Используемые в расчёте критерия спектральные диапазоны	440:450; 700:710; 745:755

Характеристики критерия могут охватывать слишком широкий спектральный диапазон. Например, в расчёте NDVI используется красный спектр от 645 до 760 нм и ближний инфра-

красный от 781 до 1399 нм. В этом случае выбирается канал, полностью попадающий в требуемый диапазон, и самый широкий. Для Sentinel-2 для красного диапазона из трёх подходящих каналов будет выбран B4, а из ближнего инфракрасного — B8, для Landsat-8 — B4 и B5 соответственно.

В случае если для формулы вычисления оптического критерия требуется спектральный диапазон, который попадает своими границами на два канала сенсора и полностью не один из них не закрывает, выбирается тот канал, центр которого наиболее близок к границе спектрального диапазона оптического критерия.

Также в БД содержатся справочники культур, сортов, фаз развития и возможных стрессов, на основе которых формируется таблица «База знаний».

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

Значения новых критериев заносятся в базу знаний вручную или извлекаются из подгруженных аэрофотоснимков, на которых чётко различаются тестовые площадки с заданным стрессором.

При наполнении БЗ данными с аэрокосмических снимков пользователь сначала выбирает, для какой культуры, сорта, фазы вегетации, стресса производится измерение, на следующем шаге на снимке выделяется в ручном режиме зона с известным стрессом, после чего программа считает среднее значение для всех оптических критериев, которые возможно вычислить по конкретному снимку, с учётом всех спектральных каналов (рис. 5).

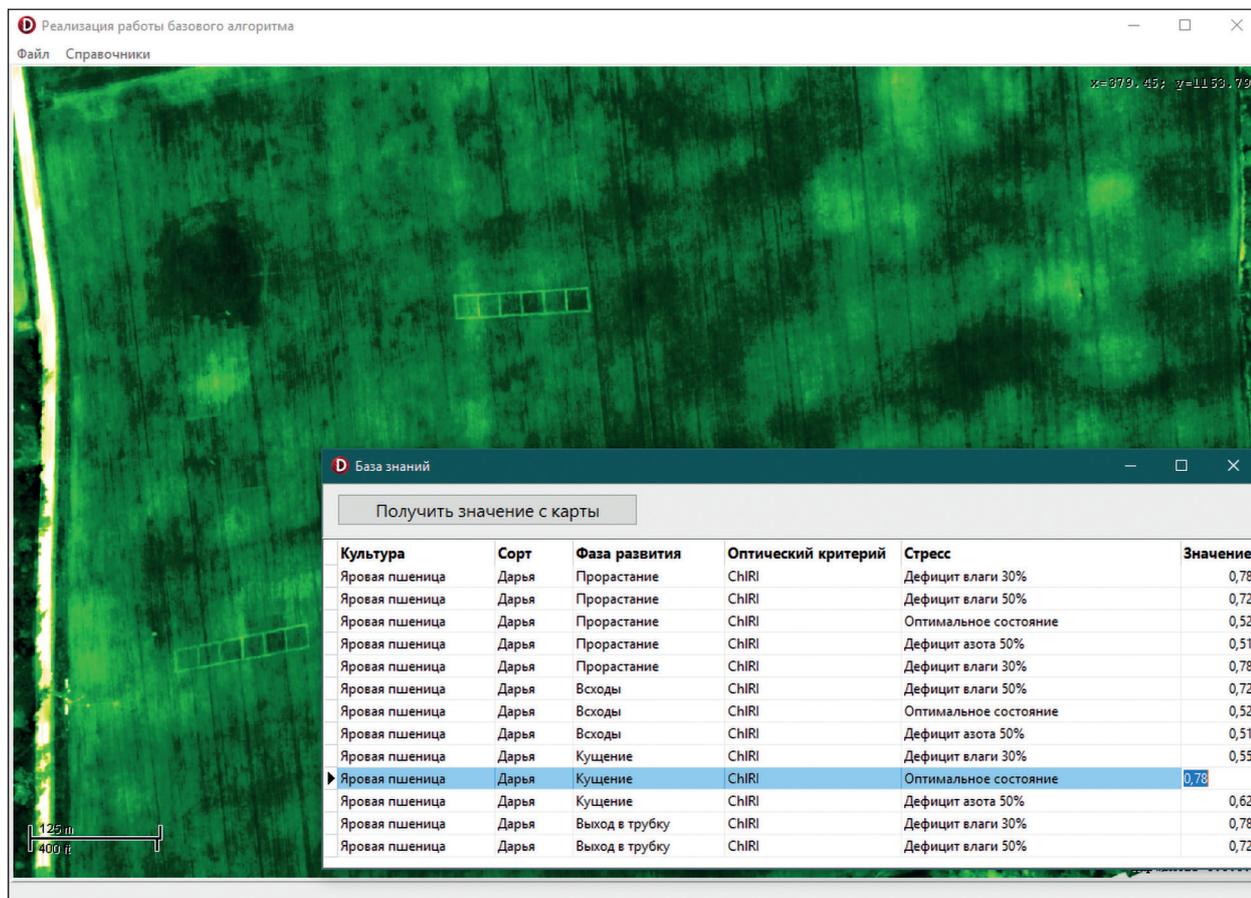


Рис. 5. Пример наполнения базы знаний значениями оптических критериев посева с гиперспектрального снимка

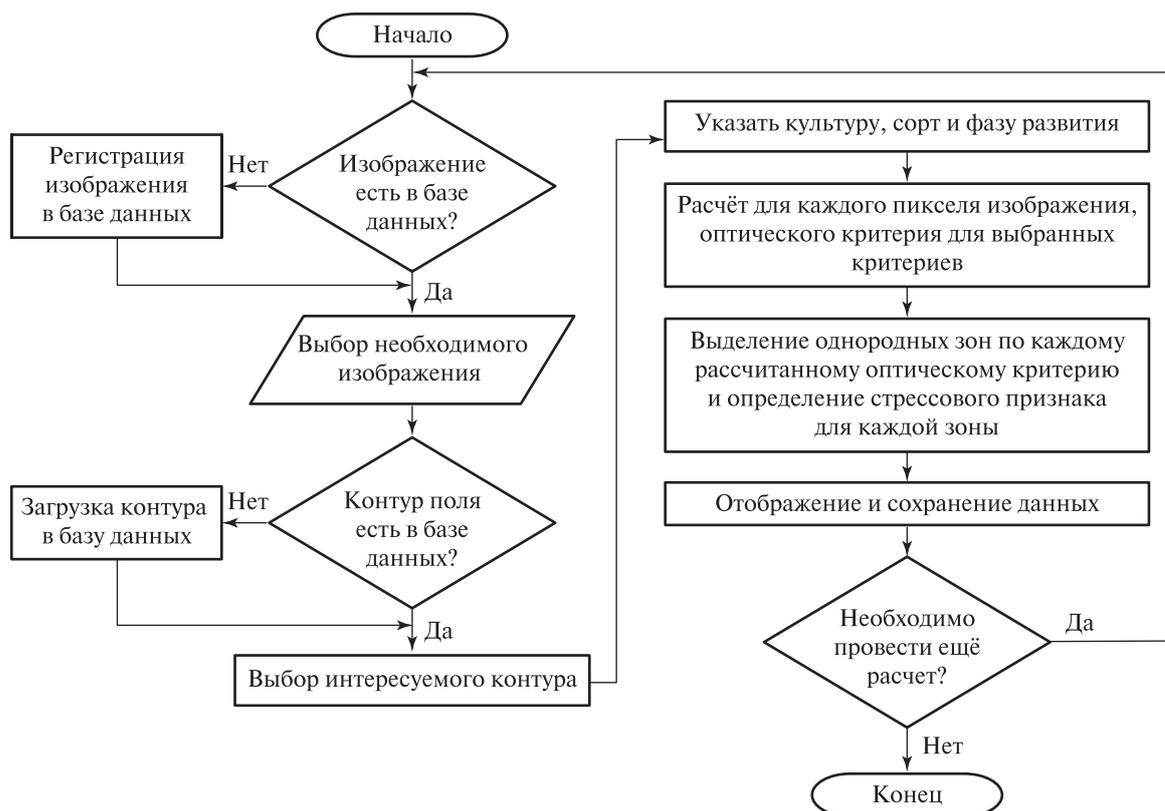


Рис. 6. Алгоритм работы программного модуля обнаружения и выделения границ внутриполевой изменчивости по гиперспектральным снимкам и оптическим критериям

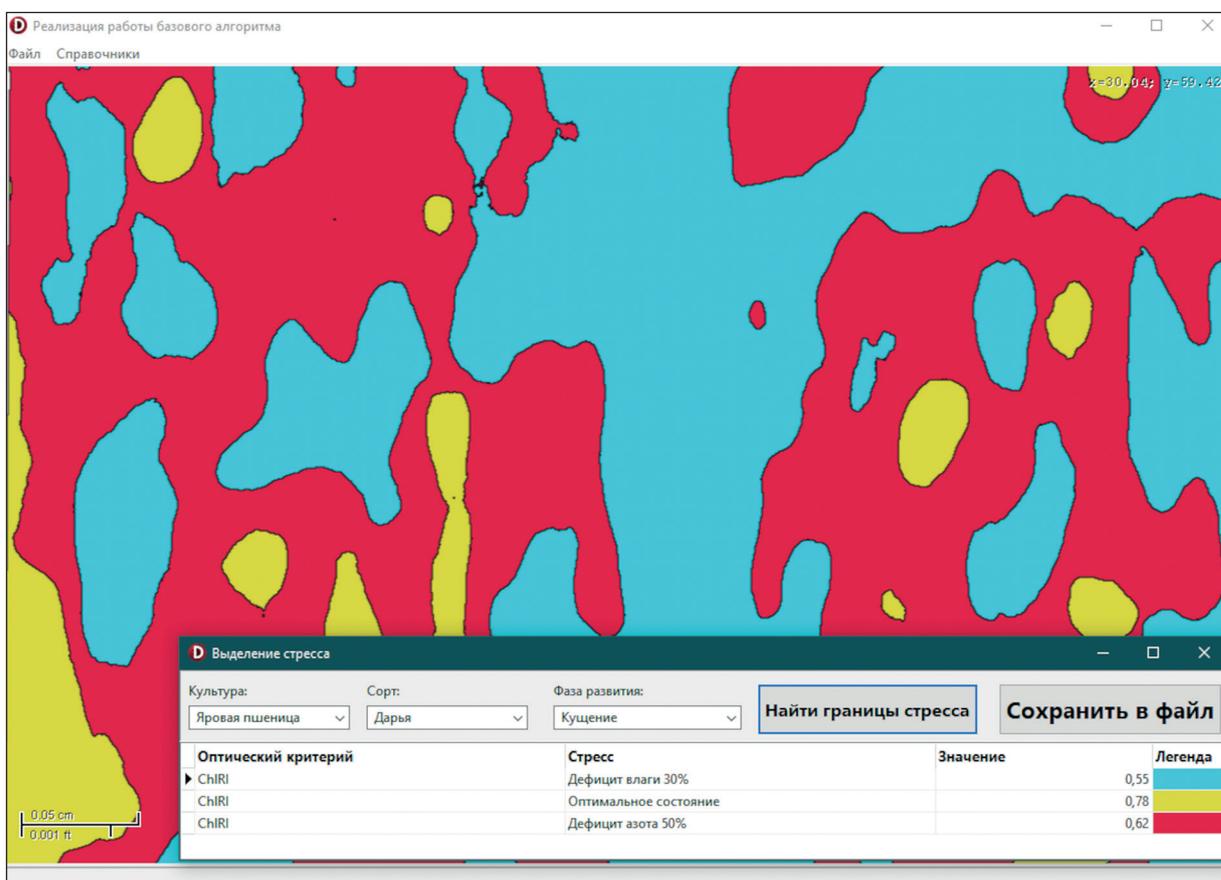


Рис. 7. Пример выделения зон внутриполевой неоднородности с определением типа стресса

После заполнения БЗ значениями оптических критериев для исследуемых культур возможен переход в режим автоматического обнаружения и выделения границ внутриполевой изменчивости по аэрокосмическим снимкам. Алгоритм работы представлен на *рис. 6* (см. с. 157). Пользователь выбирает имеющийся снимок интересующего поля из базы данных, а в случае его отсутствия регистрирует в базе данных новый снимок, указывая, каким сенсором он был получен, если программа автоматически не распознала тип сенсора. Затем необходимо выбрать контур поля в векторном формате либо подгрузить его из внешнего источника. Наличие контура поля позволяет уменьшить объём вычислений и снизить вероятность возникновения ошибок, так как алгоритм производит расчёты только в указанных границах. Далее выбирается культура, сорт и фаза развития растений в выделенном контуре. После чего происходит расчёт оптических критериев с выделением однородных зон и определением возможных стрессовых факторов в каждой зоне.

На *рис. 7* (см. с. 157) представлен пример апробации программной реализации алгоритма на экспериментальном поле с тестовыми площадками, на которых физически смоделированы два типа стресса: дефицит азота и различная водообеспеченность посева. В частности, для яровой пшеницы сорта Дарья в фазу кушения определены зоны оптимального развития посева (вносить удобрения не нужно), зоны, требующие подкормки азотными удобрениями в дозе 50 % от оптимальной дозы, и зоны, в которых посева испытывают недостаток влаги и внесение удобрений нецелесообразно.

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

Выводы

Предложен подход к формированию базы знаний оптических критериев растений и алгоритм автоматизированного расчёта количественных характеристик для выделения границ внутриполевой изменчивости. Программная реализация базового алгоритма позволяет не только обнаруживать участки посева с угнетёнными растениями, но и выявлять стрессор, действие которого стало причиной угнетения.

Апробация базового алгоритма успешно осуществлена на полигоне АФИ, где были проведены специализированные опыты с физическим моделированием двух стрессов: дефицита азота на фоне различной водообеспеченности. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности и масштабируемости применения оптических индексов для исследования реакции растений на действие почвенной засухи и недостатка азота для обоснования применения технологий точного земледелия.

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

Литература

1. Денисов П. В., Серёда И. И., Трошко К. А., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Толпин В. А. Возможности и опыт оперативного дистанционного мониторинга состояния озимых культур на территории России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 2. С. 171–185. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-171-185.
2. Матвеев 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. DOI: 10.25695/AGRPH.2020.01.09.
3. Якушев В. П., Дубенок Н. Н., Лупян Е. А. (2019а) Опыт применения и перспективы развития технологий дистанционного зондирования Земли для сельского хозяйства // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 11–23. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-11-23.

4. Якушев В. П., Канаиш Е. В., Якушев В. В., Матвеев Д. А., Русаков Д. В., Блохина С. Ю., Петрушин А. Ф., Митрофанов Е. П. (2019) Новые возможности автоматизации процесса обнаружения внутриагрокосмической неоднородности по гиперспектральным снимкам и оптическим критериям // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 24–32. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-24-32.
5. Якушев В. П., Канаиш Е. В., Русаков Д. В., Якушев В. В., Блохина С. Ю., Петрушин А. Ф., Блохин Ю. И., Митрофанова О. А., Митрофанов Е. П. Корреляционные зависимости между вегетационными индексами, урожаем зерна и оптическими характеристиками листьев пшеницы при разном содержании в почве азота и густоте посева // Сельскохозяйственная биология. 2022. Т. 57. № 1. С. 98–112. DOI: 10.15389/agrobiology.2022.1.98rus.
6. Breunig F. M., Galvão L. S., Dalagnol R., Dauve C. E., Parraga A., Santi A. L., Della Flora D. P., Chen S. Delineation of management zones in agricultural fields using cover-crop biomass estimates from PlanetScope data // Intern. J. Applied Earth Observation Geoinformation. 2020. V. 85. Art. No. 102004. DOI: 10.1016/j.jag.2019.102004.
7. Cammarano D., Zha H., Wilson L., Li Y., Batchelor W. D., Miao Y. A. Remote sensing-based approach to management zone delineation in small scale farming systems // Agronomy. 2020. V. 10. No. 11. Art. No. 1767. DOI: 10.3390/agronomy10111767.
8. Damian J. M., Santi A. L., Fornari M., Da Ros C. O., Eschner V. L. Monitoring variability in cash-crop yield caused by previous cultivation of a cover crop under a no-tillage system // Computers and Electronics in Agriculture. 2017. V. 142. P. 607–621. DOI: 10.1016/j.compag.2017.11.006.
9. Damian J. M., de Castro Pias O. H., Cherubin M. R., de Fonseca A. Z., Fornari E. Z., Santi A. L. Applying the NDVI from satellite images in delimiting management zones for annual crops // Scientia Agricola. 2020. V. 77. No. 1. Art. No. e20180055. DOI: 10.1590/1678-992x-2018-0055.
10. De Benedetto D., Castrignano A., Rinaldi M., Ruggieri S., Santoro F., Figorito B., Gualano S., Diacono M., Tamborrino R. An approach for delineating homogeneous zones by using multi-sensor data // Geoderma. 2013. V. 199. P. 117–127. DOI: 10.1016/j.geoderma.2012.08.028.
11. Derby N. E., Casey F. X. M., Franzen D. W. Comparison of nitrogen management zone delineation methods for corn grain yield // Agronomy J. 2007. V. 99. P. 405–414. DOI: 10.2134/agronj2006.0027.
12. Easterday K., Kislik C., Dawson T. E., Hogan S., Kelly M. Remotely sensed water limitation in vegetation: insights from an experiment with unmanned aerial vehicles (UAVs) // Remote Sensing. 2019. V. 11. No. 16. Art. No. 1853. DOI: 10.3390/rs11161853.
13. Fontanet M., Scudiero E., Skaggs T. H., Fernández-García D., Ferrer F., Rodrigo G., Bellvert J. Dynamic management zones for irrigation scheduling // Agricultural Water Management. 2020. V. 238. Art. No. 106207. DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106207.
14. Fridgen J. J., Kitchen N. R., Sudduth K. A., Drummond S. T., Wiebold W. J., Fraisse C. W. Management Zone Analyst (MZA) // Agronomy J. 2004. V. 96. No. 1. P. 100–108.
15. Garg A., Sapkota A., Haghverdi A. SAMZ-Desert: A Satellite-based agricultural management zoning tool for the desert agriculture region of southern California // Computers and Electronics in Agriculture. 2022. V. 194. Art. No. 106803. DOI: 10.1016/j.compag.2022.106803.
16. Gavioli A., de Souza E. G., Bazzi C. L., Guedes L. P. C., Schenatto K. Optimization of management zone delineation by using spatial principal components // Computers and Electronics in Agriculture. 2016. V. 127. P. 302–310. DOI: 10.1016/j.compag.2016.06.029.
17. Gavioli A., de Souza E. G., Bazzi C. L., Schenatto K., Betzek N. M. Identification of management zones in precision agriculture: an evaluation of alternative cluster analysis methods // Biosystems Engineering. 2019. V. 181. P. 86–102. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2019.02.019.
18. Georgi C., Spengler D., Itzerott S., Kleinschmit B. Automatic delineation algorithm for site-specific management zones based on satellite remote sensing data // Precis. Agriculture. 2018. V. 19. P. 684–707. DOI: 10.1007/s11119-017-9549-y.
19. Gili A., Alvarez C., Bagnato R., Noellemeyer E. Comparison of three methods for delineating management zones for site-specific crop management // Computers and Electronics in Agriculture. 2017. V. 139. P. 213–223. DOI: 10.1016/j.compag.2017.05.022.
20. Gu C., Wang X., Wang X., Yang F., Zhai C. Research progress on variable-rate spraying technology in orchards // Applied Engineering in Agriculture. 2020. V. 36. No. 6. P. 927–942. DOI: 10.13031/aea.14201.
21. Haghverdi A., Leib B. G., Washington-Allen R. A., Ayers P. D., Buschermohle M. J. Perspectives on delineating management zones for variable rate irrigation // Computers and Electronics in Agriculture. 2015. V. 117. P. 154–167.
22. Hong M. U., Bremer D. J., van der Merwe D. Using small unmanned aircraft systems for early detection of drought stress in Turfgrass // Crop Science. 2019. V. 59. No. 6. P. 2829–2844.
23. Jin Z., Prasad R., Shriver J., Zhuang Q. Crop model- and satellite imagery-based recommendation tool for variable rate N fertilizer application for the US Corn system // Precision Agriculture. 2017. V. 18. P. 779–800. DOI: 10.1007/s11119-016-9488-z.

24. *Karydas C., Iatrou M., Iatrou G., Mourelatos S.* Management zone delineation for site-specific fertilization in rice crop using multi-temporal RapidEye imagery // *Remote Sensing*. 2020. V. 12. Art. No. 2604. DOI: 10.3390/rs12162604.
25. *Khan H., Farooque A. A., Acharya B., Abbas F., Esau T. J., Zaman Q. U.* Delineation of management zones for site-specific information about soil fertility characteristics through proximal sensing of potato fields // *Agronomy*. 2020. V. 10. Art. No. 1854. DOI:10.3390/agronomy10121854.
26. *Lark R. M., Stafford J. V.* Classification as a first step in the interpretation of temporal and spatial variation of crop yield // *Annals of Applied Biology*. 1997. V. 130. No. 1. P. 111–121. DOI: 10.1111/j.1744-7348.1997.tb05787.x.
27. *Lu B., Dao P. D., Liu J., He Y., Shang J.* Recent advances of hyperspectral imaging technology and applications in agriculture // *Remote Sensing*. 2020. V. 12. No. 16. Art. No. 2659. DOI: 10.3390/rs12162659.
28. *Mulla D. J.* Twenty-five years of remote sensing in precision agriculture: key advances and remaining knowledge gaps // *Biosystems Engineering*. 2013. V. 114. P. 358–371. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009.
29. *Rossi R., Pollice A., Bitella G., Labella R., Bochicchio R., Amato M.* Modelling the non-linear relationship between soil resistivity and alfalfa NDVI: a basis for management zone delineation // *J. Applied Geophysics*. 2018. V. 159. P. 146–156. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2018.08.008.
30. *Santos R. T., Saraiva A. M.* A reference process for management zones delineation in precision agriculture // *IEEE Latin America Transactions*. 2015. V. 13. P. 727–738. DOI: 10.1109/TLA.2015.7069098.
31. *Shaddad S. M., Madrau S., Castrignano A., Mouazen A. M.* Data fusion techniques for delineation of site-specific management zones in a field in UK // *Precision Agriculture*. 2016. V. 17. No. 2. P. 200–217. DOI: 10.1007/s11119-015-9417-6.
32. *Yao R.-J., Yang J.-S., Zhang T.-J., Gao P., Wang X.-P., Hong L.-Z., Wang M.-W.* Determination of site-specific management zones using soil physico-chemical properties and crop yields in coastal reclaimed farmland, *Geoderma*, 2014. V. 232–234. P. 381–393. DOI: 10.1016/j.geoderma.2014.06.006.

Automatic delineation algorithm for within-field variability zones based on aerospace images and optical criteria

**V. P. Yakushev, A. F. Petrushin, V. V. Yakushev, S. Yu. Blokhina,
Yu. I. Blokhin, D. A. Matveenko, E. P. Mitrofanov**

*Agrophysical Research Institute, Saint Petersburg 195220, Russia
E-mails: vyakushev@agrophys.ru, sblokhina@agrophys.ru*

Rational application of precision agriculture technologies is impossible without a quantitative assessment of the range of within-field variability of the crop development and yield formation factors on cultivated agricultural lands. For the variable rate site-specific management of crop growing, it is very important to evaluate the degree of within-field variability of those factors. Remote sensing has been considered to be the most efficient, scalable, and cost-effective way to quantify spatial variability of crop and soil properties. The software implementation of the basic algorithm for within-field variability delineation and border marking based on aerospace images and optical criteria of crop canopy is presented. A modular control scheme for the formation of a knowledge base, a database and the process of calculating optical indices according to specified criteria and satellite images of the studied agricultural areas has been developed. The software module for creating a database is equipped with a Pascal graphical interface in the Rad Studio 11 software environment and contains various tables and references background information. Based on these data, the knowledge base has been filling with the calculated values of various optical indices characterizing the physiological state of the studied crops in various phases of their development, indicating the range of acceptable and critical values of possible stress factors.

Keywords: precision agriculture, remote sensing, optical criteria of plants, nitrogen and water deficiency, within-field variability, delineation algorithm

Accepted: 28.11.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-151-162

References

1. Denisov P. V., Sereda I. I., Troshko K. A., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Tolpin V. A., Opportunities and experience of operational remote monitoring of winter crops condition in Russia, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 2, pp. 171–185 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-171-185.
2. Matveenko D. A., Voropaev V. V., Yakushev V. V., Blokhin Yu. I., Blokhia S. Yu., Mitrofanov E. P., Petrushin A. F., Current state and trends of developing new methods for quantitative assessment of within-field heterogeneity for precision agriculture, *Agrofizika*, 2020, No. 1, pp. 59–70 (in Russian), DOI: 10.25695/AGRPH.2020.01.09.
3. Yakushev V. P., Dubenok N. N., Loupian E. A. (2019a), Earth remote sensing technologies for agriculture: application experience and development prospects, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 11–23 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-11-23.
4. Yakushev V. P., Kanash E. V., Yakushev V. V., Matveenko D. A., Rusakov D. V., Blokhina S. Yu., Petrushin A. F., Mitrofanov E. P. (2019b), Advanced features of automated detection of within-field variability based on hyperspectral images and optical criteria, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 24–32 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-24-32.
5. Yakushev V. P., Kanash E. V., Rusakov D. V., Yakushev V. V., Blokhina S. Yu., Petrushin A. F., Blokhin Yu. I., Mitrofanova O. A., Mitrofanov E. P., Correlation dependences between crop reflection indices, grain yield and optical characteristics of wheat leaves at different nitrogen level and seeding density, *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya*, 2022, Vol. 57, No. 1, pp. 98–112 (in Russian), DOI: 10.15389/agrobiol.2022.1.98rus.
6. Breunig F. M., Galvão L. S., Dalagnol R., Dauve C. E., Parraga A., Santi A. L., Della Flora D. P., Chen S., Delineation of management zones in agricultural fields using cover–crop biomass estimates from PlanetScope data, *Intern. J. Applied Earth Observation Geoinformation*, 2020, Vol. 85, Art. No. 102004, DOI: 10.1016/j.jag.2019.102004.
7. Cammarano D., Zha H., Wilson L., Li Y., Batchelor W. D., Miao Y., A Remote sensing-based approach to management zone delineation in small scale farming systems, *Agronomy*, 2020, Vol. 10, No. 11, Art. No. 1767, DOI: 10.3390/agronomy10111767.
8. Damian J. M., Santi A. L., Fornari M., Da Ros C. O., Eschner V. L., Monitoring variability in cash-crop yield caused by previous cultivation of a cover crop under a no-tillage system, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2017, Vol. 142, pp. 607–621, DOI: 10.1016/j.compag.2017.11.006.
9. Damian J. M., de Castro Pias O. H., Cherubin M. R., de Fonseca A. Z., Fornari E. Z., Santi A. L., Applying the NDVI from satellite images in delimiting management zones for annual crops, *Scientia Agricola*, 2020, Vol. 77, No. 1, Art. No. e20180055, DOI: 10.1590/1678-992x-2018-0055.
10. De Benedetto D., Castrignano A., Rinaldi M., Ruggieri S., Santoro F., Figorito B., Gualano S., Diacono M., Tamborrino R., An approach for delineating homogeneous zones by using multi-sensor data, *Geoderma*, 2013, Vol. 199, pp. 117–127, DOI: 10.1016/j.geoderma.2012.08.028.
11. Derby N. E., Casey F. X. M., Franzen D. W., Comparison of nitrogen management zone delineation methods for corn grain yield, *Agronomy J.*, 2007, Vol. 99, pp. 405–414, DOI: 10.2134/agronj2006.0027.
12. Easterday K., Kislik C., Dawson T. E., Hogan S., Kelly M., Remotely sensed water limitation in vegetation: insights from an experiment with unmanned aerial vehicles (UAVs), *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, No. 16, Art. No. 1853, DOI: 10.3390/rs11161853.
13. Fontanet M., Scudiero E., Skaggs T. H., Fernández-García D., Ferrer F., Rodrigo G., Bellvert J., Dynamic management zones for irrigation scheduling, *Agricultural Water Management*, 2020, Vol. 238, Art. No. 106207, DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106207.
14. Fridgen J. J., Kitchen N. R., Sudduth K. A., Drummond S. T., Wiebold W. J., Fraisse C. W., Management Zone Analyst (MZA), *Agronomy J.*, 2004, Vol. 96, No. 1, pp. 100–108.
15. Garg A., Sapkota A., Haghverdi A., SAMZ-Desert: A satellite-based agricultural management zoning tool for the desert agriculture region of southern California, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, Vol. 194, Art. No. 106803, DOI: 10.1016/j.compag.2022.106803.
16. Gavioli A., de Souza E. G., Bazzi C. L., Guedes L. P. C., Schenatto K., Optimization of management zone delineation by using spatial principal components, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2016, Vol. 127, pp. 302–310, DOI: 10.1016/j.compag.2016.06.029.
17. 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, pp. 86–102, DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2019.02.019.
18. Georgi C., Spengler D., Itzerott S., Kleinschmit B., Automatic delineation algorithm for site-specific management zones based on satellite remote sensing data, *Precision Agriculture*, 2018, Vol. 19, pp. 684–707, DOI: 10.1007/s11119-017-9549-y.

19. Gili A., Alvarez C., Bagnato R., Noellemeyer E., Comparison of three methods for delineating management zones for site-specific crop management, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2017, Vol. 139, pp. 213–223, DOI: 10.1016/j.compag.2017.05.022.
20. Gu C., Wang X., Wang X., Yang F., Zhai C., Research progress on variable-rate spraying technology in orchards, *Applied Engineering in Agriculture*, 2020, Vol. 36, No. 6, pp. 927–942, DOI: 10.13031/aea.14201.
21. Haghverdi A., Leib B. G., Washington-Allen R. A., Ayers P. D., Buschermohle M. J., Perspectives on delineating management zones for variable rate irrigation, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015, Vol. 117, pp. 154–167.
22. Hong M. U., Bremer D. J., van der Merwe D., Using small unmanned aircraft systems for early detection of drought stress in Turfgrass, *Crop Science*, 2019, Vol. 59, No. 6, pp. 2829–2844.
23. Jin Z., Prasad R., Shriver J., Zhuang Q., Crop model- and satellite imagery-based recommendation tool for variable rate N fertilizer application for the US Corn system, *Precision Agriculture*, 2017, Vol. 18, pp. 779–800, DOI: 10.1007/s11119-016-9488-z.
24. Karydas C., Iatrou M., Iatrou G., Mourelatos S., Management zone delineation for site-specific fertilization in rice crop using multi-temporal RapidEye imagery, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, Art. No. 2604, DOI: 10.3390/rs12162604.
25. Khan H., Farooque A. A., Acharya B., Abbas F., Esau T. J., Zaman Q. U., Delineation of management zones for site-specific information about soil fertility characteristics through proximal sensing of potato fields, *Agronomy*, 2020, Vol. 10, Art. No. 1854, DOI: 10.3390/agronomy10121854.
26. Lark R. M., Stafford J. V., Classification as a first step in the interpretation of temporal and spatial variation of crop yield, *Annals of Applied Biology*, 1997, Vol. 130, No. 1, pp. 111–121, DOI: 10.1111/j.1744-7348.1997.tb05787.x.
27. Lu B., Dao P. D., Liu J., He Y., Shang J., Recent advances of hyperspectral imaging technology and applications in agriculture, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, No. 16, Art. No. 2659, DOI: 10.3390/rs12162659.
28. Mulla D. J., Twenty-five years of remote sensing in precision agriculture: key advances and remaining knowledge gaps, *Biosystems Engineering*, 2013, Vol. 114, pp. 358–371, DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009.
29. Rossi R., Pollice A., Bitella G., Labella R., Bochicchio R., Amato M., Modelling the non-linear relationship between soil resistivity and alfalfa NDVI: a basis for management zone delineation, *J. Applied Geophysics*, 2018, Vol. 159, pp. 146–156, DOI: 10.1016/j.jappgeo.2018.08.008.
30. Santos R. T., Saraiva A. M., A reference process for management zones delineation in precision agriculture, *IEEE Latin America Transactions*, 2015, Vol. 13, pp. 727–738, DOI: 10.1109/TLA.2015.7069098.
31. Shaddad S. M., Madrau S., Castrignano A., Mouazen A. M., Data fusion techniques for delineation of site-specific management zones in a field in UK, *Precision Agriculture*, 2016, Vol. 17, No. 2, pp. 200–217, DOI: 10.1007/s11119-015-9417-6.
32. Yao R.-J., Yang J.-S., Zhang T.-J., Gao P., Wang X.-P., Hong L.-Z., Wang M.-W., Determination of site-specific management zones using soil physico-chemical properties and crop yields in coastal reclaimed farmland, *Geoderma*, 2014, Vol. 232–234, pp. 381–393, DOI: 10.1016/j.geoderma.2014.06.006.